

**ISSN 2078-4481**

Міністерство освіти і науки України  
Херсонський національний технічний університет

# **ВІСНИК**

**Херсонського національного  
технічного університету**

## **3(66)**

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Херсонського національного технічного університету  
(протокол № 1 від 29 серпня 2018 року)

---

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України  
(наказ Міністерства освіти і науки України від 11.07.2016 №820), у яких можуть  
публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів  
доктора та кандидата технічних наук

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв:  
Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky),  
РІНЦ (eLibrary)

**Херсон 2018**

## Редакційна рада

### Головний редактор

Бардачов Ю.М.

д.т.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України,  
ректор Херсонського національного технічного університету

### Заступники головного редактора

Розов Ю.Г.

д.т.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України  
Савіна Г.Г.

д.е.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України

### Відповідальний секретар

Корнева А.О.

начальник навчально-наукового відділу

## Редакційна колегія

Баганов Є.О.

Букетов А.В.

Валько М.І.

Дімітрова В.Я. (Болгарія)

Дмитрієв Д.О.

Коваленко В.Ф.

Коваленко М.А.

Коган О.Г. (Білорусь)

Кузьміна Т.О.

Кулігін М.Л.

Литвиненко В. І.

Миколайчук Н.С.

Міщенко Г.В.

Новіков О.О.

Партицький С. (Польща)

Рудакова Г.В.

Сарапіна О.А.

Сарібєкова Д.Г.

Сарібєкова Ю.Г.

Семенченко Ф.Г.

Сошко О.І.

Тіхосова Г.А.

Тулученко Г.Я.

Фомішина В.М.

Ходаков В.Є.

Хомченко А.Н.

Чепелюк О.В.

Чурсіна Л.А.

Шарко М.В.

к.т.н., доцент

д.т.н., професор

д.т.н., професор

д.н., доцент

д.т.н., професор

д.ф.-м.н., професор

д.е.н., професор

д.т.н., професор

д.т.н., професор

д.т.н., професор

д.т.н., професор

д.е.н., професор

д.т.н., професор

д.х.н., професор

д.с.н., професор

д.т.н., професор

д.е.н., професор

д.т.н., професор

д.т.н., професор

д.політ.н., професор

д.т.н., професор

д.т.н., професор

д.т.н., професор

д.е.н., професор

д.т.н., професор

д.ф.-м.н., професор

д.т.н., професор

д.т.н., професор

д.е.н., професор

**ISSN 2078-4481**

Министерство образования и науки Украины  
Херсонский национальный технический университет

# **ВЕСТНИК**

**Херсонского национального  
технического университета**

**3(66)**

Рекомендовано к печати Ученым советом  
Херсонского национального технического университета  
(протокол № 1 от 29 августа 2018 года)

---

Журнал включен в Перечень научных специализированных изданий Украины  
(приказ Министерства образования и науки Украины от 11.07.2016 №820),  
в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание  
ученых степеней доктора и кандидата технических наук

Журнал включен в наукометрические базы, электронные библиотеки и репозитории:  
Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky),  
РИНЦ (eLibrary)

**Херсон 2018**

## **Редакционный совет**

### **Главный редактор**

Бардачев Ю.Н.

д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины,  
ректор Херсонского национального технического университета

### **Заместители главного редактора**

Розов Ю.Г.

д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины  
Савина Г.Г.

д.э.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины

### **Ответственный секретарь**

Корнева А.А.

начальник учебно-научного отдела

## **Редакционная коллегия**

Баганов Е.А.

к.т.н., доцент

Букетов А.В.

д.т.н., профессор

Валько Н.И.

д.т.н., профессор

Димитрова В.Я. (Болгария)

д.н., доцент

Дмитриев Д.А.

д.т.н., профессор

Коваленко В.Ф.

д.ф.-м.н., професор

Коваленко Н.А.

д.э.н., профессор

Коган А.Г. (Беларусь)

д.т.н., профессор

Кузьмина Т.О.

д.т.н., профессор

Кулигин М.Л.

д.т.н., профессор

Литвиненко В.И.

д.т.н., профессор

Миколайчук Н.С.

д.э.н., профессор

Мищенко А.В.

д.т.н., профессор

Новиков А.А.

д.х.н., профессор

Партицкий С. (Польша)

д.с.н., профессор

Рудакова А.В.

д.т.н., профессор

Сарапина О.А.

д.э.н., профессор

Сарибекова Д.Г.

д.т.н., профессор

Сарибекова Ю.Г.

д.т.н., профессор

Семенченко Ф.Г.

д.полит.н., профессор

Сошко А.И.

д.т.н., профессор

Тихосова А.А.

д.т.н., профессор

Тулученко Г.Я.

д.т.н., профессор

Фомишина В.Н.

д.э.н., профессор

Ходаков В.Е.

д.т.н., профессор

Хомченко А.Н.

д.ф.-м.н., профессор

Чепелюк Е.В.

д.т.н., профессор

Чурсина Л.А.

д.т.н., профессор

Шарко М.В.

д.э.н., профессор



**ISSN 2078-4481**

Ministry of Education and Science of Ukraine  
Kherson National Technical University

**VISNYK**

**of Kherson National  
Technical University**

**3(66)**

Recommended for publication by the Academic Council of  
Kherson National Technical University  
(minutes № 1 on 29th August 2018)

---

The journal is included in the List of scientific professional publications of Ukraine  
(Order №820 of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated 11 July 2016) where  
the results of the theses of Doctor and Candidate of Engineering Science can be published

The journal is included in the scientometric bases, electronic libraries and repositories:  
Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky),  
RSCI (eLibrary)

**Kherson 2018**

## Editorial Board

### Editor-in-Chief

Bardachov Yu.M.

Professor, Doctor of Engineering Science, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine,  
Rector of Kherson National Technical University

### Deputies Editor-in-Chief

Rozov Yu.G.

Doctor of Engineering Science, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine

Savina H.H.

Doctor of Economics, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine

### Executive Secretary

Korneva A.O.

Head of Academic and Scientific Department

## Members of Editorial Board

**Baganov Ye.O.**

Ph.D., Associate Professor

**Buketov A.V.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Valko M.I.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Dimitrova V.Ya.** (Bulgaria)

Ph.D., Associate Professor

**Dmitriev D.O.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Kovalenko V.F.**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor

**Kovalenko M.A.**

Doctor of Economics, Professor

**Kogan A.G.** (Belarus)

Doctor of Engineering Science, Professor

**Kuz'mina T.O.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Kuligin M.L.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Lytvynenko V.I.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Mikolaichuk N.S.**

Doctor of Economics, Professor

**Mishchenko H.V.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Novikov O.O.**

Doctor of Chemistry, Professor

**Partitsky S.** (Poland)

Doctor of Social Sciences, Professor

**Rudakova H.V.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Sarapina O.A.**

Doctor of Economics, Professor

**Saribyekova D.G.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Saribyekova Yu.G.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Semenchenko F.H.**

Doctor of Political Science, Professor

**Soshko O.I.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Tikhosova H.A.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Tuluchenko H.Ya.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Fomishina V.M.**

Doctor of Economics, Professor

**Khodakov V.Ye.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Khomchenko A.N.**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor

**Chepelyuk O.V.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Chursina L.A.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Sharko M.V.**

Doctor of Economics, Professor

## ЗМІСТ

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

<b>Абрамов Г.С., Абрамов М.Г., Бардачов Ю.М.</b> Розподіл числа дисперсних частинок окислів в зоні внутрішнього окислення.....	11
<b>Абрамов Г.С., Абрамов М.Г.</b> Побудова виробничих функцій для валового продукту і транспортної галузі України та Херсонської області .....	17
<b>Бразалук Ю.В., Евдокимов Д.В., Кочубей О.О., Шульга Р.О.</b> Застосування методу граничних елементів для розрахунку течії Пуазейля в каналах складного поперечного перерізу .....	24
<b>Гальченко В.Я., Трембовецька Р.В., Тичков В.В.</b> Нейромережева метамодель циліндричного накладного вихрострумного перетворювача як складова сурогатного оптимального синтезу .....	32
<b>Гоменюк С.І., Гребенюк С.М., Клименко М.І., Мізерна О.Л.</b> Чисельне моделювання в'язкопружного деформування віброізолятора із волокнистого композиційного матеріалу.....	39
<b>Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б.</b> Податкова конкуренція і кооперація за світові корпорації .....	45
<b>Діктерук М.Г., Кравчук В.Т., Заслужений О.С., Човнюк Ю.В.</b> Дослідження закономірностей руху сипких матеріалів у вертикальних ємкостях (силоси/бункери): моніторинг статичного напруженого стану й аналіз витoku за другою формою у загальній постановці .....	55
<b>Кагадій Т.С., Білова О.В., Щербина І.В.</b> Узагальнення розв'язання контактних задач методом збурень для тіл з лінійною і циліндричною анізотропією .....	74
<b>Кондратьєва І.Ю., Рудакова Г.В., Поливода О.В.,</b> Моделювання акустичних сигналів електрообладнання методом авторегресії ковзного середнього .....	79
<b>Литвинчук Д.Г., Поливода О.В., Поливода В.В. Гавриленко В.О.</b> Математична модель динаміки вологості та температури зерна в процесі сушіння .....	85
<b>Ляшенко В.П., Дем'яненко О.П.</b> Математична модель температурного поля валків під час прокатки стрічки.....	91
<b>Мазманишвили О.С., Лаптев Д.В.</b> Математичне моделювання динаміки дисипативних квазібризерів в узагальненій моделі одновимірної решітки Хіроті .....	98
<b>Мачулянський О.В., Бабич Б.Б., Мачулянський В.О.</b> Моделювання електромагнітного відгуку одношарових нанокompозитних покриттів .....	104
<b>Миргород В.Ф., Гвоздева І.М., Деміров В.В.</b> Трендові статистики при негауссовому розподілі вихідних даних.....	109
<b>Михальов О.І., Зимогляд А.Ю., Гуда А.І., Ковтун В.В.</b> Моделювання фрактальної структури функціональних покриттів з урахуванням швидкості напilenня.....	115
<b>Москаленко Р.П., Зайденварг О.Л., Тишковец О.В., Стрельнікова О.О.</b> Комп'ютерне моделювання довговічності елементів гідротурбінного обладнання за наявністю дефектів типу тріщин.....	120
<b>Нікуліна Т.М., Нікуліна А.М., Гоман О.Г.</b> Удар круглого тіла о поверхню ідеальної нестисливої рідини.....	125
<b>Петрик М.Р., Михалик Д.М., Петрик О.Ю., Кордяк І.В.</b> Задача ретроспективної ідентифікації кінетичних параметрів процесу відтиску "тверде тіло-рідина" для консолідованих середовищ частинок мікропористої структури.....	131
<b>Поляков В.О., Хачапуридзе М.М.</b> Перехідні режими поздовжнього руху магнітолевітуючого поїзда.....	137
<b>Семененко В.Н., Андрейцев А.Ю., Крижановська Т.В., Семененко Т.М.</b> Про один метод керування рухом підводних суперкавітуючих апаратів.....	144
<b>Сівак І.М., Човнюк Ю.В., Кравчук В.Т.</b> Уточнений аналіз взаємодії вібраційної форми з бетонною сумішшю при різноспрямованих коливаннях.....	152
<b>Сметанкіна Н.В., Угрімов С.В.</b> Математичне моделювання відгуку багатшарового скла на вибухове навантаження з урахуванням фази розрідження.....	164
<b>Тарасов С.В., Редчиць Д.О., Тарасов А.С., Моїсєнко С.В.</b> Математичне моделювання турбулентного обтікання симетричних і несиметричних профілів.....	171
<b>Ходаков В.Є., Соколов А.Є., Веселовська Г. В.</b> Модель динаміки мотивації тих, яких навчають....	178
<b>Ходусов В.Д., Пігнастий М.О.</b> Про методи дослідження стійкості потокових параметрів виробничих ліній.....	184
<b>Хомченко А.Н., Литвиненко О.І, Астіоненко І.О.</b> Коноїди Ерміта-Кунса та їх властивості.....	193
<b>Ярецька Н.О., Рамський А.О.</b> Застосування Maple для розв'язання контактної задачі про тиск жорсткого кільцевого штампа на півпростір з початковими напруженнями.....	199

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<b>Аксак Н.Г.</b> Концепція побудови мультиагентних систем розподіленої нейромережевої обробки великих даних .....	205
<b>Ахметшина Л.Г., Єгоров А.О.</b> Покращення контрасту кольорових зображень на основі нечіткої кластеризації та аналізу незалежних компонентів .....	213
<b>Богацька А.С., Савченко Л.М., Воронцова Д.В.</b> 3D-моделювання персонажа комп'ютерної гри за розробленим концепт-артом .....	218
<b>Брескіна Л.В., Шувалова О.І.</b> Педагогічні умови одержання досвіду дистанційного навчання майбутніми учителями математики .....	223
<b>Брильов О.О., Островська К.Ю., Михальов О.І.</b> Проблеми валідації транзакцій в блокчейн та методи їх вирішення .....	232
<b>Волковський О.С., Ковилін Є.Р.</b> Комп'ютерна система інтелектуального семантичного пошуку з використанням генерації текстів .....	238
<b>Гарячевська І.В., Сидоров Д.Г.</b> Розрахунок окупності впровадження сонячної електростанції .....	245
<b>Гарячевська І.В., Мовенко С.Ю.</b> Розробка штучних нейронних мереж для прогнозування споживання електроенергії .....	250
<b>Гнатушенко В.В., Кавац О.О., Гнатушенко Вік.В., Кібукевич Ю.О., Кавац Ю.В.</b> Комп'ютерний аналіз радарних зображень високої роздільної здатності з метою моніторингу лісових насаджень .....	260
<b>Грицик В.В.</b> Систематизація завдань інформаційних технологій епохи 4-ої промислової революції... ..	265
<b>Давидовський М.В.</b> Еволюційно-фрагментарний метод узгодження онтологій .....	271
<b>Добровольський Г.А., Кеберле Н.Г., Прохоренко П.П.</b> Застосування методів побудови та аналізу мережі цитування для підготовки бібліографічного покажчика з методів персоналізації систем комп'ютерного навчання вимові .....	278
<b>Дорош Н.Л., Галізува А.М.</b> Розробка веб-додатка для аналізу часових рядів з використанням бібліотеки JSXGRAPH .....	286
<b>Дубровін В.І., Ікол С.О.</b> Аналіз методів розпізнавання та відстеження об'єктів на відео послідовності .....	292
<b>Зашепкіна Н.М., Божко К.М., Мельниченко Д.С.</b> Графічні задачі з комбінаторики на основі цифрової клавіатури .....	301
<b>Защолкін К.В., Іванова О.М.</b> Забезпечення контролю цілісності програмного коду fpga-базованих пристроїв .....	307
<b>Корабльов М.М., Фомічов О.О.</b> Гібридні моделі класифікації даних на основі моделі штучної імунної мережі .....	313
<b>Корчинський В.М., Свинаренко Д.М.</b> Просторово-інваріантне подання багатоспектральних видових даних дистанційного зондування .....	321
<b>Кривохата А.Г., Кудін О.В., Лісняк А.О.</b> Огляд методів машинного навчання для класифікації акустичних даних .....	327
<b>Назіров Е.К., Назірова Т.О., Карпенко М.Ю.</b> Методи збору та класифікації даних за допомогою саундлетної байєсівської нейронної мережі .....	332
<b>Ошаровська О.В., Патласенко М.О., Ошаровській І.В., Гурченко Н.П.</b> Алгоритми вибору порогів обмеження спектральних коефіцієнтів при узагальненому Фур'є-аналізі текстури зображень високої чіткості .....	338
<b>Приходько С.Б., Приходько Н.В., Мандра А.В., Ярема А.Я.</b> Нелінійне регресійне рівняння для оцінювання розміру програмного забезпечення інформаційних систем на VB .....	346
<b>Романюк О.Н., Вяткін С.І., Савицька Л.А., Трояновська Т.І.</b> Метод випромінюваності з використанням графічних прискорювачів .....	352
<b>Сафаров О.О.</b> Алгоритм підвищення якості візуалізації карт вегетаційних індексів .....	357
<b>Томашевський В.М., Олійник Ю.О., Яськов В.В., Романчук В.М.</b> Система аналізу аномалій у текстових потоках даних у реальному часі .....	361
<b>Царенко М.О., Пономаренко О.В.</b> Навчально-методичне доповнення щодо вивчення теми "комп'ютерні віруси та боротьба з ними" .....	366
<b>Чопоров С. В.</b> Подання обчислювальних сіток у системах інженерного аналізу.....	372

**CONTENS**

**MATHEMATICAL MODELING OF PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL PROCESSES AND TECHNICAL SYSTEMS**

<b>Abramov H.S., Abramov M.G., Bardachov Yu.M.</b> Distribution of disperse oxide particle numbers in the internal oxidation zone.....	11
<b>Abramov A.D., Abramov G.S.</b> Construction of production functions for gross product and transportation sectors of Ukraine and Kherson region .....	17
<b>Brazaluk Iu.V., Yevdokymov D.V., Kochubey O.O., Shulha R.O.</b> Application of the boundary element method for calculation of the poiseuille flow in the channels of a complex cross-section .....	24
<b>Halchenko V.Ya., Trembovetska R.V., Tychkov V.V.</b> Neuro-network methamodel of cylindrical eddy-current probe as a surrogate optimum synthesis component .....	32
<b>Homeniuk S.I., Grebeniuk S.M., Klimenko M.I., Mizernaya E.L.</b> Numerical modeling of viscoelastic deformation of vibroinsulator from fibrous composite material.....	39
<b>Gorbachuk V.M., Dunaievskiy M.S., Suleimanov S.-B.</b> Tax competition and cooperation for world corporations .....	45
<b>Dikteruk M.G., Kravchuk V.T., Zasluzennii A.S., Chovnyuk Y.V.</b> Investigation of free-flowing bulk material’s movement laws at vertical vessels (silos/hoppers): monitoring of static stress state and analysis of efflux by the second form at the general definition of a problem .....	55
<b>Kagadi T.S., Belova O.V., Shcherbina I.V.</b> Generalization of solving the contact problems by the perturbation method for bodies with linear and cylindrical anisotropy .....	74
<b>Kondratieva I.U., Rudakova H.V., Polyvoda O.V.</b> Modeling of electrical equipment acoustic signals by the method of autoregressive sliding average .....	79
<b>Lytvynchuk D.G., Polyvoda O.V., Polyvoda V.V. Havrylenko V.O.</b> Mathematical model of grain humidity and temperature dynamics in the drying process .....	85
<b>Lyashenko V., Demyanchenko O.</b> Mathematical simulation of temperature field of rolls at strip rolling.....	91
<b>Mazmanishvili A.S., Laptev D.V.</b> Mathematical modeling of the dynamics of dissipative quasibrithers in the generalized model of the one-dimensional Hirota lattice .....	98
<b>Machulianskyi O.V., Babych B.B., Machulianskyi V.O.</b> Modeling of an electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings .....	104
<b>Myrhorod V.F., Hvozdeva I.M., Demirov V.V.</b> Trend statistics at non-gaussian distribution of initial data.....	109
<b>Mikhalyov A.I., Zimoglyad A.Y., Guda A.I., Kovtun V.V.</b> Simulation fractal structures of functional coatings with regard to speed of evaporation.....	115
<b>Moskalenko R., Zaydenvarg O., Tyshkovets E., Strelnikova E.</b> Computer modeling the durability of hydroturbine equipments in presence of crack-like defects.....	120
<b>Nikulina T.M., Nikulina A.M., Homan O.H.</b> Round body impact on the surface of the ideal incompressible liquid.....	125
<b>Petryk M., Mykhalyk D., Petryk O., Kordiak I.</b> The problem of retrospective identification of the kinetic parameters of solid-liquid expression from consolidated medium of micro-porous particles .....	131
<b>Polyakov V.A., Khachapuridze N.M.</b> Transition modes of a magnetically levitated train’s longitudinal motion.....	137
<b>Semenenko V.N., Andreytsev A.Yu., Kryzhanovska T.V., Semenenko T.N.</b> On a method of control of the underwater supercavitating vehicle motion .....	144
<b>Sivak I.N., Chovnyuk Y.V., Kravchuk V.T.</b> Ascertain analysis of the interaction between vibrating form and concrete mixture with differently directed oscillations .....	152
<b>Smetankina N.V., Ugrimov S.V.</b> Mathematical modeling of response of multilayer glazing under blast loading with effect of underpressure phase.....	164
<b>Tarasov S.V., Redchyts D.O., Tarasov A.S., Moiseenko S.V.</b> Aerodynamics of j-airfoil in turbulent flow of air at arbitrary angle of attack .....	171
<b>Khodakov V.Ye., Sokolov A.Ye., Veselovskaya G.V.</b> The model of the motivation dynamics for the trainees .....	178
<b>Khodusov V.D., Pihnastyi M.O.</b> About methods of research of stability of stream parameters of production lines .....	184
<b>Khomchenko A.N., Litvinenko O.I., Astionenko I.O.</b> Hermite-Coons’ conoids and their properties .....	193
<b>Iaretska N.A., Ramsky A.A.</b> Use of Maple for solving the contact problem about pressure of stiff annular punch on the semi-space with initial stresses .....	199

## INFORMATION TECHNOLOGIES

<b>Axak N.G.</b> Concept of construction of multiagent systems of distributed neural network processing of big data .....	205
<b>Akhmetshina L.G., Yegorov A. A.</b> Color images contrast enhancement based on fuzzy clustering and independent components analyzing .....	213
<b>Bogatska A.S., Savchenko L.M., Vorontsova D.V.</b> 3D Modeling of computer game character by developed concept art .....	218
<b>Breskina L.V., Shuvalova O.I.</b> Pedagogical conditions for forming the training experience of future teachers of mathematics .....	223
<b>Brylov O.O., Ostrovskaya K.Y., Mikhalyov A.I.</b> The problems of transactions validation in the blockchaing and the methods of their solutions .....	232
<b>Volkovsky O.S., Kovylin E.R.</b> Computer system of intellectual semantic search with the text generation using .....	238
<b>Garyachevska I., Sydorov D.</b> Calculation of payback of introduction of a solar power station .....	245
<b>Garyachevska I., Movenko S.</b> Development of artificial neural networks for predicting electricity consumption .....	250
<b>Kavats O., Hnatushenko Vik., Kibukevych J., Kavats Y.</b> Computer analysis of radar high resolution images for forest landing monitoring .....	260
<b>Hrytsyk V.V.</b> Information technologies objectives of the 4th industrial revolution are systemized .....	265
<b>Davidovsky M.V.</b> An evolutionary-fragmentary method for ontology matching .....	271
<b>Dobrovolskyi H., Keberle N., Prokhorenko P.</b> Citation network construction and analysis method application to bibliographic index preparation for personalization methods in computer-aided pronunciation training .....	278
<b>Dorosh N.L., Haliuzova A.N.</b> Development of web applications for analysis of time series with using the jsxgraph library .....	286
<b>Dubrovin V.I., Ikol S.A.</b> Analysis of methods of recognition and tracking objects on video sequence .....	292
<b>Zashchepkina N.M., Bozhko K.M., Melnichenko D.</b> Graphic problems from combinatorics on the basis of digital keyboard .....	301
<b>Zashcholkin K.V., Ivanova O.M.</b> Ensuring integrity monitoring of the program code of fpga-based devices .....	307
<b>Korablyov M.M., Fomichov O.O.</b> Hybrid models of classification of data on the basis of the model of the artificial immune network .....	313
<b>Korchynskiy V.M., Svyarenko D.M.</b> Spatially-invariant representation of the multispectral specific data of remote sensing .....	321
<b>Kryvokhata A.G., Kudin O.V., Lisnyak A.O.</b> A survey of machine learning methods for acoustic data classification .....	327
<b>Nazirov E.K., Nazirova T.A., Karpenko M.Y.</b> Methods of collecting and classification by means of soundlet bayesian neural network .....	332
<b>Osharovska O.V., Patlaenko M.O., Osharovskiy I.V., Gurchenko N.P.</b> Thresholds selection algorithm for spectral coefficients of the generalized fourier-analysis textures in high definition image .....	338
<b>Prykhodko S.B., Prykhodko N.V., Mandra A.V., Yarema A.Y.</b> The non-linear regression equation to estimate the software size of VB-based information systems .....	346
<b>Vyatkin S.I., Romanyuk O.N., Savytska L.A., Troianovska T.I.</b> Method of emissivity based on graphics accelerators .....	352
<b>Safarov O.O.</b> The visualization quality improvement algorithm of vegetation index maps .....	357
<b>Tomashevskii V.M., Oliynik Y.O., Yaskov V.V., Romanchuk V.M.</b> Realtime text stream anomalies analysis system .....	361
<b>Tsarenko M., Ponomarenko O.</b> Educational and methodical addition for studying of the subject "computer viruses and fight against them" .....	366
<b>Choporov S.V.</b> Representation of computational meshes in computer-aided engineering .....	372

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

УДК 539.219.3

Г.С. АБРАМОВ

Херсонская государственная морская академия

М.Г. АБРАМОВ

Херсонский филиал национального университета кораблестроения

Ю.Н. БАРДАЧЁВ

Херсонский национальный технический университет

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ОКИСЛОВ В ЗОНЕ ВНУТРЕННЕГО ОКИСЛЕНИЯ

*Моделированием и экспериментально исследовано распределение числа частиц второй фазы по глубине зоны внутреннего окисления. Показано, что зависимость числа частиц  $N(x)$  имеет сложный характер и не может быть однозначно описана степенной функцией, т.к. её показатель  $n$  зависит и от координаты  $x$  и от продолжительности процесса  $t$ ; следовательно, теории, предсказывающие  $n=-3$  и  $n=-1$  имеют ограниченный характер и не описывают реальное распределение  $N(x)$ , особенно на ранних стадиях процесса и вблизи поверхности.*

*Ключевые слова: внутреннее окисление, параметры зоны внутреннего окисления, распределение числа частиц по глубине зоны внутреннего окисления.*

Г.С. АБРАМОВ

Херсонська державна морська академія

М.Г. АБРАМОВ

Херсонська філія національного університету кораблебудування

Ю.М. БАРДАЧОВ

Херсонський національний технічний університет

### РОЗПОДІЛ ЧИСЛА ДИСПЕРСНИХ ЧАСТИНОК ОКИСЛІВ В ЗОНІ ВНУТРІШНЬОГО ОКИСЛЕННЯ

*Моделюванням і експериментально досліджено розподіл числа частинок другої фази по глибині зони внутрішнього окислення. Показано, що залежність числа частинок  $N(x)$  має складний характер і не може бути однозначно описана степенною функцією, тому що її показник  $n$  залежить і від координати  $x$  і від тривалості процесу  $t$ ; отже, теорії, що передбачають  $n = -3$  і  $n = -1$  мають обмежений характер і не описують реальний розподіл  $N(x)$ , особливо на ранніх стадіях процесу і поблизу поверхні.*

*Ключові слова: внутрішнє окислення, параметри зони внутрішнього окислення, розподіл числа частинок по глибині зони внутрішнього окислення.*

H.S. ABRAMOV

Kherson State Maritime Academy

M.G. ABRAMOV

Kherson Branch of the National University of Shipbuilding

Yu.M. BARDACHOV

Kherson National Technical University

### DISTRIBUTION OF DISPERSE OXIDE PARTICLE NUMBERS IN THE INTERNAL OXIDATION ZONE

*Modeling of the process of internal oxidation in binary alloy plates has shown that the supersaturation of the solid solution during internal oxidation of the binary alloy plastium has a maximum near the surface, which, with the passage of time, shifts to the center of the plate. Over a long period of time, a slowly relaxing region forms in the center of the plate with maximum supersaturation of the solid solution. The relaxation rate of supersaturation in each deeper section of the plate decreases. The kinetics of the change in supersaturation in each section of the alloy in the process of internal oxidation have the following stages: an increase in supersaturation to a certain maximum value, a stage of rapid reduction of the supersaturation, and a prolonged stage of asymptotic approach to the equilibrium state. Accordingly, we can distinguish the stages of formation of the two-phase region: rapid nucleation and growth of particles; intensive growth of particles with the attenuation of the nucleation of new*

particles; at the asymptotic stage, nucleation is absent (supersaturation tends to zero), and the growth of particles of the new phase due to the solid solution material gradually gives way to growth by the mechanism of coalescence. The comparison of modelling results and the experiment shows that the results obtained from the suggested mathematical models qualitatively match the experimental data for the internal oxidation of Ni-Ti and Ni-Cr alloys and explain the heterogeneous distribution of disperse particle size by depth of the internal oxidation zone.

By the way of modelling and distribution of the number of second phase particles along the depth of the internal oxidation zone was experimentally simulated and experimentally investigated. It is shown that the dependence of the number of particles  $N(x)$  is complex and can not be unambiguously described by a step function, since its index  $n$  depends on the coordinate  $x$  and the duration of the process  $t$ . Consequently, theories predicting  $n = -3$  and  $n = -1$  are of limited character and do not describe the real distribution of  $N(x)$ , especially in the early stages of the process and near the surface.

**Key words:** internal oxidation, parameters of the internal oxidation zone, distribution of the number of particles along the depth of the internal oxidation zone.

### Постановка проблеми

Теоретическое описание процесса внутреннего окисления существенно затруднено, так как кинетика внутреннего окисления и структура образующейся двухфазной области определяются не только условиями проведения процесса, но и величиной многих кинетических и термодинамических параметров [1, 2]. Многовариантность сочетаний этих параметров приводит к большому разнообразию возможных распределений параметров структуры и закономерностей их эволюции. Поэтому, в общем случае, практически невозможно проводить прогнозирование процесса внутреннего окисления и параметров получающейся структуры двухфазной зоны на основании каких-либо априорных соображений или простых математических моделей. Проведенное в работе сопоставление результатов численного моделирования с экспериментом показывает, что полученные из предложенной математической модели результаты качественно соответствуют экспериментальным данным по внутреннему окислению сплавов  $Ni-Ti$  и  $Ni-Cr$  и объясняют наблюдавшееся во многих работах [1, 2, 8–12] неоднородное распределение размера дисперсных частиц по глубине зоны внутреннего окисления.

### Анализ последних исследований и публикаций

В литературе имеется несколько работ, в которых сделаны попытки теоретического исследования зависимости среднего числа частиц  $N$  в единице объема зоны внутреннего окисления от расстояния  $x$  до поверхности плоского образца. Бём и Кальвейт [3], предполагая, что выделение второй фазы происходит в момент достижения максимального пересыщения в данном сечении, и, заменяя рассмотрение ансамбля частиц в данном сечении рассмотрением некоторой эффективной растущей окисной пленки, получили кубический закон убывания числа частиц с расстоянием от поверхности  $N \sim x^{-3}$ . ДANELIA и Розенберг [2] провели формальный учет объемного распределения выделений второй фазы и получили обратно пропорциональную зависимость  $N \sim x^{-1}$ . В этой работе проведен также анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных по зависимости  $N(x)$ . Отмечено, что во многих случаях наклон прямой в координатах  $\lg N - \lg x$  соответствует показателю степени для величины  $x^n$ , большему, чем  $(-3)$ , и приближается к  $(-1)$ . Кроме того, и в тех экспериментах, в которых наблюдалась зависимость  $N(x)$ , предсказываемая теорией Бёма и Кальвейта, это имело место при больших значениях  $x$ ; при меньших же значениях  $x$  число частиц  $N$  отклоняется от теоретической зависимости в сторону меньших значений.

Разработанный в работах [4–7] подход, основанный на компьютерной реализации достаточно полной математической модели процесса, рассматривающей полную систему трёхкомпонентных диффузионных уравнений и эволюцию функции распределения частиц по размерам, позволяет выявить основные закономерности кинетики процесса и прогнозировать структуру зоны внутреннего окисления, в том числе, распределение дисперсных частиц окислов по глубине зоны внутреннего окисления.

### Цель исследования

Представляется целесообразным провести качественное сравнение результатов моделирования процесса внутреннего окисления и некоторых экспериментальных результатов по внутреннему окислению сплавов  $Ni-Cr$  и  $Ni-Ti$ , в том числе, выявить закономерности распределения частиц по глубине зоны внутреннего окисления.

### Изложение основного материала исследования

Моделирование процесса внутреннего окисления в пластинах бинарных сплавов показало, что пересыщение твердого раствора при внутреннем окислении пластины бинарного сплава имеет максимум вблизи поверхности, который с течением времени смещается в центр пластины. При больших временах в центре пластины формируется медленно релаксирующая область с максимальным пересыщением твердого раствора. Скорость релаксации пересыщения в каждом более глубоком сечении пластины уменьшается. Кинетика изменения пересыщения в каждом сечении сплава в процессе внутреннего окисления имеет следующие стадии: рост пересыщения до некоторого максимального значения, стадия быстрого снижения



пересыщения и продолжительная стадия асимптотического приближения к состоянию равновесия. Соответственно, можно выделить и стадии формирования двухфазной области: бурное зарождение и рост частиц; интенсивный рост частиц с затуханием зарождения новых частиц; на асимптотической стадии зарождение отсутствует (пересыщение стремится к нулю), и рост частиц новой фазы за счет вещества твердого раствора постепенно уступает место росту по механизму коалесценции.

Рассмотрим результаты моделирования и экспериментальные данные по зависимости  $N(x)$  для пластины, полученные в настоящей работе.

На рис.1 приведена кривая  $\lg N - \lg x$ , полученная моделированием на ЭВМ процесса внутреннего окисления для "толстой" пластины с низкими значениями коэффициентов диффузии. Видно, что кривая состоит из двух ветвей: левая ветвь, соответствующая приповерхностным сечениям, хорошо аппроксимируется зависимостью  $N \sim x^{-1}$ , а правая ветвь может быть аппроксимирована зависимостью  $N \sim x^{-3}$ .

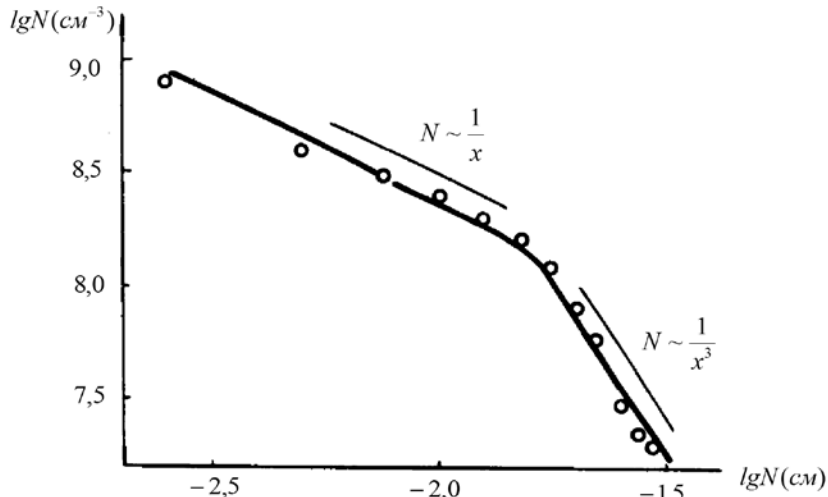


Рис. 1. Распределение числа частиц по сечению пластины  $l=600\text{мкм}$ .

$$D_{11} = 0,1 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2 / \text{с}; D_{12} = -0,5 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2 / \text{с}; D_{22} = 0,1 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2 / \text{с};$$

$$C_1^0 = 0; C_1^1 = 0,01; C_2^0 = 0,12; C_2^1 = 0,10; \alpha = 0,1 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3 / \text{с};$$

$$\omega_1 = 3; \omega_2 = 2; \mu_0 = 0,1 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}; \kappa = 0,35 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$$

На рис. 2 приведена экспериментальная кривая распределения числа частиц  $N$  по сечению пластины сплава  $Ni - 1\%Cr$  внутреннеокисленной при  $T=1150^\circ\text{C}$  в течение 30 часов. Видно, что и приведенная экспериментальная кривая может быть разделена на две ветви, которые удовлетворительно описываются зависимостями  $N \sim x^{-1}$  и  $N \sim x^{-3}$ .

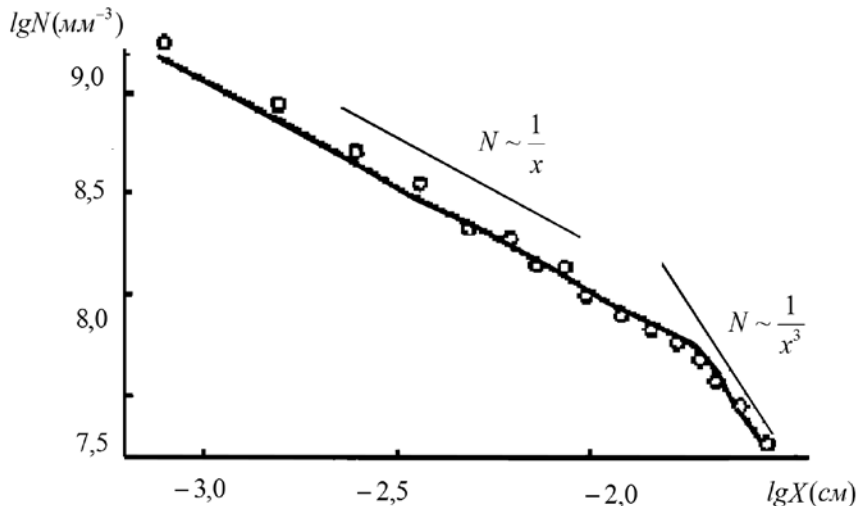


Рис. 2. Распределение числа частиц по сечению пластины сплава  $Ni - 1\%Cr$ .  $l=500 \text{ мкм}$ ,  $T=1150^\circ\text{C}$ ,  $t=30 \text{ часов}$

Однако, для пластин с более высоким содержанием хрома распределение  $N(x)$  изменяется (рис.3): исчезает участок кривой с кубической зависимостью  $N \sim x^{-3}$ , угол наклона кривых со временем уменьшается и показатель степени  $n$  становится больше, чем  $(-1)$ .

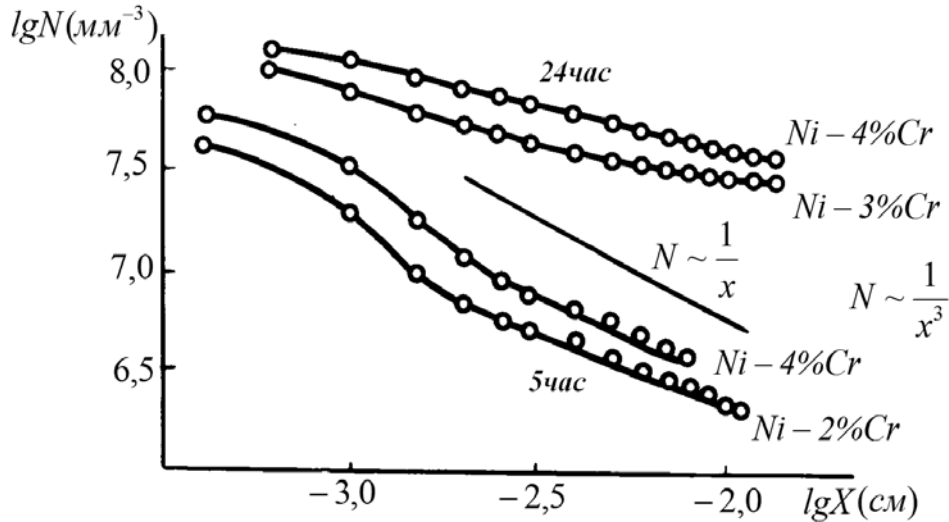


Рис. 3. Распределение числа частиц по сечению пластин сплавов Ni - Cr:  $l=500 \text{ мкм}$ ,  $T=1150 \text{ }^\circ\text{C}$

На рис. 4 приведены результаты моделирования распределения числа частиц по сечению более "тонкой" пластины и при более высоких значениях коэффициентов диффузии.

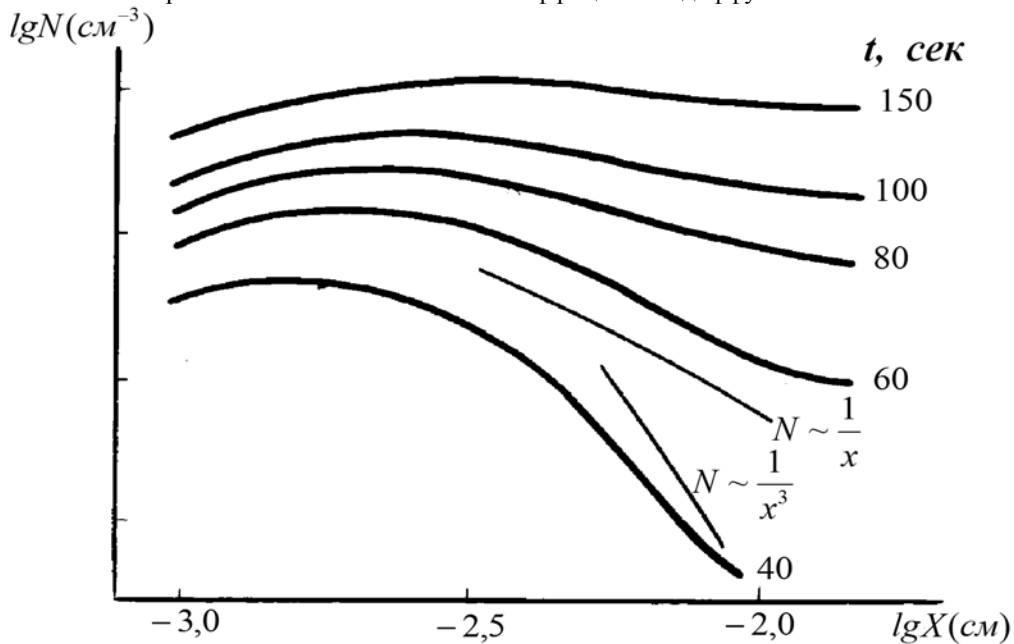


Рис. 4. Распределение числа частиц по сечению пластины  $l=150 \text{ мкм}$   
 $D_{11} = 0,1 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2 / \text{с}$ ;  $D_{12} = -0,5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2 / \text{с}$ ;  $D_{22} = 0,4 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2 / \text{с}$ ;  
 $\omega_1 = 3$ ;  $\omega_2 = 2$ ;  $\mu_0 = 0,1 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$ ;  $\aleph = 0,35 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

Видно, что в этом случае зависимость  $\lg N$  от  $\lg x$  не описывается прямой линией и трудно говорить о какой-либо определенной зависимости  $N \sim x^n$ . Кривая  $N(x)$  в логарифмических координатах имеет максимум, который со временем смещается к центру пластины, т.е. кривая  $N(x)$  имеет возрастающую и ниспадающую ветви, причем угол наклона ниспадающей ветви кривой со временем становится все более пологим: показатель степени для этого участка кривой со временем увеличивается и стремится к нулю, т.е. в центре пластины формируется площадка с примерно равным значением числа частиц  $N$ .

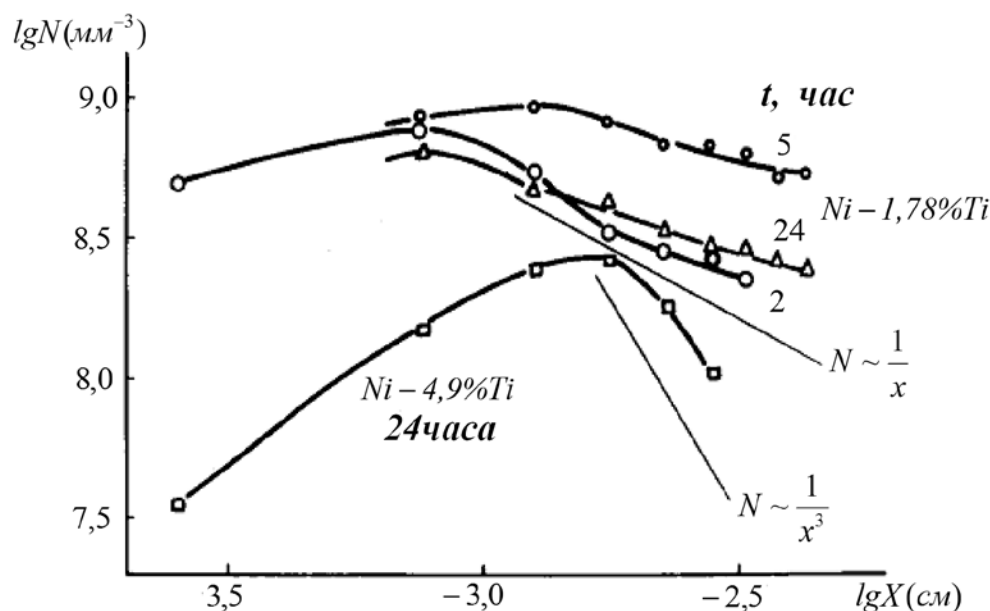


Рис. 5. Распределение числа частиц по сечению пластины сплава Ni - 1,78%Ti.  $l=100$  мкм,  $T=1150$  °C

На рис. 5 приведены экспериментальные данные о распределении числа частиц по сечению внутреннеокисленной зоны сплава Ni - 1,78%Ti.

Видно, что кривые  $\lg N - \lg x$ , как и на вышеприведенном рис. 4 имеют экстремальный характер. Наклон ниспадающей ветви кривой со временем уменьшается и показатель степени  $n > -1$ . Кривая, соответствующая 24 часам внутреннего окисления, лежит ниже, чем после 5 часов окисления. Это связано с протеканием на асимптотической стадии внутреннего окисления пластины процесса коалесценции.

#### Выводы

Моделированием и экспериментально показано, что зависимость распределения  $N(x)$  по сечению пластины имеет экстремальный характер и не может быть однозначно описана выражением вида  $N \sim x^n$ , так как при этом показатель степени  $n$  оказывается зависимым и от координаты  $x$  и от времени  $t$ . Теории, предсказывающие зависимость типа  $N \sim x^{-1}$  и  $N \sim x^{-3}$  для распределения числа частиц по сечению пластины, имеют локальный характер и, в общем случае, далеки от реального распределения, особенно на ранних стадиях процесса и в приповерхностных слоях пластины. Моделирование показало, что вид распределения  $N(x)$  имеет более сложный характер и зависит от конкретных кинетических и термодинамических параметров, определяющих процесс внутреннего окисления в пластине бинарного сплава данной толщины.

Проведенное в работе сопоставление результатов численного моделирования с экспериментом показывает, что полученные из предложенной математической модели результаты качественно соответствуют экспериментальным данным по внутреннему окислению сплавов Ni-Ti и Ni-Cr и объясняют наблюдавшееся во многих работах [1, 2, 8-12] неоднородное распределение размера дисперсных частиц по глубине зоны внутреннего окисления.

Таким образом, распределения числа частиц  $N$ , среднего радиуса  $\bar{R}$  и объема фазы  $V_\phi$  по толщине пластины имеет немонотонный характер. Показано, что зависимость числа частиц от координаты  $x$  имеет сложный экстремальный характер и не может быть однозначно описана выражением вида  $N \sim x^n$ , так как показатель степени  $n$  при этом зависит и от координаты  $x$  и от продолжительности процесса  $t$ . Следовательно, теории, предсказывающие  $n = -3$  и  $n = -1$  имеют ограниченный характер и не описывают реальное распределение  $N(x)$ , особенно на ранних стадиях процесса и вблизи поверхности пластины.

## Список использованной литературы

1. Кипарисов С.С. Внутреннее окисление и азотирование сплавов / С.С. Кипарисов, Ю.В. Левинский. – М.: Металлургия, 1979. – 200 с.
2. Данелия Е.П. Внутреннеокисленные сплавы / Е.П. Данелия, В.М. Розенберг. – М.: Металлургия, 1978. – 232 с.
3. Böhm G., Kahlweit M. Über die innere Oxydation von Metallegierungen / G. Böhm, M. Kahlweit – Acta Metallurg. – 1964. – 12. – S. 641-648.
4. Абрамов Г.С. Условия образования двухфазной области в процессе внутреннего окисления / Г.С. Абрамов // Физико-технические и технологические приложения математического моделирования. Сб. научных трудов. – НАН Украины. Инст. математики. – Киев, 1998. – С. 6-8.
5. Абрамов Г.С. Кинетика формирования двухфазной области в процессе внутреннего окисления / Г.С. Абрамов // Физико-технические и технологические приложения математического моделирования.: Сб. научных трудов / НАН Украины. Инст. математики. – Киев, 1998. С. 3-5.
6. Абрамов Г.С. Исследование асимптотической стадии процесса внутреннего окисления тонких пластин бинарных сплавов / Г.С. Абрамов // Вестник ХНТУ. – 2002. – № 2 (15). – С. 9-12.
7. Абрамов Г.С. Основные закономерности формирования структуры диффузионной зоны при одновременном поверхностном и внутреннем окислении сплавов / Г.С. Абрамов, М.Г. Абрамов // Вестник ХНТУ. – 2007. – № 2 (24). – С. 11-16.
8. Lacroix R. Texture et proprietes de produits composites a base d'argent obtenus par oxydation interne / R. Lacroix // Mem. Sci. Rev. Metall., 1967, 64. P. 583 – 594.
9. Goto S. Structures in the internally oxidized dilute nickel alloys containing chromium / S. Goto, S. Koda // J. Japan Inst. Metals. – 1967. – V.31. – № 11. – P. 1278-1284.
10. Goto S. Internal oxidation of dilute Ni-Al solid solution alloys / S. Goto, S. Koda // J. Japan Inst. Metals. – 1968. – V. 32. – № 4. – P. 334-340.
11. Аленькин В.И. Некоторые закономерности формирования микроструктуры при внутреннем окислении никелевых сплавов / В.И. Аленькин, В.А. Куликов, В.А. Подергин // В кн.: Теория и технология металлургических процессов. – Н.: Наука, 1973. – С. 67 – 72.
12. Аленькин В.И. Особенности термической стабильности структуры внутреннеокисленных никелевых сплавов. / В.И. Аленькин, В.А. Куликов, А.Н. Шурыгин // Известия вузов. Физика. – 1974. – № 1. – С. 85-92.

УДК 330.43:519.6

О.Д. АБРАМОВ

Херсонський національний технічний університет

Г.С. АБРАМОВ

Херсонська державна морська академія

## ПОБУДОВА ВИРОБНИЧИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ ВАЛОВОГО ПРОДУКТУ І ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ ТА ХЕРСОНСЬКОЇ ОБЛАСТІ

*На основі економетричного аналізу побудовані виробничі функції для валового продукту і транспортної галузі України та Херсонської області. Побудовані лінійні адитивні і мультиплікативні степеневі моделі, які визначають вплив трудових і матеріальних затрат на обсяги виробництва. Аналіз побудованих виробничих функцій показує, що в Херсонській області, як і в цілому по Україні, є потенціал для розширення обсягів виробництва, насамперед за рахунок збільшення трудових витрат.*

*Ключові слова: економетричний аналіз, виробничі функції, транспортна галузь.*

А.Д. АБРАМОВ

Херсонский национальный технический университет

Г.С. АБРАМОВ

Херсонская державная морская академия

## ПОСТРОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ВАЛОВОГО ПРОДУКТА И ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ УКРАИНЫ И ХЕРСОНСКОЙ ОБЛАСТИ

*На основе эконометрического анализа построены производственные функции для валового продукта и транспортной отрасли Украины и Херсонской области. Построены линейные аддитивные и мультипликативные степенные модели, определяющие влияние трудовых и материальных затрат на объемы производства. Анализ построенных производственных функций показывает, что в Херсонской области, как и в целом по Украине, есть потенциал для расширения объемов производства, в первую очередь за счет увеличения трудовых затрат.*

*Ключевые слова: эконометрический анализ, производственные функции, транспортная отрасль.*

A.D. ABRAMOV

Kherson National Technical University

H.S. ABRAMOV

Kherson State Maritime Academy

## CONSTRUCTION OF PRODUCTION FUNCTIONS FOR GROSS PRODUCT AND TRANSPORTATION SECTORS OF UKRAINE AND KHERSON REGION

*A number of industry sectors, such as the aerospace, military, or transportation industries create objects and systems of such complexity that working with them is only possible using mathematical modeling, due to the fact that the relatively simple project management functions are unable to take into account the vast number of details and information. The goal is to apply methods of mathematical modeling to concrete examples in the transportation industry in Ukraine and Kherson region in particular.*

*The research uses data obtained from annual state statistics publications. With the econometric analysis as base, production functions for the gross product and the transportation sectors of Ukraine and Kherson region are built. Linear additive and multiplicative power models are built, which determine the influence of labour and material expenditures on production volumes.*

*Based on the analysed data regarding the expenditures and the gross product across Ukraine and the Kherson region, production functions for the country, the region, and different economy sectors were built. Using correlation-regression analysis methods and the MS Excel editor, several regressive models of production functions were built: a linear additive model, and a multiplicative power function of the neoclassic type. As the multiplicative power model is more informative and fits more production function requirements, that type of model was chosen to build and analyse further production functions.*

*The analysis of built production functions shows that there are opportunities for expansion in the Kherson region as well as Ukraine as a whole, first of all by increasing the labour expenditures. For the Kherson region in particular, results show market oversaturation and a resulting inefficiency in the sector. This could be resolved by reducing volumes in the region, while the sector has room for expansion in the larger Ukraine.*

*The data obtained in this research may serve as basis for transport industry expansion projects, as well as projects aiming to optimise the transportation sector in the Kherson region and its further modernization using resources freed by pruning inefficient and redundant elements.*

*Keywords: econometric analysis, production functions, transportation sector.*

**Постановка проблеми**

У ряді галузей, включаючи такі, як авіаційно-космічна або оборонна промисловість, створювані об'єкти є настільки складними, що робота над ними можлива тільки за допомогою економіко-математичного моделювання [1], тому що відносно прості функції управління проектами не можуть урахувати досить велику кількість деталей і інформації. Попередній аналіз необхідний для того, щоб уникнути несподіванок на подальших етапах роботи над проектом і досягти результату найекономнішим способом. Дешевше призупинити неефективний проект на початку його реалізації, ніж наприкінці, коли ресурси витрачені, а результат неадекватний.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Для побудови виробничих функцій залежності сумарного валового продукту в цілому по області від капітальних витрат (сума матеріальних і амортизаційних видатків) і трудових витрат використані статистичні дані з 2006 по 2013 рік, засновані на офіційних даних, опублікованих у щорічниках статистичної інформації Головного управління статистики в Херсонській області [2–6].

**Мета дослідження**

У роботі виконані дослідження потенціалу й стану транспортної галузі України й Херсонської області, зокрема, – метою такого дослідження можуть бути рекомендації як до розширення галузі в областях, де її обсяг недостатній, так і скорочення її обсягів у перевантажених галузях.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

На підставі аналізу статистичних даних витрат і обсягу валової продукції по Україні й Херсонщині були побудовані виробничі функції для країни, регіону й окремих галузей економіки. У даній роботі представлені результати економіко-математичного моделювання за обсягом валової продукції в цілому по країні й регіону та по галузі транспорту й зв'язку Херсонської області й України.

З використанням методів кореляційно-регресійного аналізу за допомогою функції "ЛІНЕЙН" у редакторі MS Excel побудовано кілька регресійних моделей виробничих функцій: лінійну адитивну (взаємозаміщуючу) модель і мультиплікативну степеневу модель неокласичного типу, які дали найбільш високі показники коефіцієнта детермінації  $R^2$  і найменші значення середньквдратичної похибки регресії  $\sigma$ .

Функція "ЛІНЕЙН" розраховує рівняння лінійної регресії з використанням методу найменших квадратів, тобто розраховує параметри прямої лінії (або площини), які найкраще апроксимують статистичні дані.

Рівняння прямої (площини) функції, що обчислюється "ЛІНЕЙН", має вигляд (1):

$$Y = mX + b, \tag{1}$$

або  $Y = m_1X_1 + m_2X_2 + \dots + b$  (у випадку множинної регресії для багатofакторної статистики),

- де  $Y$  – залежна змінна, функція незалежних  $X_1, X_2 \dots$  ;
- $m$  – коефіцієнти, що відповідають кожній незалежній змінній;
- $b$  – вільний член.

Статистична модель адитивної лінійної виробничої функції для загального валового продукту Херсонської області має вигляд (2).

$$Y = -3230,416 + 0,543X_1 + 8,1278X_2; \tag{2}$$

$$R^2 = 0,987; \quad \sigma = 586,11.$$

На рис. 1 представлений графік, отриманої виробничої функції (2).

Коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,987$  свідчить, що на 98,7 % зміни значення обсягу валової продукції  $Y$  визначається зміною змінних  $X_1$  і  $X_2$ .

З рівняння (2) і рис. 1 випливає, що коефіцієнт при змінній  $X_2$  (трудові витрати) значно вище, ніж коефіцієнт при змінній  $X_1$  (капітальні витрати), тобто втрата однієї одиниці трудових витрат  $X_2$ , може бути скомпенсована збільшенням капітальних витрат  $X_1$  більш ніж на 8 одиниць.

На рис. 2. наочно видно ефект взаємозаміщення: щоб залишитися на тому ж рівні обсягу виробництва при порівняно невеликому зменшенні фактору  $X_2$  (трудові витрати) необхідно значно збільшити фактор  $X_1$  (капітальні витрати).

Для побудови мультиплікативної степеневі виробничої функції неокласичного типу:

$$B = a_0 X_1^{a_1} X_2^{a_2} \tag{3}$$

необхідно виконати лінеаризацію (логарифмуванням рівняння (2)):  $\ln Y = \ln a_0 + a_1 \ln X_1 + a_2 X_2$ .

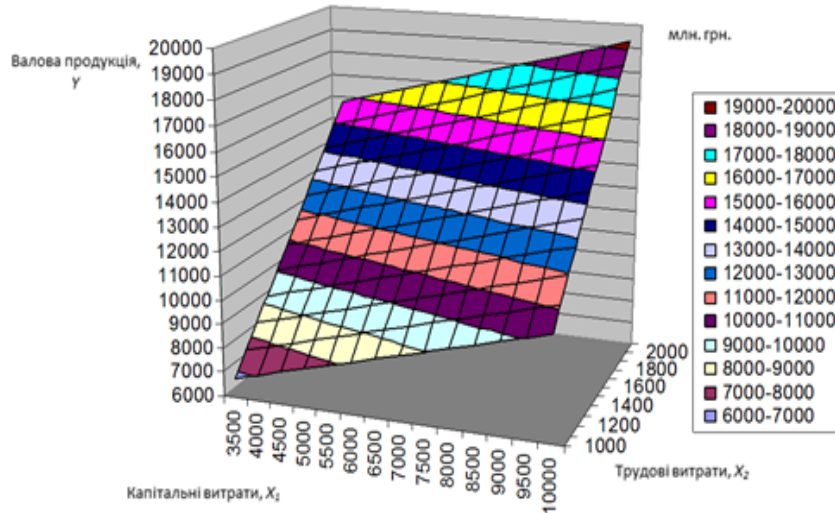


Рис. 1. Графік виробничої функції (2)

На рис. 2 представлені лінії рівня адитивної лінійної виробничої функції виду (2).

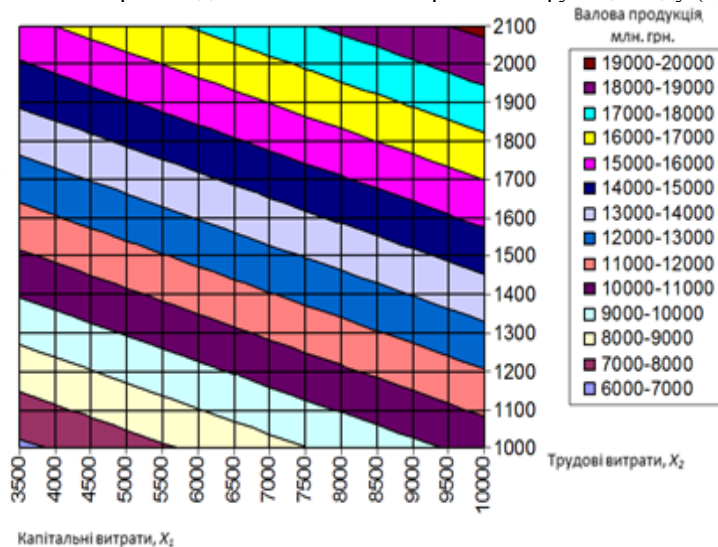


Рис. 2. Лінії рівня адитивної лінійної виробничої функції виду (2)

На рис. 3 представлений графік отриманої мультиплікативної виробничої функції, рівняння якої має вигляд (4):

$$Y = \exp(-0,4417) X_1^{0,2361} X_2^{1,0651}; \tag{4}$$

$$R^2 = 0,985; \quad \sigma = 651.$$

Коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,985$  свідчить, що на 98,5 % зміни значення обсягу валової продукції  $Y$  визначається зміною змінних  $X_1$  і  $X_2$ .

На рис. 4 представлені лінії рівня мультиплікативної степеневі виробничої функції виду (4).

З рівняння (4) випливає, що коефіцієнт еластичності змінної  $X_2$  (трудові витрати) в 4,5 раз більше, ніж коефіцієнт еластичності змінної  $X_1$  (капітальні витрати) (відповідно 1,065 і 0,2361), тобто збільшення трудових витрат на 1% збільшить валовий продукт на 1,06 %, у той час як збільшення капітальних витрат на 1% дасть збільшення валового продукту всього лише на 0,24 %. Таким чином, фактор  $X_2$  значно ефективніше, ніж фактор  $X_1$ .

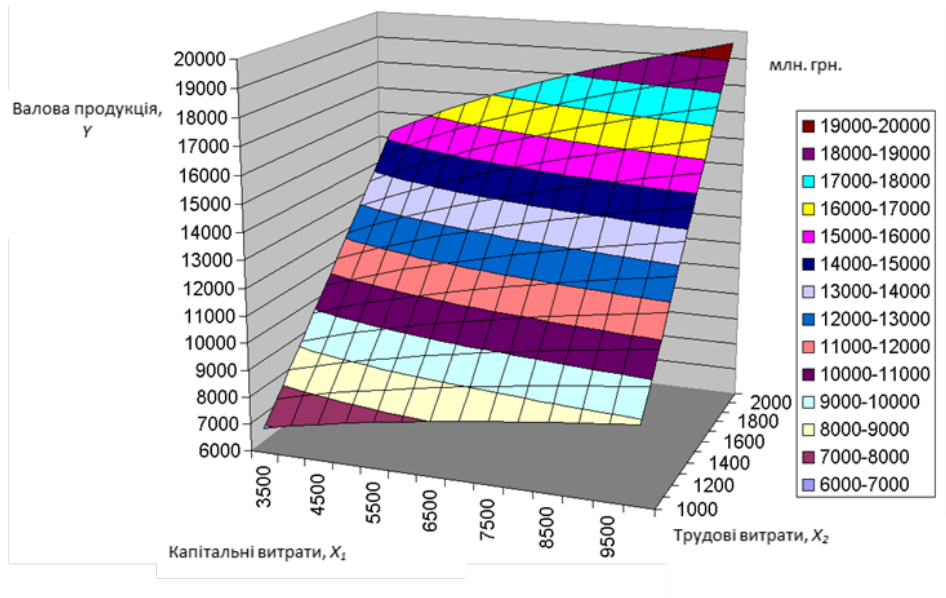


Рис. 3. Графік отриманої мультиплікативної виробничої функції (4)

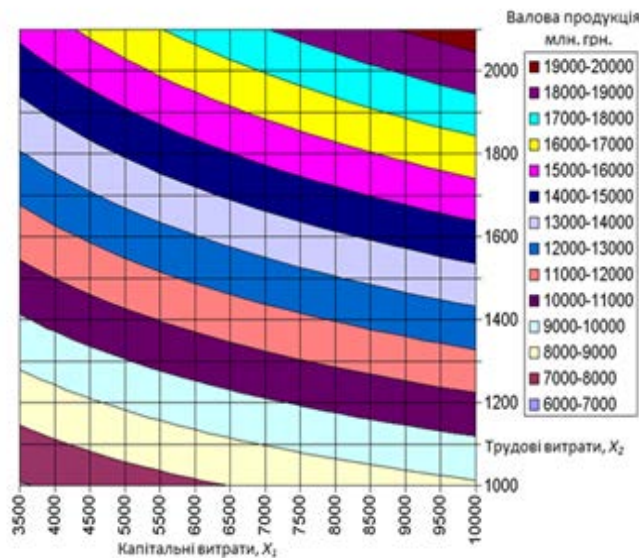


Рис. 4. Лінії рівня мультиплікативної степеневі виробничої функції виду (4)

Сума коефіцієнтів еластичності дорівнює 1,296, що говорить про зростаючий ефект від масштабу виробництва. Це означає, що в цьому випадку виробництво має сенс розширювати (насамперед, природно, за рахунок збільшення фактору  $X_2$ , як більш діючого важеля управління), тому що збільшення виробничих факторів на 1% дає віддачу на 1,3%.

Оскільки мультиплікативна степенева модель більш інформативна й задовольняє більшій кількості вимог, пропонувані до виробничих функцій, для побудови й аналізу наступних виробничих функцій була обрана саме модель такого виду.

Для порівняння впливу виробничих факторів на обсяг валової продукції також побудована мультиплікативна модель виробничої функції валового продукту України.



Для побудови виробничих функцій сумарного валового продукту в цілому по країні від капітальних витрат (сума матеріальних і амортизаційних видатків) і трудових витрат використані дані з офіційних щорічників статистичної інформації Державного комітету статистики України [4–5].

На рис. 5 представлений графік отриманої мультиплікативної виробничої функції, рівняння якої має вигляд (5):

$$Y = \exp(0,0578)X_1^{-0,1146}X_2^{1,2651}; \quad (5)$$

$$R^2 = 0,999; \quad \sigma = 8212,7.$$

Коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,999$  свідчить, що на 99,9 % зміни значення обсягу валової продукції  $Y$  визначається зміною змінних  $X_1$  і  $X_2$ .

З рівняння (5) випливає, що коефіцієнт еластичності змінної  $X_2$  – трудові витрати (1,2651), а коефіцієнт еластичності змінної  $X_1$  – капітальні витрати (-0,1146), тобто збільшення трудових витрат на 1% збільшить валовий продукт на 1,26 %, у той час як збільшення капітальних витрат на 1% приведе до зниження обсягу валового продукту на 0,1146 %. Тобто, збільшення фактору  $X_2$  ефективно впливає на зростання обсягу виробництва, а збільшення фактору  $X_1$  – негативно впливає на обсяг виробництва.

Сума коефіцієнтів еластичності дорівнює 1,15, що говорить про зростаючий ефект від масштабу виробництва. Це означає, що в цьому випадку виробництво має сенс розширювати (насамперед, природно, за рахунок збільшення фактору  $X_2$ ), тому що збільшення виробничих факторів на 1% дає віддачу в 1,15%.

Якщо порівнювати виробничі функції валової продукції Херсонщини й України, можна зробити висновок, що виробництво має сенс розширювати за рахунок збільшення трудових ресурсів. Також розширення виробництва в цій галузі Херсонської області можливо й за рахунок збільшення капітальних витрат, хоч і з меншою ефективністю, але для валового продукту України збільшення цього фактору негативно позначиться на його обсязі.

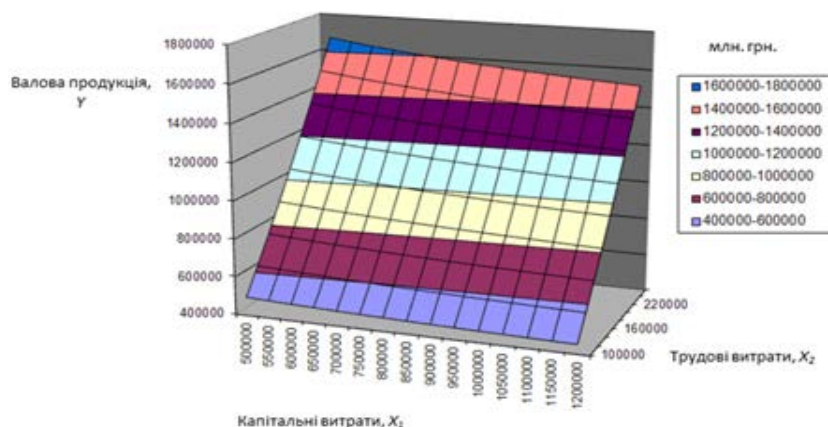


Рис. 5. Графік отриманої мультиплікативної виробничої функції (5)

У роботі були побудовані мультиплікативні виробничі функції валового продукту для галузі транспорту й зв'язку по Херсонській області й Україні. [1-6].

На рис. 6. представлений графік отриманої мультиплікативної виробничої функції, рівняння якої має вигляд (6):

$$Y = \exp(3,4926)X_1^{0,3253}X_2^{0,4855}; \quad (6)$$

$$R^2 = 0,941; \quad \sigma = 60,5.$$

Коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,941$  свідчить, що на 94,1 % зміни значення обсягу валової продукції  $Y$  визначається зміною змінних  $X_1$  і  $X_2$ .

З рівняння (6) випливає, що коефіцієнт еластичності змінної  $X_2$  (трудоі витрати) в 1,5 рази більше, ніж коефіцієнт еластичності змінної  $X_1$  (капітальні витрати) (відповідно 0,4855 і 0,3253), тобто збільшення трудових витрат на 1% збільшить валовий продукт на 0,4855 %, у той час як збільшення

капітальних витрат на 1% дасть збільшення валового продукту на 0,3253 %, тобто, фактор  $X_2$  ефективніше, чим фактор  $X_1$ .

Сума коефіцієнтів еластичності дорівнює 0,81, що говорить про спадаючий ефект від масштабу виробництва. Це означає, що в цьому випадку виробництво нема рації розширювати, більше того, воно є дещо надлишковим і його необхідно трохи скоротити, тому що збільшення виробничих факторів на 1% дає віддачу всього лише в 0,81%, тобто вкладення матеріальних і трудових ресурсів не окупаються належною мірою.

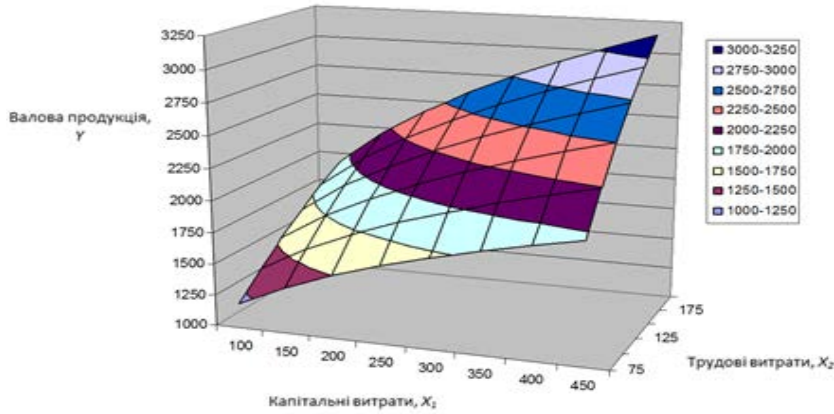


Рис. 6. Графік мультиплікативної виробничої функції (6)

На рис. 7. представлені лінії рівня мультиплікативної степеневі виробничої функції виду (6)

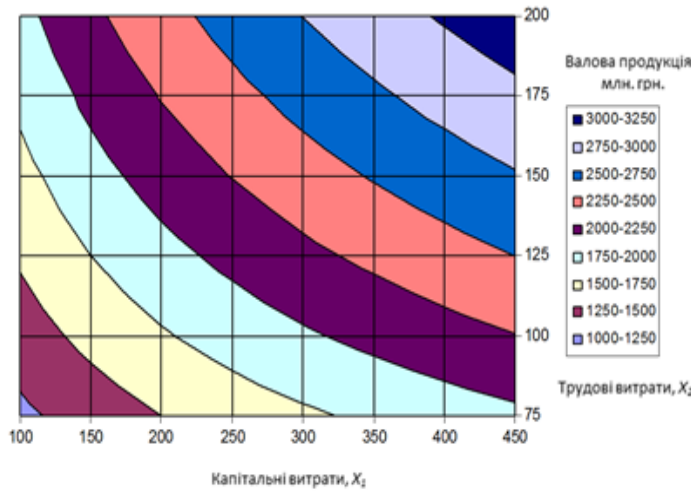


Рис. 7. Лінії рівня мультиплікативної степеневі виробничої функції виду (6)

Також для побудови виробничої функції валового продукту галузі транспорту й зв'язку України був проведений статистичний аналіз відповідних даних [4–5].

На рис. 8. представлений графік отриманої мультиплікативної виробничої функції, рівняння якої має вигляд (7):

$$Y = \exp(2,362821)X_1^{-2,3994} X_2^{3,4778} ; \tag{7}$$

$$R^2 = 0,987 ; \quad \sigma = 1402,24 .$$

Коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,987$  свідчить, що на 98,7 % зміни значення обсягу валової продукції  $Y$  визначається зміною змінних  $X_1$  і  $X_2$ .

З рівняння (7) випливає, що коефіцієнт еластичності змінної  $X_2$  – трудові витрати (3,4778), коефіцієнт еластичності змінної  $X_1$  капітальні витрати (- 2,3994), тобто збільшення капітальних витрат на

1% знизить обсяг валового продукту на 2,399 %, у той час як збільшення трудових витрат на 1% дасть збільшення валового продукту на 3,478 %.

Сума коефіцієнтів еластичності рівна 1,078, що говорить про нейтральний (або дуже слабо зростаючий) ефект від масштабу виробництва. Це означає, що в цьому випадку виробництво якщо і має сенс розширювати, то насамперед за рахунок збільшення фактору  $X_2$ , як більш дієвого важеля управління.

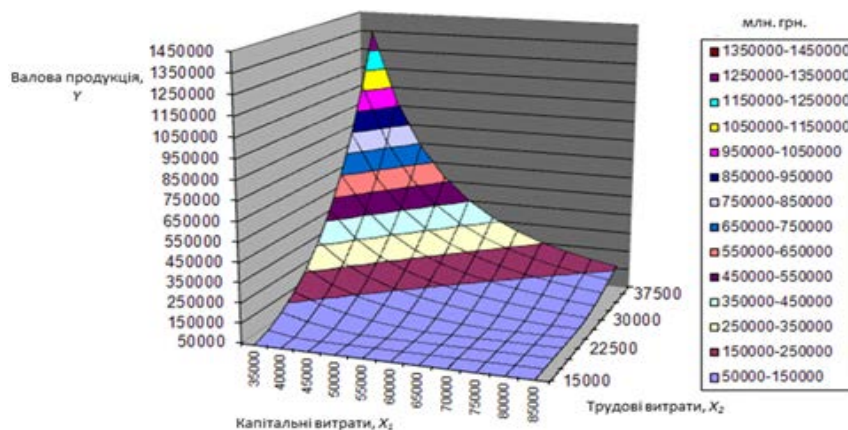


Рис. 8. Графік мультиплікативної виробничої функції (7)

### Висновки

Порівняння виробничих функцій галузі транспорту й зв'язку Херсонської області й України показує, що нарощувати обсяг виробництва галузі має сенс у цілому по країні. У той час як для даної галузі Херсонщини має сенс трохи скоротити обсяги виробництва.

У результаті аналізу побудованих функцій і графіків встановлено, що в Херсонській області, як і в цілому й по Україні, є потенціал для розширення обсягів виробництва, (насамперед за рахунок збільшення трудових витрат), тому що сума коефіцієнтів еластичності змінюваних факторів (капітальних і трудових витрат) більше 1. При цьому в галузі транспорту й зв'язку Херсонського регіону слід трохи знизити обсяги виробництва (наданих послуг), у зв'язку з тим, що сума коефіцієнтів еластичності аналогічних факторів менше 1, що говорить про перенасичення ринку й деякої надмірності (надлишковості) цієї галузі виробництва в регіоні. При цьому в рамках України нарощування обсягів виробництва в даній галузі доцільно провадити за рахунок збільшення трудових витрат.

### Список використаної літератури

1. Кубонива М. Математична економіка на персональному комп'ютері / М. Кубонива, М. Табата, С. Табата, Ю. Хасебе. Під ред. М. Кубонива - [перекл. з япон. Д.М. Демченко, І.В. Белова] – М.: Фінанси й статистика, 1991. – 304 с.
2. Статистичний щорічник Херсонської області за 2007 рік: [стат. збірн. / за ред. Вознюка В.А.] – Херсон, 2008. – 512 с.
3. Статистичний щорічник Херсонської області за 2009 рік: [стат. збірн. / за ред. Вознюка В.А.] – Херсон, 2010. – 509 с.
4. Статистичний щорічник Херсонської області за 2011 рік: [стат. збірн. / за ред. Вознюка В.А.] – Херсон, 2012. – 524 с.
5. Статистичний щорічник України за 2007рік: [стат. збірн./за ред. Осауленко О.Г.] – Київ, 2008. – 573 с.
6. Статистичний щорічник України за 2009рік: [стат. збірн./за ред. Осауленко О.Г.] – Київ, 2010. – 573 с.
7. Статистичний щорічник України за 2011рік: [стат. збірн./за ред. Осауленко О.Г.] – Київ, 2012. – 568 с.

УДК 532.5

Ю.В. БРАЗАЛУК, Д.В. ЄВДОКИМОВ, А.А. КОЧУБЕЙ, Р.А. ШУЛЬГА  
Днепровский национальный университет имени Олеса Гончара**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ  
ПУАЗЕЙЛЯ В КАНАЛАХ СЛОЖНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ**

*Течение Пуазейля – ламинарное течение вязкой жидкости в трубах и каналах постоянного поперечного сечения – является простейшей и наиболее изученной математической моделью динамики вязкой жидкости, однако очень широкое распространение такого рода течений в современной технике заставляет совершенствовать методы расчета рассматриваемого класса движений жидкости. В последние годы исключительно актуальными в различных областях техники стали течения Пуазейля в каналах сложного, многосвязного поперечного сечения, для исследования которых следует прибегать к численным методам. В настоящей работе рассмотрены математические и вычислительные аспекты применения к указанному классу течений метода граничных элементов. Использовались как традиционные, так и разработанные авторами алгоритмы данного метода. Полученные результаты могут быть использованы в гидротехнике, энергетике, транспортном машиностроении, металлургической и химической промышленности.*

*Ключевые слова: течение Пуазейля, метод граничных элементов, уравнение Пуассона, сопротивление трения, профиль скорости.*

Ю.В. БРАЗАЛУК, Д.В. ЄВДОКИМОВ, О.О. КОЧУБЕЙ, Р.О. ШУЛЬГА  
Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТЕЧІЇ ПУАЗЕЙЛЯ В  
КАНАЛАХ СКЛАДНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ**

*Течія Пуазейля – ламінарна течія в'язкої рідини в трубах і каналах постійного поперечного перерізу – є найпростішою і найбільш вивченою математичною моделлю динаміки в'язкої рідини, проте дуже широке поширення такого роду течій в сучасній техніці змушує удосконалювати методи розрахунку даного класу рухів рідини. В останні роки виключно актуальними в різних областях техніки стали течії Пуазейля в каналах складного, багатоз'язного поперечного перерізу, для дослідження яких слід вдаватися до чисельних методів. У даній роботі розглянуто математичні та обчислювальні аспекти застосування методу граничних елементів до зазначеного класу течій. Використовувалися як традиційні, так і розроблені авторами алгоритми даного методу. Отримані результати можуть бути використані в гідротехніці, енергетиці, транспортному машинобудуванні, металургійній та хімічній промисловостях.*

*Ключові слова: течія Пуазейля, метод граничних елементів, рівняння Пуассона, опір тертя, профіль швидкості.*

Yu. V. BRAZALUK, D. V. YEVDOKYMOV, O. O. KOCHUBEY, R. O. SHULHA  
Oles Honchar Dnipro National University**APPLICATION OF THE BOUNDARY ELEMENT METHOD FOR CALCULATION OF THE  
POISEUILLE FLOW IN THE CHANNELS OF A COMPLEX CROSS-SECTION**

*Poiseuille flow, that is a steady-state laminar flow of viscous fluid in pipes or channels of constant cross-section in longitudinal direction belongs to the most wide-spread in modern engineering practice. In the same time, the mathematical model of Poiseuille flow, that is Dirichlet problem for Poisson equation, formulated in cross-section of the channel, is linear and quite simple in comparison with mathematical models of other flows. It was managed to obtain enough simple analytical solution of Poiseuille flow problem for channels of canonical geometrical shape of cross-sections (circular, elliptical, rectangular, and annular) using the mentioned mathematical model. These solutions are included in numerous text-books on fluid mechanics and hydraulics and became commonly known. However development of modern techniques and technologies stimulated by different reasons often forces to resort to channels of non-canonical cross-section shape. Nevertheless a mathematical model of Poiseuille flow saves its simplicity for such channels, enough sophisticated shape of the solution domain leads to sufficient computational difficulties. To overcome the mentioned difficulties, boundary element method was applied as in traditional algorithmical form, as computational schemes proposed by the authors of the present work. Application of boundary element method provides effective calculations of Poiseuille flow in channel of sophisticated cross-section shapes, beside of that, it gives an opportunity to develop effective computational tricks for qualitative and quantitative analysis of Poiseuille flows. The computational approach proposed here is easy for integration with existing and newly developing software on the base of boundary element method. An effectiveness of the proposed approach is shown on numerical solutions of illustrative test problems and accuracy of the obtained*

*numerical solutions were analyzed using the special technique, proposed in the previous works of the authors of the present paper. Computational schemes and numerical techniques developed in the present investigation can be used in hydraulic engineering, power engineering, and transport engineering, metallurgical and chemical industries.*

*Keywords: Poiseuille flow, boundary element method, Poisson equation, frictional resistance, velocity profile.*

### Постановка проблеми

В настоящее время во многих областях современной техники и технологий появилась тенденция проектных решений, предполагающих, что трубы, кабеля и другие протяженные конструкции помещаются в каналы, по которым протекает жидкость, например, машинное масло. Протяженные конструкции образуют в этих каналах весьма сложное поперечное сечение. Расчет даже простейшего ламинарного течения, называемого течением Пуазейля, в каналах такого сечения представляет собой нетривиальную вычислительную проблему. Однако потребности практики вынуждают разрабатывать методы анализа течений Пуазейля во все более сложных каналах. Одним из наиболее эффективных инструментов решения линейных краевых задач эллиптического типа в областях сложной геометрической формы является метод граничных элементов, поэтому представляется вполне естественным, что этот метод окажется удобным и для расчета течений Пуазейля, но в то же время, как и при применении любого нового численного метода, при использовании вышеназванного метода граничных элементов возникают множественные вопросы методологического характера и необходимость изучения вычислительных аспектов предложенного подхода, чему, вообще говоря, и посвящена настоящая работа. Актуальность подобного рода исследования определяется исключительной важностью вычислительного расчета течений Пуазейля для многочисленных областей и направлений развития современной науки и техники, в частности, гидротехники, энергетики (особенно для расчетов трубных теплообменников), транспортного машиностроения и ракетно-космической техники, металлургической и химической промышленности.

Классическое течение Пуазейля – установившееся ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе постоянного поперечного течения – является одним из наиболее изученных в современной гидромеханике течений. Для случаев трубы кругового поперечного сечения для течения Пуазейля построены исключительно простые аналитические решения в квадратурах. Для других канонических форм поперечных сечений аналогичные решения будут уже не столь просты, однако также могут быть построены аналитическими методами в форме, удобной для дальнейшего практического исследования. Разумеется, что в последнем случае наряду с аналитическими методами решения могут быть использованы и численные подходы, легко реализуемые в областях канонической геометрической формы. Однако потребности практики на современном уровне развития науки и техники заставляют рассматривать течение Пуазейля в областях, где геометрическая форма весьма далека от канонической, в том числе, в многосвязных областях, содержащих многочисленные замкнутые включения. Для такого рода областей вопрос об эффективности исследования аналитических методов решения краевых задач для уравнения Пуассона, описывающих течение Пуазейля, не стоит вовсе, а применение численных методов вызывает весьма заметные трудности. Упомянутые трудности относятся к одной из основных проблем современной вычислительной математики [1] – решение краевых задач в областях сложной геометрической формы – и зачастую приводят к невозможности эффективно применять для численного расчета традиционные численные подходы – методы конечных элементов и конечных разностей. Как отмечалось в той же работе [1], в подобных случаях следует прибегать к так называемым альтернативным методам, наиболее известный из которых – метод граничных элементов – относится к вычислительной теории потенциала и позволяет локализовать решение линейных краевых задач эллиптического типа на границе области решения, что, безусловно, дает возможность экономить вычислительные ресурсы на построении и обработке расчетных сеток внутри области решения. Не останавливаясь подробно на достоинствах и недостатках метода граничных элементов как вычислительного инструмента, отметим только исключительно высокую точность этого подхода, что является следствием отказа в данном методе от численного дифференцирования в пользу численного интегрирования. Хотя идея применения метода граничных элементов для расчета течений Пуазейля отнюдь не нова, многие вычислительные аспекты этого подхода, связанные, в первую очередь, с течениями Пуазейля в каналах, экстремально сложных по форме сечений, до настоящего времени остаются неизученными. Так, например, в каналах сложного сечения зачастую возникает необходимость в качественном и количественном анализе внутренней структуры релевантного течения, что не было сделано и не может быть сделано с помощью традиционных инструментов граничноэлементного анализа. Таким образом, проблема, рассматриваемая в настоящей работе, состоит не столько в применении метода граничных элементов для расчета течения Пуазейля, что может быть сделано при помощи традиционных для этого метода алгоритмов, сколько в совершенствовании алгоритмических схем данного метода для рассматриваемого класса задач, повышении его вычислительной эффективности, создании инструментария качественного и количественного анализа полученных решений, а также рассмотрении ряда непосредственно связанных с этой проблематикой методологических вопросов.

### Анализ последних исследований и публикаций

Как отмечалось выше, течение Пуазейля является общеизвестной физической и математической моделью классической гидромеханики, которая для случая течений в трубах канонического поперечного сечения, особенно круглых трубах, весьма тщательно исследована как экспериментально, так и теоретически, а результаты этих исследований нашли применение в обширнейшей инженерно-технической практике. Не удивительно, что течение Пуазейля вошло как неотъемлемая часть в классические и современные учебники по гидромеханике [2–4]. Интенсивное применение течений в трубах и каналах постоянного поперечного сечения в самых разных областях современной науки и техники поддерживает не уменьшающийся интерес исследователей к этому классу течений [5–9]. Однако, возникшая в последнее время тенденция применять в технических устройствах каналы, вообще говоря, произвольного сечения, содержащие внутри себя трубы, кабели и другие протяженные объекты, не нашла в специальной литературе сколько-нибудь удовлетворительного отражения из-за возникающих в таких задачах вычислительных трудностей (о характере этих трудностей уже было сказано выше). Идея применения метода граничных элементов [10–11] для расчета течения Пуазейля достаточно давно и широко известна [5–9], но до сих пор отсутствуют работы, посвященные применению этого метода в случаях предельно сложных, многосвязных сечений каналов. Более того, авторы настоящей работы в последние годы сталкивались с попытками расчета течений Пуазейля на основе универсальных гидродинамических пакетов прикладных программ, что, безусловно, крайне затратно, неэффективно и нерационально. Вследствие исключительно широкого распространения течений Пуазейля в современной технике, расчеты таких течений проводятся многократно с различными инженерно-техническими целями в самых разнообразных организациях. Поэтому разработка высокоэффективного метода решения подобного рода задач, учитывающих сравнительную простоту математической модели данного течения, сулит немалые преимущества благодаря сокращению времени расчета по сравнению с универсальными численными методами, повышению точности расчета по сравнению с теми же методами, автоматизации анализа и существенного сокращения трудозатрат на него по сравнению с аналитическими методами, существенному расширению спектра эффективно решаемых задач по сравнению как с универсальными численными, так и с аналитическими методами. Перечисленные преимущества, обеспечиваемые рациональным выбором расчетного подхода, очевидно, будут иметь не только научно-технический, но и заметный экономический эффект.

Со времени появления классического метода граничных элементов, то есть, конца семидесятых – середины восьмидесятых годов прошлого века, итогом которого можно считать выход монографий [10–11], рассматриваемый метод претерпел множество изменений и усовершенствований, основные тенденции которых отражены в работе [12]. Ряд исследований, в том числе разработки авторов настоящей статьи, были направлены на повышение эффективности применяемого вычислительного аппарата, в частности, в работах [13–14] были предложены алгоритмы метода граничных элементов с точками коллокации вне актуальной границы области (регулярный метод) и интегрированием по реальной (не аппроксимированной) границе, что позволяет значительно повысить точность вычислений. В работе [15] был предложен эффективный итерационный алгоритм, позволяющий в рамках одной расчетной схемы метода граничных элементов использовать численные и аналитические решения частных задач гидродинамики. Наконец, точность полученных численных результатов в работе [16] предложено оценивать по специально разработанной методике, основанной на анализе результатов численного решения специально подобранных тестовых задач, имеющих аналитические решения в квадратурах, что, безусловно, повышает достоверность полученных результатов.

### Цель исследования

Как всякая комплексная работа, настоящая статья преследует несколько разноплановых целей, основной из которых является обобщение математической модели и расчетных схем для течения Пуазейля на случай труб и каналов со сложным поперечным сечением. Достижение указанной общей цели невозможно без реализации ряда частных целей и решения связанных с ними специальных задач. К таковым относятся, во-первых, разработка эффективного алгоритма расчета течения Пуазейля в канале сложного поперечного сечения, доказательная демонстрация его точности и экономичности, во-вторых, разработки научно-методических основ качественного и количественного анализа полученных численных решений задач о течении Пуазейля, в-третьих, анализ путей практического применения полученных результатов расчета течения Пуазейля и разработанных методик его анализа.

### Изложение основного материала исследования

**Математическая постановка задачи.** Поскольку течение Пуазейля общеизвестно в современной гидромеханике [2–4], не будем здесь останавливаться на выводе соответствующих уравнений и анализе полученных аналитических решений, но, дабы избежать терминологической путаницы, будем придерживаться системы обозначений и терминов, принятой в монографии [3]. Течение Пуазейля описывается следующим уравнением Пуассона в декартовой ортогональной системе координат, оси  $Ox$ ,  $Oy$  которой параллельны поперечному сечению цилиндра, а ось  $Oz$  направлена параллельно образующей цилиндра:

$$\mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (1)$$

где, как обычно,  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости,  $w$  – скорость жидкости в направлении оси  $Oz$ ,  $p$  – давление. При этом в течении Пуазейля компоненты скорости жидкости, параллельные поперечному сечению полагаются нулевыми, и

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \frac{\partial p}{\partial z} = const. \quad (2)$$

Дополним уравнение (1) граничными условиями Дирихле:

$$w|_{\Gamma} = 0, \quad (3)$$

где  $\Gamma$  – общая граница течения в поперечном сечении. При дальнейших рассуждениях величина  $\frac{\partial p}{\partial z}$  полагается заданной, если не указано обратное, и из уравнения баланса сил [3]:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu \int_{\Gamma} \frac{\partial w}{\partial n} dS. \quad (4)$$

Как отмечалось выше, задача (1)–(3) с дополнительными соотношениями (4) легко решается для простейших форм поперечного сечения, в частности, для круга, где для этой задачи получены простые аналитические решения в квадратурах. В настоящей же работе будет рассмотрен случай сложной многосвязной области, где

$$\Gamma = \bigcup_{i=1}^n \Gamma_i, \quad (5)$$

где  $\Gamma_i$  – замкнутые, непересекающиеся контура.

**Метод решения.** Введем функцию  $u_0$ , такую, что

$$\Delta u_0 = 1, \quad (6)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа. Тогда функция  $\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} u_0$  является частным решением уравнения (1), то есть, функция

$$u = w - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} u_0 \quad (7)$$

будет удовлетворять уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \quad (8)$$

с граничными условиями

$$u|_{\Gamma} = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} u_0. \quad (9)$$

В математической физике показано, что уравнению (6) удовлетворяет бесконечное число функций, однако здесь желательно было бы использовать функцию  $u_0$ , имеющую наиболее простой и удобный для вычислений вид, например

$$u_0(x, y) = \frac{x^2 + y^2}{4}. \quad (10)$$

Применим к краевой задаче (8), (9) традиционную методику теории потенциала для уравнения Лапласа [10–11]:

$$c(x_0, y_0)u(x_0, y_0) = \int_{\Gamma} g(x, x_0, y, y_0) \frac{\partial u}{\partial n}(x, y) dS(x, y) - \int_{\Gamma} u(x, y) \frac{\partial g(x, x_0, y, y_0)}{\partial n(x, y)} dS(x, y), \quad (11)$$

где  $c$  – функция расположения точки  $(x_0, y_0)$  относительно области течения  $D$  и ее границы  $\Gamma$ , определяемая для гладкой границы  $\Gamma$  следующим образом:



$$c(x_0, y_0) = \begin{cases} 1, & (x_0, y_0) \in D; \\ 1/2, & (x_0, y_0) \in \Gamma; \\ 0, & (x_0, y_0) \notin D, (x_0, y_0) \notin \Gamma, \end{cases} \quad (12)$$

точка  $(x_0, y_0)$  називається точкою спостереження і в даному випадку грає роль точки коллокації, точка  $(x, y)$  називається точкою джерела; в якості функції  $g(x, x_0, y, y_0)$  можна використовувати або фундаментальне рішення рівняння Лапласа в плоскому випадку  $\varphi_0$

$$\varphi_0(x, x_0, y, y_0) = -\frac{1}{2\pi} \ln \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}, \quad (13)$$

або деяку функцію Грина, в даному випадку задачі Дирихле для рівняння Лапласа, але вибір між цими варіантами повинен бути зроблений після аналізу конкретної конфігурації області рішення, хоча зазвичай віддають перевагу універсальному виразу (13).

Розіб'ємо границю області рішення  $\Gamma$  деяким чином на частини  $\Gamma_k$ , які ми будемо називати граничними елементами, і апроксимуємо на кожному з них невідому функцію  $\frac{\partial u}{\partial n}$  деякою наперед заданою пробною функцією, позначеною тут через  $\left(\frac{\partial u}{\partial n}\right)_k$ . Функція  $\left(\frac{\partial u}{\partial n}\right)_k$  включає деякі, підлягають визначенню довільно, для знаходження яких потребуємо виконання рівняння (11) в заданому числі точок коллокації  $(x_{0m}, y_{0m})$ . Простоти ради, тут і далі будемо вважати, що число невідомих довільних і заданих точок коллокації рівно числу граничних елементів  $K$ , тобто, функція  $\left(\frac{\partial u}{\partial n}\right)_k$  на граничному елементі є постійною (метод граничних елементів нульового порядку точності). Звернемо увагу, що в залежності від розташування точок коллокації на границі або поза нею, форма граничного елемента повинна апроксимуватися, наприклад, відрізком прямої, або може не апроксимуватися, що дещо складніше в обчислювальному плані, але дає помітний вигоду в точності [13–14]. Тоді

$$c(x_{0m}, y_{0m})u(x_{0m}, y_{0m}) = \sum_{k=1}^K \left(\frac{\partial u}{\partial n}\right)_k \int_{\Gamma_k} g(x, x_{0m}, y, y_{0m}) \frac{\partial u}{\partial n}(x, y) dS(x, y) - \int_{\Gamma} u(x, y) \frac{\partial g(x, x_{0m}, y, y_{0m})}{\partial n(x, y)} dS(x, y). \quad (14)$$

Вираз (14) є не дуже традиційним для методу граничних елементів, оскільки останній інтеграл в правій частині не замінений сумою по граничним елементам з апроксимацією функції  $u(x, y)$ , але в даному випадку це не обов'язково в залежності від форми області рішення. Вираз (14) представляє собою (після обчислення необхідних інтегралів) систему лінійних алгебраїчних рівнянь стосовно невідомих  $\left(\frac{\partial u}{\partial n}\right)_k$ . В результаті рішення цієї системи отримаємо значення  $\left(\frac{\partial u}{\partial n}\right)_k$ , тобто, з точки зору теорії потенціалу, задача буде вирішена повністю, так як, використовуючи вираз (14), рішення може бути приблизно обчислено в будь-якій точці всередині області рішення.

**Аналіз отриманих результатів.** Згідно з виразами (7):

$$w(x, y) = u(x, y) + \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} u_0. \quad (15)$$

Для практичних цілей інтерес представляє розподіл швидкості  $w$  по області  $D$ , в частині, знаходження локальних і глобальних максимумів швидкості  $w$ , і витрати рідини через переріз каналу.

Знайдемо локальні екстремуми функції  $w$  градієнтним методом, для цього візьмемо на границі  $\Gamma$  достатньо репрезентативну множину точок, наприклад, середини граничних елементів, і з кожної, з вибраних точок, з достатньо малим кроком в напрямку градієнта функції  $w$  побудуємо нову точку і



так далее, пока не будет достигнут максимум, где, как известно, градиент равен нулю (в численной процедуре достаточно мал). Для определения  $grad w = \left( \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y} \right)$  продифференцируем равенство (15) и в силу определения (10) получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial x} &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{x}{2}, \\ \frac{\partial w}{\partial y} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{y}{2}, \end{aligned} \tag{16}$$

а значения  $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}$  найдем, почленно продифференцировав основное соотношение теории потенциала (11).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x_0}(x_0, y_0) &= \int_{\Gamma} \frac{\partial g(x, x_0, y, y_0)}{\partial x_0} \frac{\partial u}{\partial n}(x, y) dS(x, y) - \int_{\Gamma} u(x, y) \frac{\partial^2 g(x, x_0, y, y_0)}{\partial x_0 \partial n} dS(x, y), \\ \frac{\partial u}{\partial y_0}(x_0, y_0) &= \int_{\Gamma} \frac{\partial g(x, x_0, y, y_0)}{\partial y_0} \frac{\partial u}{\partial n}(x, y) dS(x, y) - \int_{\Gamma} u(x, y) \frac{\partial^2 g(x, x_0, y, y_0)}{\partial y_0 \partial n} dS(x, y), \end{aligned} \tag{17}$$

где внутри области  $D$  дифференцирование по  $x_0, y_0$  как по параметрам, всегда может быть выполнено без потери сходимости интегралов. На границе  $\Gamma$  этот вопрос несколько сложнее, но точка  $(x_0, y_0)$  всегда может быть смещена на малое расстояние внутрь области решения  $D$ , где формально указанные проблемы отсутствуют.

Построив таким образом множество кривых, идущих от границы к локальным экстремумам скорости, получим не только положение локальных экстремумов, но и удобную визуализацию поля течения. Если же указанную визуализацию дополнить построением линий равных значений функции  $w$ , что тоже делается с помощью формул (16), то визуализация поля течения станет практически исчерпывающей.

В силу соотношений (4) и (7):

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu \int_{\Gamma} \frac{\partial w}{\partial n} dS = \mu \int_{\Gamma} \left( \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial u_0}{\partial n} \right) dS = \frac{\partial p}{\partial z} \int_{\Gamma} \frac{\partial u_0}{\partial n} dS + \mu \int_{\Gamma} \frac{\partial u}{\partial n} dp, \tag{18}$$

откуда

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu \int_{\Gamma} \frac{\partial u}{\partial n} dS \left/ \left( 1 - \int_{\Gamma} \frac{\partial u_0}{\partial n} dS \right) \right. \tag{19}$$

Из соотношения (19) следует еще одно требование к выбору функции  $u_0$ :

$$\int_{\Gamma} \frac{\partial u_0}{\partial n} dS \neq 1, \tag{20}$$

но, поскольку кривая  $\Gamma$  практически произвольная, то невыполнение условия (20) следует считать редким случаем, легко устранимым изменением функции  $u_0$ .

Наконец, найдем расход жидкости  $Q$  через поперечное сечение  $D$ :

$$\begin{aligned} Q &= \iint_D w dx dy = \iint_D w \left( \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} \right) dx dy = \\ &= \iint_D \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( w \frac{\partial u_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( w \frac{\partial u_0}{\partial y} \right) - \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u_0}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u_0}{\partial y} \right] dx dy = \int_{\Gamma} w \frac{\partial u_0}{\partial n} dS - \\ &- \iint_D \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( u_0 \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( u_0 \frac{\partial w}{\partial y} \right) - u_0 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right] dx dy = \\ &= \int_{\Gamma} w \frac{\partial u_0}{\partial n} dS - \int_{\Gamma} u_0 \frac{\partial w}{\partial n} dS + \iint_D u_0 \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} dx dy, \end{aligned} \tag{21}$$

где первый интеграл в правой части (21) равен 0 в силу условия (3), второй интеграл в силу (7)

$$\int_{\Gamma} u_0 \frac{\partial w}{\partial n} dS = \int_{\Gamma} u_0 \left( \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial u_0}{\partial n} \right) dS = \int_{\Gamma} u_0 \frac{\partial u}{\partial n} dS + \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \int_{\Gamma} u_0 \frac{\partial u_0}{\partial n} dS. \quad (22)$$

И последний интеграл в (21)

$$\iint_D u_0 \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} dx dy = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \iint_D u_0 dx dy, \quad (23)$$

введем векторную функцию  $A$  такую, что

$$\operatorname{div} A = u_0, \quad (24)$$

например, с учетом (10)

$$A = \left\{ \int u_0 dx, \int u_0 dy \right\} = \left\{ \left( \frac{x^3}{12} + \frac{xy^2}{4} \right); \left( \frac{x^2y}{4} + \frac{y^3}{12} \right) \right\}, \quad (25)$$

тогда

$$\iint_D u_0 \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} dx dy = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \iint_{\Gamma} A \cdot n dx dy. \quad (26)$$

Таким образом, расход жидкости через сечение  $D$  полностью может быть выражен через интеграл по его границе. В последний интеграл в выражении (22) и в выражение (26) входит множитель  $\frac{\partial p}{\partial z}$ , а в первый интеграл в (22) не входит, однако данный множитель входит как масштабирующий коэффициент в граничные условия (9), то есть, расход  $Q$  пропорционален градиенту давления  $\frac{\partial p}{\partial z}$ , что и следовало ожидать по аналогии со случаем круглой трубы.

Для иллюстрации предложенного подхода были проведены расчеты различных конфигураций поперечных сечений, результаты которых приведены также на рисунках и в таблицах.

### Выводы

Основным результатом настоящей работы является систематическое исследование методических вопросов применения метода граничных элементов для расчета течения Пуазейля в канале произвольного поперечного сечения. Несмотря на кажущуюся очевидность и простоту заявленной тематики исследования, оно потребовало решения ряда нетривиальных задач. Благодаря проведенной работе удалось значительно расширить спектр течений Пуазейля, поддающихся эффективному расчету.

Следует отметить, что представление функции  $u_0$  (10) является неединственным, и использование альтернативных частных решений  $u_0$  может дать определенные преимущества при численном решении, однако сложные представления функции  $u_0$ , имеющие особенности и специфические свойства, могут породить, вообще говоря, непредсказуемые трудности в расчетах. Проблема выбора частных решений, используемых для упрощения исходных краевых задач, является общей для всей современной вычислительной математики, и, к сожалению, мера исследованности этой проблемы никак не может считаться удовлетворительной. Действительно, с точки зрения математики, все частные решения, удовлетворяющие исходному неоднородному уравнению, равноправны и равноприменимы, однако при использовании разных частных решений получаются разные краевые задачи, подлежащие численному решению. Нелепо было бы ожидать, что численное решение совершенно различных краевых задач, сформулированных, правда, в одной и той же области решения и решенных одним и тем же численным методом, будут иметь близкие структуры погрешности, хотя определенная корреляция между полями погрешности, конечно, будет наблюдаться. При однократном решении задачи такие различия, не превосходящие общих оценок погрешности использованного численного метода, не будут существенны и, наверняка, будут приемлемы в силу выбора расчетной схемы с известными оценками погрешности, которые удовлетворяют исследователя. Однако при многократном решении задачи рассматриваемые различия, имеющие систематический характер, могут накапливаться и приводить к неприемлемой системной ошибке. В настоящей работе не был рассмотрен вопрос об использовании альтернативных представлений функции  $u_0$ , поэтому следовало бы рекомендовать его в качестве тематики дальнейших исследований.

Как отмечалось выше, вопрос об использовании функций Грина для некоторых составляющих частей общей границы области также не может быть разрешен однозначно, а должен быть проанализирован для каждой конкретной задачи на уровне рациональных рассуждений. Использование же алгоритмов, основанных на метода Блоха-Гиневского [15], несомненно может быть реализовано, поскольку они существенно сокращают время счета, но, правда, несколько снижают точность вычислений.

**Перспективы дальнейших исследований** в рассматриваемом направлении видятся в проведении массовых прикладных расчетов для нужд науки и индустрии; усложнении граничных условий для течения Пуазейля; изучении процессов переноса в течениях Пуазейля; разработке методов расчета течения Пуазейля с малыми возмущениями.

#### Список использованной литературы

1. Евдокимов Д.В. Анализ тенденций развития современного математического и численного моделирования / Д.В. Евдокимов, А.А. Кочубей, Н.В. Поляков // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Моделювання. – 2009. – Вип. 1. – № 8. – С. 5-17.
2. Кочин Н.Е. Теоретическая гидромеханика / Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. – М.: Физматгиз, 1965. – Т. 1. – 758 с., Т. 2. – 772 с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
4. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости: Монография / Дж. Бэтчелор. – М.: Мир, 1976. – 756 с.
5. Шиллер Л. Движение жидкостей в трубах / Л. Шиллер. – М.-Л.: ОНТИ, 1932. – 230 с.
6. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах / Б.С. Петухов. – М.: Энергия, 1967. – 412 с.
7. Павловський В.Г. Особливості гідродинаміки і теплообміну в некруглих каналах / В.Г. Павловський. – Харків: НТУ "ХП", 2006. – 104 с.
8. Гаев Е.А. Моделирование стабилизированного потока вязкой жидкости в некруглых каналах с легкопроницаемой шероховатостью / Е.А. Гаев, О.М. Бердник // Прикладна гідромеханіка. – 2011. – Т. 13. – № 2. – С. 3-16.
9. Деменок С.Л. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубах и каналах / С.Л. Деменок, В.В. Медведев; науч. ред. В.В. Медведев. – Санкт-Петербург: Н-Пром Бюро, 2012. – 285 с.
10. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. – М.: Мир, 1987. – 524 с.
11. Бенерджи П. Метод граничных элементов в прикладных науках / П. Бенерджи, Р. Баттерфилд. – М.: Мир, 1984. – 494 с.
12. Поляков Н.В. Вычислительная теория потенциала. Современное состояние и перспективы использования в механике сплошной среды. Часть 1. Линейные задачи / Н.В. Поляков, Д.В. Евдокимов // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка. – 2006. – №2/1. – С. 7-25.
13. Евдокимов Д.В. Об одном варианте регулярного метода граничных элементов / Д.В. Евдокимов // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка. – 1999. – Вип. 2. – Т. 1. – С. 150-156.
14. Евдокимов Д.В. Разработка прямых регулярных алгоритмов вычислительной теории потенциала с точками коллокации внутри области решения / Д.В. Евдокимов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 2/7 (74). – С. 16-25.
15. Бразалук Ю.В. Численная реализация обобщенного метода Блоха-Гиневского / Ю.В. Бразалук, Д.В. Евдокимов, Н.В. Поляков // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка. – 2013. – Вип. 17. – Т. 1. – С. 35-51.
16. Бразалук Ю.В. Совместное применение метода малого параметра и метода граничных элементов для численного решения эллиптических задач с малыми возмущениями / Ю.В. Бразалук, Д.В. Евдокимов, Н.В. Поляков // Вісник ХНУ. 2005. – № 703. – С. 50-66.

УДК 620.179.147+519.853.6

В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, Р.В. ТРЕМБОВЕЦЬКА, В.В. ТИЧКОВ  
Черкаський державний технологічний університет**НЕЙРОМЕРЕЖЕВА МЕТАМОДЕЛЬ ЦИЛІНДРИЧНОГО НАКЛАДНОГО  
ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЯК СКЛАДОВА СУРОГАТНОГО  
ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗУ**

*Побудовано метамодель вихрострумowego перетворювача з циліндричною котушкою збудження, що має прямокутний поперечний переріз, з використанням евристичного методу, а саме нейронної мережі на радіально-базисних функціях. Метамодель створено для функції цілі, що представлена розподілом щільності вихрових струмів, які наводяться в об'єкті контролю, та залежить від двох просторових координат. В якості плану експерименту використано генератор точок, що рівномірно заповнює простір пошуку та в процесі реалізації якого використовуються ЛП<sub>τ</sub>-последовності Соболя. Результати чисельних експериментів свідчать про можливість використання побудованих RBF-метамodelей в задачах оптимального синтезу.*

*Ключові слова: вихрострумовой перетворювач, циліндрична котушка збудження з прямокутним поперечним перерізом сурогатна оптимізація, метамодель, комп'ютерний план експерименту, ЛП<sub>τ</sub>-последовність, поверхня відгуку, нейронна мережа*

В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, Р.В. ТРЕМБОВЕЦЬКАЯ, В.В. ТЫЧКОВ  
Черкасский государственный технологический университет**НЕЙРОСЕТЕВАЯ МЕТАМОДЕЛЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО НАКЛАДНОГО ВИХРЕТОКОВОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ СУРОГАТНОГО ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА**

*Построены метамодели вихретокового преобразователя с цилиндрической катушкой возбуждения прямоугольного поперечного сечения, с использованием эвристического метода, а именно нейронной сети на радиально-базисных функциях. Метамодели созданы для функции цели, которая представлена в виде распределения плотности вихревых токов, наводимых в объекте контроля, и зависит от двух пространственных координат. В качестве плана эксперимента использован генератор точек, который равномерно заполняет пространство поиска и в процессе реализации которого используются ЛП<sub>τ</sub>-последовательности Соболя. Результаты численных экспериментов свидетельствуют о возможности использования построенных RBF-метамodelей в задачах оптимального синтеза.*

*Ключевые слова: вихретоковый преобразователь, цилиндрическая катушка возбуждения с прямоугольным поперечным сечением, сурогатная оптимізація, метамодель, компьютерный план эксперимента, ЛП<sub>τ</sub>-последовательность, поверхность отклика, нейронная сеть*

V.Ya. HALCHENKO, R.V. TREMBOVETSKA, V.V. TYCHKOV  
Cherkasy State Technological University**NEURO-NETWORK METHAMODEL OF CYLINDRICAL EDDY-CURRENT PROBE AS  
A SURROGATE OPTIMUM SYNTHESIS COMPONENT**

*The application of surrogate optimization technology for the optimal synthesis eddy current probe (EC-probe) problem with a cylindrical coil is proposed. The metamodels EC-probe with a cylindrical excitation coil having a rectangular cross-section using a heuristic method, namely an artificial neural network, are developed. As an approximator an artificial RBF-neural network is used. The exact function in the form of the eddy-current density (ECD) distribution is determined by the ratio obtained from Maxwell's electrodynamics equations. The metamodel is created for the target function represented by the ECD distribution that are presented in the control object (CO), and depends on two spatial coordinates. The resulting EC-probe metamodels can be further used to formulate the goal function in the optimal synthesis problem. To generate an experiment plan, a point generator is used that evenly fills the search space and in the process of implementation of which the Sobol's LP<sub>τ</sub>-sequences are used ( $\zeta_1, \zeta_7$ ). At the stage of neural networks training, selection of the best was performed by subjective analysis of residues histograms, scattering diagrams and numerical values of indicators: determination coefficient, S.D.ratio, average relative magnitude of model error. The results of the response surface restoration obtained using the RBF-2-110-1 (43), RBF-2-135-1 (130) metamodels, performed in the entire range of variation variables, are presented in this paper. The research also contains statistical indicators for the exact ECD distribution function and metamodels, which can be used to assess their adequacy and informativity by Fischer's Factor by hypothesis testing about the statistical insignificance of the adequacy variance and the experiments results reproducibility dispersion, according*

to which the mathematical model coefficients were obtained. The results of numerical experiments indicate the possibility of using the proposed computational technology for constructing RBF-metamodels to approximate the exact distribution functions of the ECD of EC-probes with an exciting coil with a rectangular cross section.

*Keywords:* eddy current probe, cylindrical excitation coil with rectangular cross section, surrogate optimization, metamodel, computer experiment plan,  $LP_{\tau}$ -sequence, response surface, neural network

### Постановка проблеми

Задача оптимального синтезу вихрострумowego перетворювача (ВСП) передбачає багатократне розв'язання задачі аналізу для структури котушок збудження, забезпечуючи апріорі заданий розподіл щільності вихрових струмів (ЩВС) в сукупності точок, що розташовані в зоні контролю на поверхні об'єкта (ОК) [1]. Проте ця задача досить складна в реалізації, оскільки вимагає значних затрат обчислювальних та часових ресурсів для проведення розрахунків функції цілі, а саме заданого розподілу ЩВС, як функції від сукупності параметрів (див. рис. 1 а):

$$J = f(x, y, z, l_1, l_2, f, i_0, r_1, r_2, \mu_i, \sigma_i, d, v_x, v_y), \quad (1)$$

де  $x, y, z$  – просторові координати;

$l_1, l_2$  – висота розташування перетворювача над ОК, нижній та верхній край котушки відповідно;

$f, i_0$  – частота та щільність струму в котушці збудження;

$r_1, r_2$  – внутрішній та зовнішній радіуси котушки збудження;

$\mu_i, \sigma_i$  – відносна магнітна проникливість та питома електрична провідність  $i$ -го шару матеріалу;

$d$  – загальна товщина ОК;

$v_x, v_y$  – складові швидкості руху ВСП відносно ОК по координатах  $x, y$ .

Застосуванням технології сурогатної оптимізації можна уникнути проблеми необмеженого збільшення обчислювальних ресурсів. Тобто для формулювання функції цілі в рамках задачі оптимального синтезу можна використати метамодель ВСП, яка значно простіша в реалізації і менш ресурсоемна [2, 3].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методи побудови метамodelей, які використовуються для технічних задач, відрізняються різноманітними підходами до апроксимації та складністю реалізації. Серед найбільш застосованих алгоритмів виділяють: алгоритми поліноміального регресійного аналізу, регресії на основі гаусівських процесів [4], багатопараметричної нелінійної регресії; крігінг; адаптивні алгоритми регресійного аналізу [5]; еволюційні алгоритми самоорганізації [6]; алгоритми штучних нейронних мереж [7].

В поліноміальних моделях завжди виникає проблема вибору порядку моделі в залежності від складності функції цілі, який практично реалізується ітеративно в бік підвищення. Регресія на основі гаусівських процесів передбачає наявність заздалегідь заданої коваріаційної функції, яка необхідна при оцінюванні параметрів цих процесів, що відповідно впливає на обчислювальну складність методу. У крігінговому методі побудови метамodelей розрахунок параметрів моделі виконується методом максимальної правдоподібності. Для розрахунку виходу моделі даний метод передбачає виконання досить громіздких матричних перетворень, що суттєво впливає на затрати часу зі збільшенням розмірності задачі.

Одним із методів розв'язання регресійних задач є багатовимірні адаптивні сплайни MARS. Для розрахунку невідомих коефіцієнтів використовують метод найменших квадратів. Основним недоліком методу найменших квадратів є значні часові затрати на розрахунок коефіцієнтів моделі у випадку розв'язання задач великої розмірності.

Метод МГУА заснований на сортуванні поступово ускладнених моделей із вибором їх оптимальної структури. Метод потребує додаткових затрат часу на пошук ефективного виду моделі.

Потужним апаратом для апроксимації складних залежностей є штучні нейронні мережі [7]. Застосування MLP-мережі передбачає, окрім вибору алгоритму навчання, необхідність застосування різноманітних методів оптимізації структури мережі для кожної конкретної задачі. Штучні нейронні RBF-мережі мають лише один прихований шар нейронів, що істотно спрощує характерну для нейронних мереж задачу вибору кількості прихованих шарів і робить цей вибір визначеним. Також ці мережі швидко навчаються, що обумовлено можливістю застосування добре вивчених методів лінійної оптимізації при підборі параметрів лінійної комбінації у вихідному шарі мережі. Таким чином, для побудови апроксимаційної моделі в дослідженні застосовано математичний апарат штучних нейронних мереж, що обумовлено його перевагами.

### Мета дослідження

Мета роботи: побудова RBF-метамodelі циліндричного вихрострумowego перетворювача, яку можна використовувати для розрахунку розподілу щільності вихрових струмів в області контрольної зони та придатної для використання в задачах оптимального синтезу.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Побудова метамodelі передбачає розв'язання комплексу задач, серед яких побудова регресійної (або апроксимаційної) моделі, планування обчислювального експерименту та перевірка валідності отриманих метамodelей. Для реалізації задачі створення регресійної моделі використовується евристичний спосіб побудови за

допомогою нейронної мережі [7]. В якості апроксиматора в даному дослідженні використовується штучна RBF-нейронна мережа. План експерименту реалізовано за допомогою рівномірного комп'ютерного заповнення точками багатовимірного простору пошуку, а саме, з використання ЛП-послідовностей Соболя [8].

Розглянемо задачу неруйнівного контролю, де струмопровідний об'єкт нескінченного розміру у вигляді двошарової пластини має товщину  $d$  з відповідними електрофізичними параметрами матеріалу  $\sigma, \mu, r$ . Геометрична модель ВСП представлена на (рис. 1 а). В якості системи збудження ВСП використовується котушка з прямокутним перерізом, розміри якого визначається лінійними розмірами  $l_1, l_2$  та відповідними радіусами: зовнішнім  $r_2$  і внутрішнім  $r_1$ . Котушка живиться змінним струмом щільністю  $i_0$  частотою  $\omega$  та розташована на висоті  $l_1$  над ОК з товщиною першого шару  $c$  з постійною питомою електричною провідністю та магнітною проникливістю (рис. 1 а). Середовище вважається лінійним, ізотропним, однорідним. Взаємодія перетворювача із об'єктом контролю визначається співвідношеннями, що отримано із рівнянь Максвелла.

Щільність вихрових струмів для кожної із областей (I-IV) (рис. 1 а) в циліндричній системі координат визначається за формулами [9]:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \vec{A}, \tag{2}$$

$$J = -j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot A(r, z), \tag{3}$$

де  $A(r, z)$  –  $\varphi$ -та складова векторного потенціалу середовища;

$$A^{(1)}(r, z) = \frac{\mu \cdot i_0}{2} \cdot \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} \cdot J_1(\alpha r) \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cdot \left\{ e^{\alpha \cdot l_2} - e^{\alpha \cdot l_1} - \left( e^{-\alpha \cdot l_2} - e^{-\alpha \cdot l_1} \right) \right\} \cdot k_1 \cdot \left[ \int_{\alpha \cdot r_1}^{\alpha \cdot r_2} x \cdot J_1(x) dx \right] d\alpha ;$$

$$k_1 = \frac{(\alpha + \alpha_1) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) + (\alpha - \alpha_1) \cdot (\alpha_2 + \alpha_1) \cdot e^{2 \cdot \alpha_1 \cdot c}}{(\alpha - \alpha_1) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) + (\alpha + \alpha_1) \cdot (\alpha_2 + \alpha_1) \cdot e^{2 \cdot \alpha_1 \cdot c}} ;$$

$$A^{(2)}(r, z) = \frac{\mu \cdot i_0}{2} \cdot \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} \cdot J_1(\alpha r) \cdot \left( e^{-\alpha \cdot l_1} - e^{-\alpha \cdot l_2} \right) \cdot \left\{ e^{\alpha \cdot z} + k_2 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \right\} \cdot \left[ \int_{\alpha \cdot r_1}^{\alpha \cdot r_2} x \cdot J_1(x) dx \right] d\alpha ;$$

$$k_2 = \frac{(\alpha + \alpha_1) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) + (\alpha - \alpha_1) \cdot (\alpha_2 + \alpha_1) \cdot e^{2 \cdot \alpha_1 \cdot c}}{(\alpha - \alpha_1) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) + (\alpha + \alpha_1) \cdot (\alpha_2 + \alpha_1) \cdot e^{2 \cdot \alpha_1 \cdot c}} ;$$

$$A^{(3)}(r, z) = \mu \cdot i_0 \cdot \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} \cdot J_1(\alpha r) \cdot \left( e^{-\alpha \cdot l_1} - e^{-\alpha \cdot l_2} \right) \cdot k_3 \cdot \left[ \int_{\alpha \cdot r_1}^{\alpha \cdot r_2} x \cdot J_1(x) dx \right] d\alpha ;$$

$$k_3 = \frac{\alpha \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot e^{2 \cdot \alpha_1 \cdot c} \cdot e^{\alpha_1 \cdot z} + \alpha \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot e^{-\alpha_1 \cdot z}}{(\alpha - \alpha_1) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) + (\alpha + \alpha_1) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot e^{2 \cdot \alpha_1 \cdot c}} ;$$

$$A^{(4)}(r, z) = \mu \cdot i_0 \cdot \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} \cdot J_1(\alpha r) \cdot \left( e^{-\alpha \cdot l_1} - e^{-\alpha \cdot l_2} \right) \cdot k_4 \cdot \left[ \int_{\alpha \cdot r_1}^{\alpha \cdot r_2} x \cdot J_1(x) dx \right] d\alpha ;$$

$$k_4 = \frac{2 \cdot \alpha \cdot \alpha_1 \cdot e^{(\alpha_2 + \alpha_1) \cdot c} \cdot e^{\alpha_2 \cdot z}}{(\alpha - \alpha_1) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) + (\alpha + \alpha_1) \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot e^{2 \cdot \alpha_1 \cdot c}} ;$$

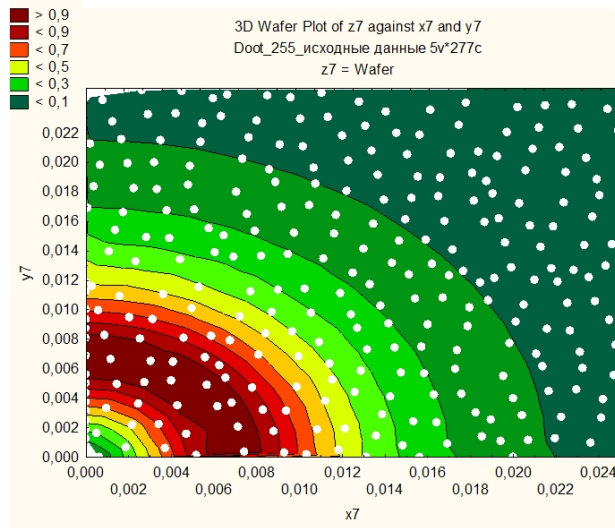
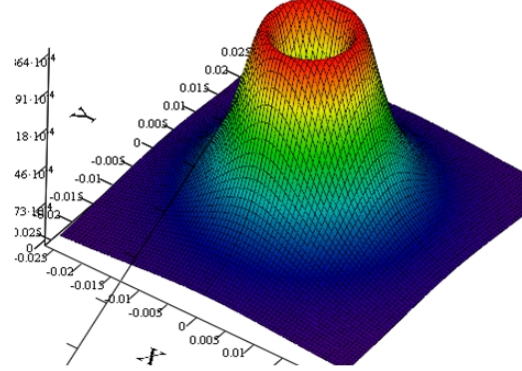
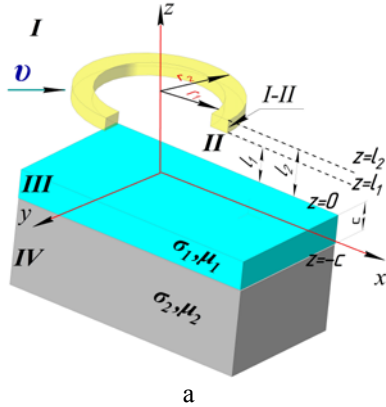
$$A^{(1,2)}(r, z) = \frac{\mu \cdot i_0}{2} \cdot \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} \cdot J_1(\alpha r) \cdot \left\{ \begin{aligned} &2 - e^{\alpha \cdot (z - l_2)} - e^{-\alpha \cdot (z - l_1)} + \\ &+ e^{-\alpha \cdot z} \cdot \left( e^{-\alpha \cdot l_1} - e^{-\alpha \cdot l_2} \right) \cdot k_2 \end{aligned} \right\} \cdot \left[ \int_{\alpha \cdot r_1}^{\alpha \cdot r_2} x \cdot J_1(x) dx \right] d\alpha ;$$

$J_1(\alpha r), J(x)$  – функції Бесселя 1-ого роду 1-ого порядку;

$$\alpha_i \equiv \sqrt{\alpha^2 + j \cdot \omega \cdot \mu \cdot \sigma_i}, i=1, 2.$$

Для отримання точок плану експерименту використано ЛП<sub>т</sub>-послідовності ( $\zeta_1, \zeta_2$ ) для  $N=255$  точок. Отримані значення щільності вихрових струмів в точках плану використано як вихідні дані для виконання наступного етапу – побудови метамоделі. Оскільки функція розподілу ЩВС симетрична, то в зондувальних точках з отриманими координатами (рис. 1 б) розраховувалися значення щільності тільки в першому квадранті, які й використовувалися для побудови цільової функції.

Проілюструємо побудову метамоделі накладного ВСП із використанням обчислювальної технології [1, 2] на конкретному прикладі при наступних вихідних даних: товщина шару струмопровідного матеріалу  $c=5$  мм; висота до нижньої площини котушки над об'єктом контролю  $l_1=2$  мм; частота струму збудження  $f=100$  Гц; радіуси внутрішній  $r_1=6$  мм та зовнішній  $r_2=8$  мм відповідно; електрофізичні параметри матеріалу,  $\sigma_1=3,74 \cdot 10^7$  См/м,  $\sigma_2=0$  См/м,  $\mu_1=1$ ; щільність струму  $i_0=1,25 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>.



Данні: Doot_255_исходні			Данні: Doot_255_исходні			Данні: Doot_255_исходні					
1	2	3	1	2	3	1	2	3			
x7	y7	z7	x7	y7	z7	x7	y7	z7			
1	0,0125	0,0125	0,177931	142	0,011036	0,024707	0,048808	223	0,024513	0,009278	0,052233
2	0,00625	0,00625	0,840076	143	0,022635	0,012208	0,050281	224	0,000683	0,019825	0,127732
3	0,01875	0,01875	0,050256	144	0,060879	0,0085	0,30932	225	0,013182	0,007325	0,272245
4	0,003125	0,003125	0,70302	145	0,01338	0,0208	0,083713	226	0,00932	0,013575	0,264828
5	0,015625	0,015625	0,047907	146	0,00713	0,002051	0,983467	227	0,019433	0,001074	0,138084
6	0,009375	0,009375	0,70302	147	0,01963	0,01455	0,066419	228	0,003008	0,0167	0,194125
7	0,021875	0,021875	0,047907	148	0,004005	0,005175	0,99612	229	0,015307	0,0042	0,203319
8	0,001563	0,001563	0,565712	149	0,016506	0,017675	0,060747	230	0,010967	0,02296	0,081017
9	0,014063	0,023438	0,046169	150	0,010255	0,01425	0,25936	231	0,022548	0,01645	0,067666
10	0,007813	0,024687	0,804371	151	0,022756	0,023925	0,022196	232	0,002246	0,018263	0,158899
11	0,020313	0,017188	0,049654	152	0,002442	0,003612	0,752729	233	0,014745	0,005763	0,239819
12	0,004687	0,001563	0,843142	153	0,014543	0,016112	0,093511	234	0,008496	0,024513	0,054196
13	0,017188	0,014063	0,090462	154	0,009883	0,009883	0,302536	235	0,020995	0,012013	0,068694
14	0,010938	0,007813	0,362722	155	0,021153	0,022623	0,029049	236	0,00537	0,021388	0,092494
15	0,023438	0,020313	0,028315	156	0,005567	0,006737	0,852766	237	0,01787	0,008888	0,125454
16	0,000781	0,02422	0,068281	157	0,018088	0,014238	0,051096	238	0,011867	0,015138	0,14306
17	0,013282	0,01172	0,176917	158	0,011810	0,000488	0,488398	239	0,02412	0,002638	0,067999
18	0,007032	0,01797	0,138486	159	0,024318	0,012987	0,043801	240	0,001405	0,00498	0,878302
19	0,019633	0,00547	0,119661	160	0,000488	0,00168	0,298206	241	0,013966	0,01148	0,08937
20	0,003907	0,014845	0,260013	161	0,012987	0,01416	0,140236	242	0,00715	0,01123	0,381088
21	0,016408	0,02344	0,212232	162	0,006737	0,00791	0,640098	243	0,020215	0,02373	0,027764
22	0,010157	0,021095	0,07643	163	0,019238	0,02041	0,041167	244	0,00459	0,008105	0,777346
23	0,022658	0,008595	0,068278	164	0,003612	0,011035	0,508718	245	0,01709	0,020605	0,048815
24	0,002344	0,013282	0,369708	165	0,016112	0,023535	0,038718	246	0,01084	0,001855	0,571165
25	0,014845	0,000781	0,282497	166	0,009883	0,004785	0,574018	247	0,02334	0,014355	0,044767
26	0,008695	0,019633	0,10247	167	0,022363	0,017295	0,040021	248	0,003028	0,00543	0,99315
27	0,021095	0,007032	0,09009	168	0,002051	0,009473	0,727574	249	0,015629	0,019043	0,086192
28	0,00547	0,022658	0,077543	169	0,01465	0,021973	0,051343	250	0,009278	0,00293	0,78164
29	0,01797	0,016157	0,11344	170	0,0083	0,003223	0,83165	251	0,021778	0,012793	0,053992
30	0,01172	0,016408	0,121703	171	0,0208	0,015722	0,053287	252	0,008153	0,003418	0,990933
31	0,02422	0,003907	0,064627	172	0,006175	0,000888	0,876271	253	0,018652	0,015918	0,086395
32	0,000391	0,01836	0,158788	173	0,017675	0,012597	0,097204	254	0,012403	0,009668	0,244089

Рис. 1. Вихрострумний перетворювач: а) геометрична модель; б) точна функція розподілу ЩВС на поверхні ОК; в) план експерименту  $N=255$ , нанесений на лінії рівня функції; г) певні вихідні дані (координати зондувальних точок, в яких розраховувалися значення ресурсомної функції розподілу ЩВС)

На етапі навчання нейронних мереж відбір кращих проводився суб'єктивним аналізом гістограм залишків, діаграм розсіювання та чисельних значень показників: коефіцієнта детермінації  $R^2$ ,  $S.D.ratio$ , середньої відносної величини модельної похибки  $MAPE, \%$ .

Створено майже 360 RBF-нейронних мереж для плану  $N=255$  з кількістю прихованих нейронів від 90 до 170, з яких відібрані найкращі (табл. 1) за вказаними показниками.

Таблиця 1

Кращі RBF-метамоделі					
№ п/п	Метамодель	$R^2$ для навчальної, контрольної, тестової вибірки	$S.D.ratio$	$MAPE, \%$	$MS_R$
1	RBF-2-100-1(5)	0,998;0,996; 0,996	0,0538	5,45	0,00033
2	RBF-2-105-1(28)	0,999;0,995;0,995	0,0573	5,63	0,00036
3	RBF-2-110-1(43)	0,999;0,997;0,995	0,0530	3,59	0,00029
4	RBF-2-135-1(130)	0,998;0,992;0,994	0,0742	4,78	0,000575
5	RBF-2-97-1(359)	0,999;0,992;0,991	0,0714	5,43	0,000516



Для варіантів метамоделей з номерами 3, 4 відповідно на рис. 2 наведено показники ефективності їх побудови, а також певні параметри.

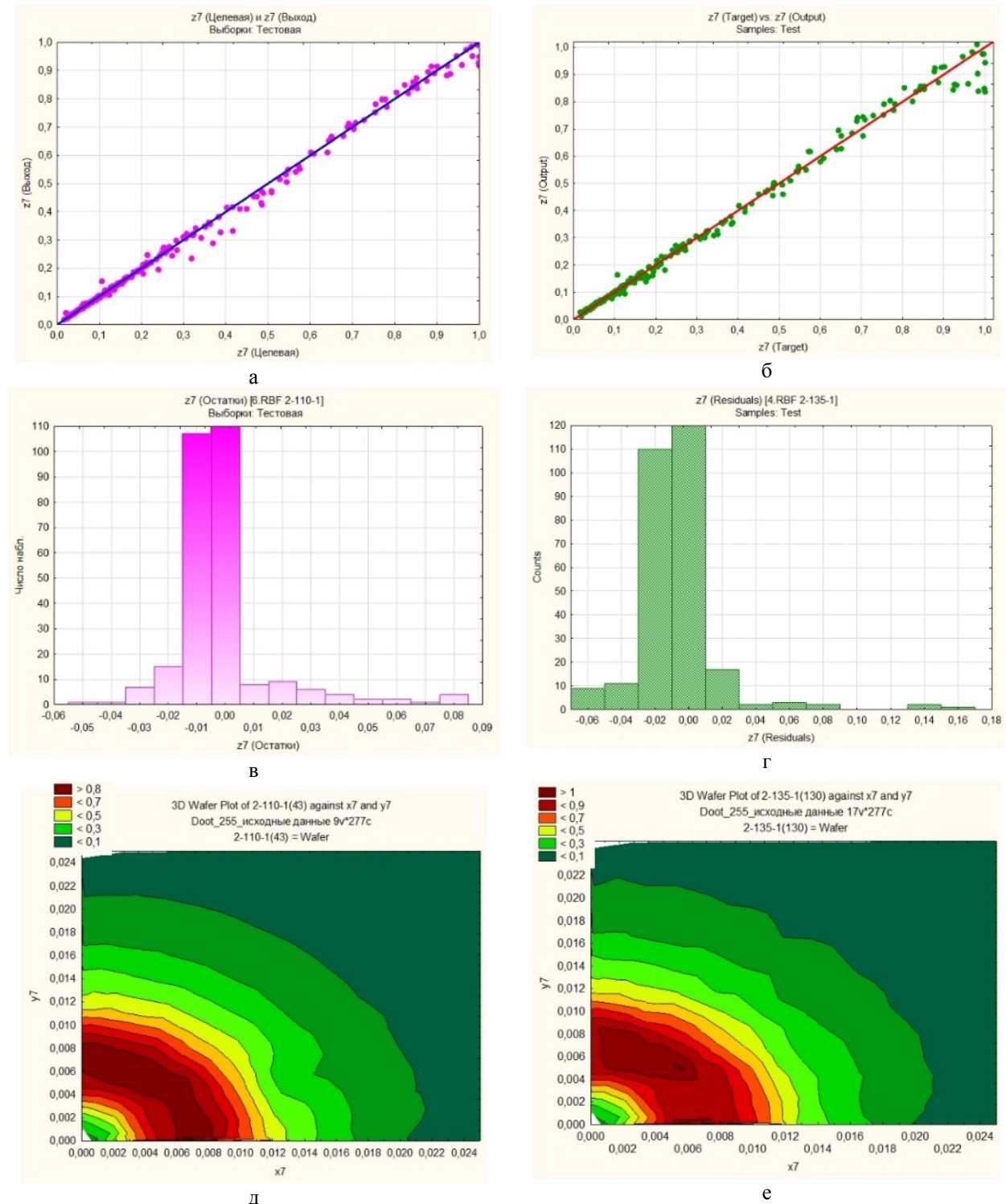


Рис. 2. RBF-нейронні мережі (вибірка N=255): а), б) діаграми розсіювання значень точної та апроксимаційної функцій; в), г) гістограми залишків; д), е) лінії рівня, відтворених на точках навчальної вибірки поверхні відгуку для мереж RBF-2-110-1(43), RBF-2-135-1(130) відповідно

Одним із критеріїв якості багатофакторної регресійної моделі є перевірка правильності відтворюваності поверхні відгуку за допомогою отриманої математичної моделі у всій області моделювання. На рис. 3, наведено результат відновлення поверхні відгуку, отриманої за допомогою метамоделей RBF-2-110-1(43), RBF-2-135-1(130), що виконано у всьому діапазоні  $x \in [0; 25]$ ,  $y \in [0; 25]$  на 1681 точках.



Перевірка отриманої математичної моделі на адекватність та інформативність є обов'язковим етапом, який завершує її побудову [10]. Адекватність встановлюється перевіркою  $F$ -критерію Фішера гіпотези про статистичну незначну відмінність дисперсії адекватності та дисперсії відтворюваності результатів експериментів, за якими були отримані коефіцієнти математичної моделі [10]. Перевірка моделі на інформативність виконується шляхом розрахунку множинного коефіцієнту кореляції  $R$  та перевірки його статистичної значущості за  $F$ -критерієм.

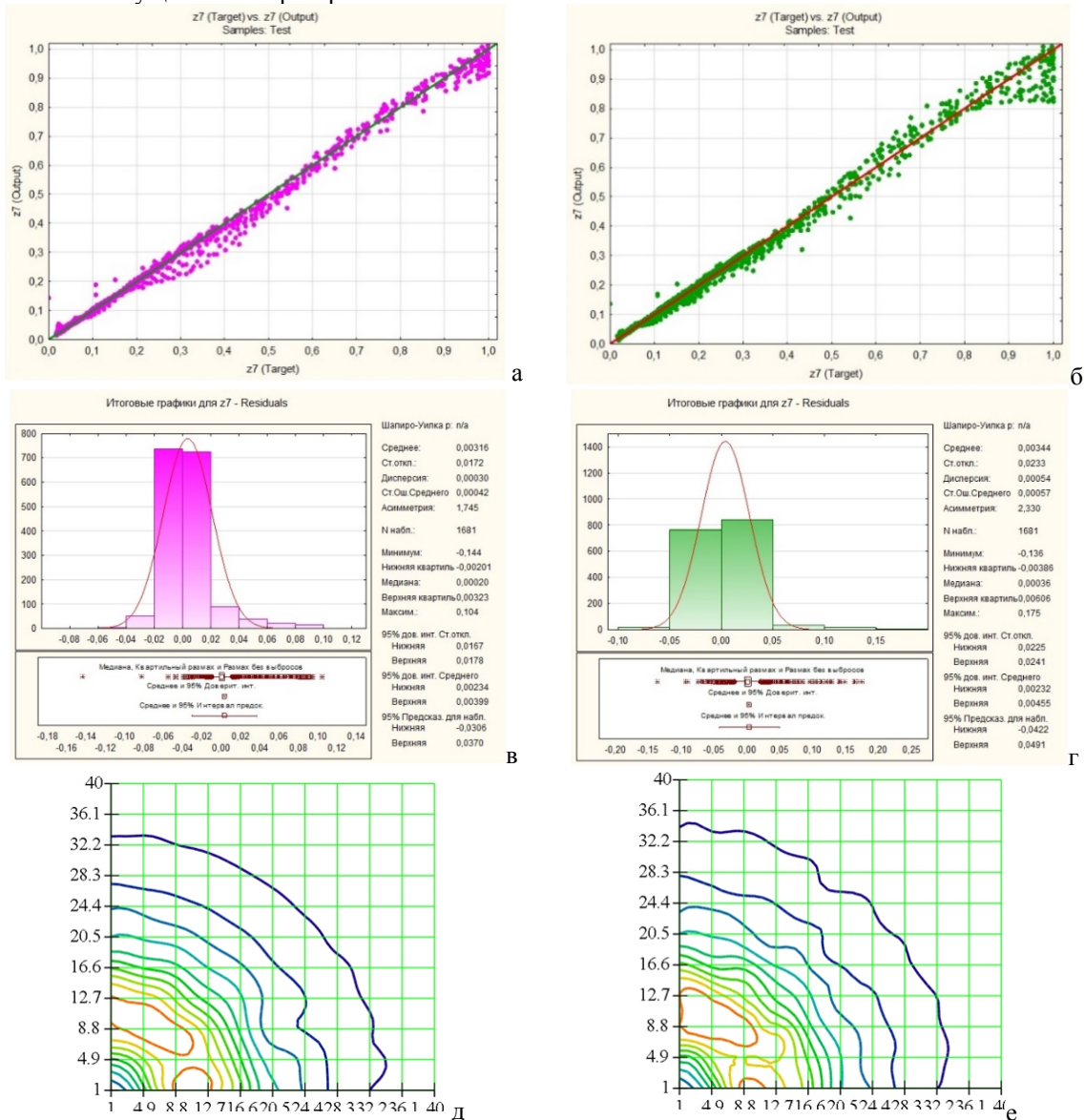


Рис. 3. Відтворення поверхні відгуку за допомогою метамодель RBF-2-110-1(43) та RBF-2-135-1(130): а), б) діаграми розсіювання значень точної та відновленої функції; в), г) гістограми залишків; д), е) лінії рівня відновленої поверхні відгуку

На рис. 4 наведені деякі статистичні показники для точної функції розподілу ЩВС та метамодель, використовуючи які можна оцінити адекватність та інформативність отриманих метамодель.

Рабочая книга* - Описательные статистики (Dood_1682_точек_2-110-1(43))							
Описательные статистики (Dood_1682_точек_2-110-1(43))							
Переменная	N набл.	Среднее	Сумма	Минимум	Максим.	Дисперсия	Ст.откл.
J-target	1681	0,243973	410,1179	0,000000	1,000000	0,070435	<b>0,265395</b>
Jplan - Output	1681	0,240809	404,7996	0,015252	1,020349	0,068249	<b>0,261245</b>
z7 - Residuals	1681	0,003164	5,3183	-0,143892	0,104356	0,000297	<b>0,017223</b>
z7 - Abs. Res.	1681	0,008702	14,6284	0,000003	0,143892	0,000231	0,015194
z7 - SSR	1681	0,000306	<b>0,5151</b>	0,000000	0,020705	0,000001	0,001128
SSD	1681	0,068218	<b>114,6748</b>	0,000000	0,602759	0,015215	0,123350
SST	1681	0,070393	<b>118,3300</b>	0,000000	0,571577	0,016283	0,127603

Рис. 4. Статистичні показники для оцінки адекватності та інформативності метамодель: а) для метамодель RBF-2-110-1(43)

Переменная	Описательные статистики (Dood 1682 точек 2-135-1(130))						
	N набл.	Среднее	Сумма	Минимум	Максим.	Дисперсия	Ст.откл.
J-target	1681	0,243973	410,1179	0,000000	1,000000	0,070435	0,265395
Jplan-Output 2-135-1(130)	1681	0,240536	404,3413	0,011767	1,010670	0,067714	0,260219
z7 - Residuals	1681	0,003436	5,7766	-0,135715	0,175086	0,000541	0,023263
z7 - Abs. Res.	1681	0,011880	19,9708	0,000001	0,175086	0,000412	0,020292
SSR	1681	0,000553	0,9290	0,000000	0,030655	0,000005	0,002342
SSD	1681	0,067686	113,7794	0,000000	0,587824	0,014063	0,118589
SST	1681	0,070393	118,3300	0,000000	0,571577	0,016283	0,127603

Продовження рис. 4. Статистичні показники для оцінки адекватності та інформативності метамоделі: б) для метамоделі RBF-2-135-1(130)

### Висновки

Результати чисельних експериментів свідчать про можливість використання запропонованої обчислювальної технології побудови RBF-метамоделей для апроксимації точних функцій розподілу ЩВС циліндричних накладних вихрострумівих перетворювачів із збуджуючою котушкою з прямокутним перетином.

### Список використаної літератури

1. Гальченко В.Я. Застосування метамоделей для вирішення задач синтезу вихрострумівих перетворювачів з однорідним розподілом щільності струму в зоні контролю [Текст] / В.Я. Гальченко, Р.В. Трембовецька, В.В. Тичков // Приладобудування: стан і перспективи: матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 15-16 травня 2018 р.). – К.: ПБФ, НТУУ "КПІ", 2018. – С. 146-147.
2. Гальченко В.Я. Побудова RBF-метамоделей в задачах сурогатної оптимізації [Електронний ресурс] / В.Я. Гальченко, Р.В. Трембовецька // Теоретико-практичні проблеми використання математичних методів і комп'ютерно-орієнтованих технологій в освіті та науці: зб. матеріалів II Всеукраїнської конференції (м. Київ, 28 березня 2018 р.). – Київ: Київ. ун-т ім. Б.Грінченка, 2018. – С. 179-184.
3. Трембовецька Р.В. Вирішення складних задач оптимізації з використанням метамоделей [Text] / Р.В. Трембовецька, В.Я. Гальченко, В.В. Тичков // Information Technologies in Education, Science and Technology (ITEST-2018): Conference proceedings of IV International Scientific-Practical Conference (Cherkasy, May 17-18, 2018). – Cherkasy: ChSTU, 2018. – P. 37-42.
4. Бурнаев Е.В. Сравнительный анализ процедур оптимизации на основе гауссовских процессов [Электронный ресурс] / Е.В. Бурнаев, М. Панов, Д. Кононенко, И. Коноваленко. – Режим доступа: URL: <http://itas2012.iitp.ru/pdf/1569602385.pdf> (дата обращения: 04.11.2015).
5. Целых В.Р. Многомерные адаптивные регрессионные сплайны / В.Р. Целых // Машинное обучение и анализ данных. – 2012. – Т.1. – № 3. – С. 272-278.
6. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – Киев: Наук. думка, 1982. – 296 с.
7. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.
8. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.
9. Dood C.V. Analytical solutions to eddy current probe-coil problems / C.V. Dood, W.E. Deeds // Journal of Applied physics. – 1968. – V. 39. – P. 2829-2838.
10. Радченко С.Г. Методология регрессионного анализа: Монография / С.Г. Радченко. – Київ: "Корнійчук", 2011. – 376 с.

УДК 539.3

С.І. ГОМЕНЮК, С.М. ГРЕБЕНЮК, М.І. КЛИМЕНКО

Запорізький національний університет

О.Л. МІЗЕРНА

Запорізький національний технічний університет

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В'ЯЗКОПРУЖНОГО ДЕФОРМУВАННЯ  
ВІБРОІЗОЛЯТОРА ІЗ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ**

*Метою роботи є визначення напружено-деформованого стану гумового віброізолятора з композитною вставкою з врахуванням схеми армування, об'ємного вмісту волокна та реологічних властивостей гуми. Для різних конструктивних модифікацій віброізоляторів визначено напружено-деформований стан при осьовому статичному навантаженні. Гумовокордний матеріал моделюється однорідним транстропним матеріалом. Підходи до визначення напружено-деформованого стану базуються на модифікації методу скінченних елементів – моментній схемі скінченного елемента. Ця модифікація дозволяє врахувати слабку стисливість гуми. Визначено напружено-деформований стан з урахуванням реологічних характеристик гуми. Проведено аналіз впливу схеми армування, об'ємного вмісту волокна та реологічних властивостей гуми на параметри деформування віброізолятора.*

*Ключові слова: напружено-деформований стан, віброізолятор, гума, гумовокордний матеріал, в'язкопружність, моментна схема скінченного елемента, армування.*

С.И. ГОМЕНЮК, С.Н. ГРЕБЕНЮК, М.И. КЛИМЕНКО

Запорожский национальный университет

Е.Л. МИЗЕРНАЯ

Запорожский национальный технический университет

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВИБРОИЗОЛЯТОРА  
ИЗ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

*Целью работы является определение напряженно-деформированного состояния резинового виброизолятора с композитной вставкой с учетом схемы армирования, объемного содержания волокна и реологических свойств резины. Для различных конструктивных модификаций виброизоляторов определено напряженно-деформированное состояние при осевом статическом нагружении. Резинокордный материал моделируется однородным транстропным материалом. Подходы к определению напряженно-деформированного состояния базируются на модификации метода конечных элементов – моментной схеме конечного элемента. Эта модификация позволяет учесть слабую сжимаемость резины. Определено напряженно-деформированное состояние с учетом реологических характеристик резины. Проведен анализ влияния схемы армирования, объемного содержания волокна и реологических свойств резины на параметры деформирования виброизолятора.*

*Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, виброисолятор, резина, резинокордный материал, вязкоупругость, моментная схема конечного элемента, армирование.*

S.I. HOMENIUK, S.M. GREBENIUK, M.I. KLIMENKO

Zaporizhzhya National University

E.L. MIZERNAYA

Zaporizhzhya National Technical University

**NUMERICAL MODELING OF VISCOELASTIC DEFORMATION OF VIBROINSULATOR FROM  
FIBROUS COMPOSITE MATERIAL**

*The purpose of the work is to determine the stress-strain state of a rubber vibroinsulator with composite insertion, taking into account the reinforcement scheme, the volume content of the fiber and the rheological properties of the rubber. Stress-strained state under axial static load is determined for various constructive modifications of vibroinsulators. Two types of vibroinsulators – with one and two rubber-cord layers – are considered. The reinforcement is carried out by parallel fibers. In the case of two layers, their direction of reinforcement is mutually perpendicular. Rubber and the materials on its basis have a number of specific characteristics due to what classical methods of calculation are not applicable to them. Rubber-cord is modeled with a homogeneous transtropic material. Its effective elastic constants are the functions of elastic constants rubber and cord and the volumetric content of the cord in the composite. The approaches to determination of the stress-strained state are based on the modification of the finite element method – the moment scheme of the finite element that contains triple approximation of displacement fields, components of deformations tensor, and volume change function. This modification lets taking into account weak compressibility of rubber. A viscoelastic problem is solved for the rubber vibroinsulator. The stress-strained state is determined with consideration of rheological*

*characteristics of rubber. Boltzmann -Volterra's hereditary theory with residual kernel of exponential type is used for description of the mechanical behavior of the material. In this kernel, instant and long elastic constants are used as parameters. Finding of the solution to this problem is brought to the iterative solution of the equation system by method of Newton-Kantorovich. In so doing, the global stiffness matrix is formed for rubber and rubber-cord materials separately because of difference of their elastic constants. Influence of the reinforcement scheme, the volume content of the fiber and the rheological properties of the rubber on the parameters of the vibroinsulator deformation is analyzed.*

*Key words: stress-strained state, vibroinsulator, rubber, rubber-cord, viscoelasticity, moment scheme of the finite element, reinforcement.*

### Постановка проблеми

Проектування нових і удосконалення існуючих конструкцій неможливе без застосування композиційних матеріалів. Одним із найбільш поширених видів композитів є волокнистий композиційний матеріал, що знаходить застосування у різних виробничих сферах. Так, розвиток сучасного будівництва, машинобудування, транспорту та інших галузей потребує створення нових та удосконалення існуючих методів віброзахисту. Вібрації та ударні навантаження негативно впливають на будівлі та споруди, роботу машин та механізмів і нерідко є причиною виходу з ладу та руйнування. Одним із перспективних методів віброзахисту є застосування гумових та гумовокордних віброізоляторів, які ефективно захищають споруди та обладнання від вібрацій як техногенного (транспорт, метро тощо), так і природного характеру (сейсмічна активність). Конструкції віброізоляторів мають низку модифікацій: гумові, гумометалеві, гумовокордні.

Застосування гумовокордних матеріалів дозволяє зменшити матеріаломісткість конструкції, надає широкі можливості до керування жорсткостними характеристиками. При створенні таких віброізоляторів необхідно визначити напружено-деформований стан, для чого необхідно врахувати механічні властивості матеріалу. При використанні гумовокордного матеріалу треба врахувати низку специфічних характеристик, таких як неоднорідність матеріалу, в'язкопружність гуми та інші. Одним із ефективних способів представлення механічних характеристик неоднорідного матеріалу є їх гомогенізація. Врахування всіх цих властивостей приводить до громіздких моделей, тому для розв'язання задач механіки деформівного твердого тіла використовують чисельні методи, такі як метод скінченних елементів. Актуальним є визначення напружено-деформованого стану гумовокордних віброізоляторів при різних схемах армування.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблемою моделювання в'язкопружних властивостей волокнистого композиту та визначенням напружено-деформованого стану конструкцій із таких матеріалів займалася низка науковців. Так, асимптотичний підхід до визначення в'язкопружних характеристик волокнистого композита на комірці періодичності використано в роботі [1].

Застосування статистичних та ймовірнісних підходів при розв'язанні задачі гомогенізації композиційних матеріалів, у тому числі односпрямованих неперервно-волокнистих композитів, проведено в монографії [2]. Охарактеризовано основні методи знаходження та отримано співвідношення для ефективних механічних характеристик у випадку в'язкопружних властивостей компонентів.

У монографії Kwon Y.W., Allen D.H., Talreja R. [3] представлено широкий спектр методів із застосуванням ймовірнісних та статистичних підходів, які дозволяють описувати механічну поведінку композитів, у тому числі волокнистих при наявності реологічних процесів.

В статті Куїмової С.В., Труфанова Н.А. [4] на основі сумісного застосування методу квазіконстантних операторів та методу скінченних елементів чисельно визначені ефективні термов'язкопружні характеристики односпрямованих армованих полімерних композитів за властивостями компонентів. Для опису в'язкопружних властивостей армований композит представлявся однорідним трансверсально-ізотропним матеріалом із механічними сталими у вигляді різницевих інтегральних операторів. Значення механічних сталих знаходились із розв'язання крайової задачі термов'язкопружності на комірці періодичності. Досліджено вплив об'ємної релаксації зв'язувального матеріалу на властивості односпрямованого композита.

Для визначення в'язкопружних сталих волокнистого композиційного матеріалу в поперечному щодо волокна напрямі запропонована лінійна в'язкопружна модель поверхні розділу волокна та матриці у статті Gosz M., Moran B., Achenbach J.D. [5]. За допомогою гомогенізації для елементарної комірки методом скінченних елементів досліджені в'язкопружні властивості волокнистого композита.

У роботі [6] запропоновано мікромеханічну модель односпрямованих волокнистих полімерних композитів з урахуванням наявності тріщини. За допомогою методу скінченних елементів досліджено процеси руйнування в тривимірній періодичній комірці для в'язкопружної матриці та пружного волокна.

Інтегральне рівняння, розв'язання якого дозволяє отримати механічні характеристики композитного матеріалу із в'язкопружними матрицею та включенням, наведено у роботі [7].

Основні положення та математичний апарат методу орієнтаційного осереднення на основі розкладання функцій у ряд Фур'є викладені у [8]. За мікромеханічними характеристиками отримано

осередненні тензори деформацій та напружень, що характеризують в'язкопружні властивості композита при різних схемах армування волокнами.

Вплив взаємодії корду гумовокордного композита при скінченних деформаціях на напружено-деформований стан досліджується на основі методу Колосова-Мухелішвілі [9, 10]. Задача розв'язується у випадку плоскої деформації. Корд вважається абсолютно жорстким, гума – нестисловою та в'язкопружною. В'язкопружні властивості описуються інтегральним оператором з різницею ядром. За ядро релаксації прийнято ядро Колтунова [9]. Нелінійна задача розв'язується методом послідовних наближень.

У [11] наведено методи, що дозволяють моделювати поведінку композиційних матеріалів у різних умовах деформування. Наведено відомості про застосування різних методів опису композиційних матеріалів на мікрорівні. Розглянуті моделі в'язкопружної поведінки композитів.

В роботі Barbero E.J. [12] розглянуті особливості моделювання ряду ефектів, притаманних композиційним матеріалам, у тому числі в'язкопружності.

**Мета дослідження**

Метою даної роботи є моделювання та аналіз напружено-деформованого стану гумовокордного віброізолятора з врахуванням в'язкопружних властивостей та різних схем армування волокнами.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Розглянемо циліндричний віброізолятор (рис. 1). Розміри віброізолятора:  $h = 0,1$  м,  $h_1 = 0,035$  м,  $h_2 = 0,03$  м,  $d = 0,6$  м. Механічні характеристики гуми: коефіцієнт Пуассона  $\nu_0^* = \nu_\infty^* = 0,49$ , миттєвий модуль зсуву  $G_0^* = 1,76$  МПа, тривалий модуль зсуву  $G_\infty^* = 0,74$  МПа. В гумовокордному матеріалі матрицею виступає гума з тими ж механічними характеристиками, а корд волокна має такі механічні характеристики: коефіцієнт Пуассона  $\nu^\circ = 0,4$ , модуль пружності  $E^\circ = 1240$  МПа. Тут символом  $^\circ$  позначені пружні сталі, які належать до матеріалу волокна, а символом  $*$  – до матеріалу матриці. Сумарне навантаження приймемо  $F = 100$  кН.

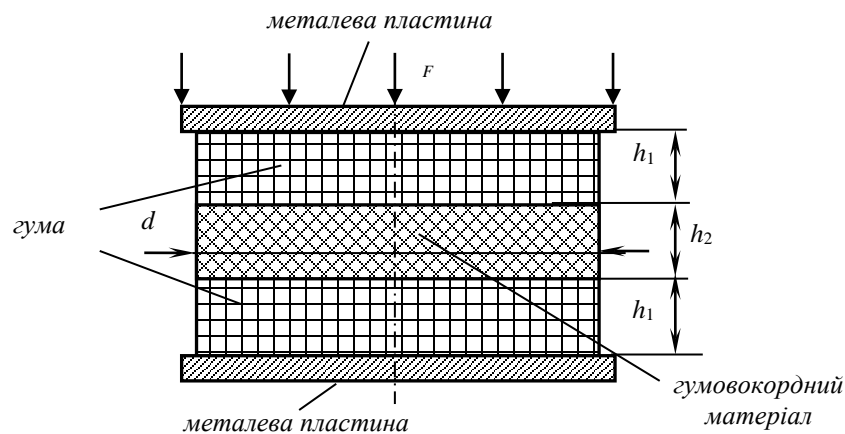


Рис. 1. Розрахункова схема віброізолятора

При розрахунках конструкцій із волокнистих композитів врахувати вплив кожного волокна на напружено-деформований стан практично неможливо. Тому, як правило, при розв'язанні задач механіки деформівного твердого тіла неоднорідний композит гомогенізується, тобто моделюється однорідним анізотропним матеріалом. Для розрахунку пружних сталей такого матеріалу розроблено низку теорій. Скористаємося наступними співвідношеннями, які моделюють композит трансотропним однорідним матеріалом [13]:

$$E_1 = \frac{(\alpha - 2\nu^\circ\beta)E^*(1-f) + (\alpha - 2\nu^*\beta)E^\circ f}{\alpha - 2\beta\nu^\circ + 2f\nu^*E^\circ(\nu^\circ - \nu^*)}, E_2 = \frac{2\alpha E^*E^\circ}{(E^\circ(\delta_1 + \eta_1\eta_2) + \alpha\delta_2)},$$

$$\nu_{12} = \frac{(\alpha - 2\beta\nu^\circ)\nu^* + 2E^\circ f(\nu^\circ - \nu^*)}{\alpha - 2\beta\nu^\circ + 2f\nu^*E^\circ(\nu^\circ - \nu^*)}, \nu_{23} = \frac{(\alpha\delta_2 - E^\circ(\delta_1 + \eta_1\eta_2))}{(\alpha\delta_2 + E^\circ(\delta_1 + \eta_1\eta_2))},$$

$$G_{12} = \frac{G^*(G^*(1-f) + G^\circ(f+1))}{G^\circ(1-f) + G^*(f+1)}, \tag{1}$$

де  $E_1$  – подовжній модуль пружності композиту ( $x_1$  – напрям волокна),  $E_2$  – поперечний модуль пружності композиту ( $Ox_2x_3$  – площина ізотропії),  $\nu_{12}, \nu_{23}$  – коефіцієнти Пуассона композиту,  $G_{12}$  – модуль зсуву композиту,  $f$  – об’ємний вміст волокна у композиті,  $\alpha = E^*(1-f)(1-\nu^\circ) + E^\circ(f(1-\nu^*) + (1+\nu^*))$ ,  $\beta = \nu^\circ E^*(1-f) + \nu^* f E^\circ$ ,  $\zeta_1 = b_1 \chi_1$ ,  $\zeta_2 = b_1 \chi_2$ ,  $\delta_1 = E^*(1-\nu^\circ)(f(1+\nu^*) + (1-\nu^*)) + E^\circ(1-(\nu^*)^2)(1-f)$ ,  $\delta_2 = E^\circ(\alpha_1(1+\nu^*) + \beta_1 \nu^*(1+\nu^*)) + E^*(\alpha_2(1+\nu^\circ) + \beta_2 \nu^\circ(1+\nu^\circ))$ ,  $\alpha_1 = (1+2f(\zeta_1-3\zeta_2) + 3(1/f^3 + 1/f^2 + 1/f + 3 + 6f^2)\zeta_2^2 - 6(f^2 + 1/f^2 + 2f)\zeta_1\zeta_2 + (f^2 + 3/f - 3 + 3f)\zeta_1^2)(1-f)$ ,  $\alpha_2 = f + 2(1-f)f(3\zeta_2 - \zeta_1) + (f^3 - 2f^2 + 10f - 18 + 9/f)\zeta_1^2 - 6(f^3 + f^2 - 2f - 3/f + 3/f^2)\zeta_1\zeta_2 + 9(2f^3 - 2f^2 + f - 2 + 1/f^3)\zeta_2^2$ ,  $\beta_1 = 4(f\zeta_1^2 - 6f\zeta_1\zeta_2 + 3(1+f+f^2)\zeta_2^2)(f-1)$ ,  $\beta_2 = -12((1-f)(\zeta_2(1+f+f^2)/f - \zeta_1))^2/f$ ,  $b_1 = E^\circ(1+\nu^*) - E^*(1+\nu^\circ)$ .

Окрім того, при розрахунку слід врахувати специфічні властивості гуми такі, як слабку стисливість та реологічні властивості. Для врахування слабкої стисливості скористаємося моментною схемою скінченного елемента для слабкостисливих матеріалів. Для моделювання в’язкопружної поведінки знайдемо вектор додаткового навантаження, який побудуємо, розглянувши повну потенціальну енергію системи:

$$\delta \tilde{\Pi} = \delta \tilde{W} - \delta A, \tag{2}$$

тут  $\delta A$  – варіація роботи розподілених об’ємних  $P^i$  і поверхневих  $F^i$  сил:

$$\delta A = \iiint_v P^i \delta u_i dv + \iint_s F^i \delta u_i ds,$$

$\delta W$  – варіація внутрішньої енергії деформації:

$$\delta \tilde{W} = \iiint_v \tilde{\sigma}^{ij} \delta \varepsilon_{ij} dv.$$

В’язкопружні властивості описуються визначальними рівняннями спадкового типу, в яких зв’язок між компонентами тензорів напружень і деформацій має залежність від часу:

$$\tilde{\sigma}^{ij} = \tilde{C}^{ijkl} \varepsilon_{kl}, \tag{3}$$

В’язкопружна поведінка гуми та гумовокордного матеріалу моделюється за допомогою спадкової теорії Больцмана-Вольтерра, тоді тензор механічних властивостей представиться інтегральним оператором:

$$\tilde{C}^{ijkl} \varphi = C_0^{ijkl} \left[ \varphi(t) - \int_0^t \frac{(C_0^{ijkl} - C_\infty^{ijkl})}{C_0^{ijkl}} e^{-(t-\tau)} \varphi(\tau) d\tau \right],$$

де  $C_0^{ijkl}$  і  $C_\infty^{ijkl}$  – тензори миттєвих та тривалих модулів пружності матеріалу відповідно.

Розіб’ємо проміжок часу  $[0, t_n]$  на послідовність часових інтервалів  $[t_m, t_{m+1}]$ , де  $m = 0, \dots, n-1$ :

$$\tilde{C}^{ijkl} \varphi = C_0^{ijkl} \left[ \varphi(t_n) - \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(C_0^{ijkl} - C_\infty^{ijkl})}{C_0^{ijkl}} e^{-t_n} \int_{t_m}^{t_{m+1}} e^\tau \varphi(\tau) d\tau \right]. \tag{4}$$

При розв’язанні задачі в’язкопружності у виразі (3) з врахуванням (4) переходимо до скінченно-різницевої форми та, припускаючи, що переміщення  $u(t)$  і деформації  $\varepsilon(t)$  змінюються лінійно всередині кожного інтервалу часу, інтеграл у виразі (3) знаходиться таким чином:

$$\tilde{\sigma}^{ijkl} = C_0^{ijkl} \left[ \varepsilon_{kl}(t_n) - \frac{(C_0^{ijkl} - C_\infty^{ijkl})}{C_0^{ijkl}} \sum_{m=0}^{n-1} \varepsilon_{kl}(t_m) e^{-t_n} (e^{t_{m+1}} - e^{t_m}) \right].$$

Виділивши лінійні пружні складові

$$\sigma_{(e)}^{ij} = C_0^{ijkl} \varepsilon_{kl}(t_n),$$

та в'язкопружні складові тензора напружень

$$\sigma_{(v)}^{ij} = -\left(C_0^{ijkl} - C_\infty^{ijkl}\right) \sum_{m=0}^{n-1} \varepsilon_{kl}(t_m) e^{-t_n} \left(e^{t_{m+1}} - e^{t_m}\right),$$

вираз (2) запишемо у вигляді:

$$\delta\tilde{\Pi} = \iiint_V \left(\sigma_{(e)}^{ij} + \sigma_{(v)}^{ij}\right) \delta\varepsilon_{ij} dV - \delta A. \tag{5}$$

Аналізуючи вираз (5), виділимо лінійні пружні та реологічні складові варіації енергії в'язкопружної деформації. Лінійні складові є основою формування матриці жорсткості  $M$  скінченного елемента і мають наступний вигляд:

$$\iiint_V C_0^{ijkl} \varepsilon_{kl}(t_n) \delta\varepsilon_{ij} dV = M^{ph} u_p(t_n) \delta u_h. \tag{6}$$

Реологічні складові варіації енергії деформації запишуться у вигляді:

$$-\iiint_V \left(C_0^{ijkl} - C_\infty^{ijkl}\right) \sum_{m=0}^{n-1} \varepsilon_{kl}(t_m) e^{-t_n} \left(e^{t_{m+1}} - e^{t_m}\right) \delta\varepsilon_{ij} dV = -\sum_{m=0}^{n-1} Q^{ph}(t_m) u_p(t_m) \delta u_h. \tag{7}$$

Припускаючи, що на тіло діє лише розподілене поверхневе навантаження, яке можна звести до зосереджених сил у кожному вузлі, та використовуючи співвідношення (6) і (7), варіація потенціальної енергії набуває вигляду:

$$\left( M^{ph} u_p(t_n) - \sum_{m=0}^{n-1} Q^{ph}(t_m) u_p(t_m) - F^h \right) \delta u_h = 0, \tag{8}$$

де  $F^h = \iint_s F^i ds$ .

Враховуючи, що варіація переміщень не може дорівнювати нулю, із (8) запишемо систему розв'язувальних рівнянь в'язкопружності наступним чином:

$$M^{ph} u_p(t_n) = \sum_{m=0}^{n-1} Q^{ph}(t_m) u_p(t_m) + F^h. \tag{9}$$

Наведені підходи реалізовані у межах програмного комплексу "МІРЕЛА+" [13], за допомогою якого проведено розрахунок описаного вище віброізолятора. Віброізолятор розраховувався при двох схемах армування у гумовокордному шарі: перша – паралельними волокнами у площині, перпендикулярній осі віброізолятора, друга – гумовокордний шар складається з двох шарів однакової товщини, у одному з яких маємо паралельні волокна, розташовані у площині, перпендикулярній осі віброізолятора, у другому маємо аналогічне армування, але волокна розташовані перпендикулярно до волокон першого шару.

Залежності осадки віброізолятора від часу представлені на рис. 2а (перша схема армування) та рис. 2б (друга схема армування).

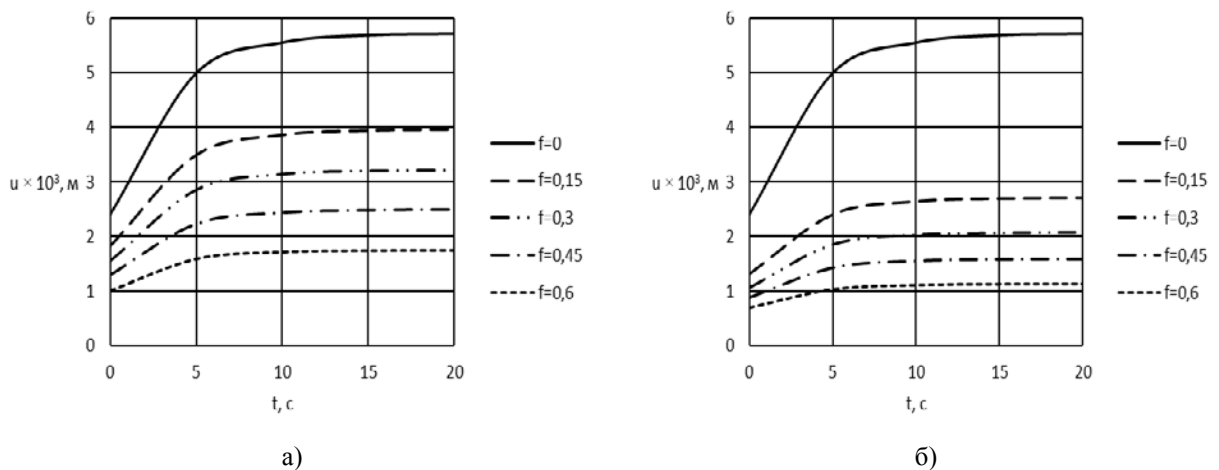


Рис. 2. Залежність осадки віброізолятора від часу

**Висновки**

З аналізу напружено-деформованого стану можна зазначити, що більший вміст жорсткого волокна у композиті обумовлює зменшення максимальної осадки віброізолятора. З плином часу за рахунок повзучості гуми осадка зростає, і починаючи з деякого моменту часу, прямує до сталої величини. При наявності взаємно перпендикулярних волокон (два шари) осадка спадає у порівнянні з відповідними значеннями для одного шару. Це пов'язано з тим, що взаємно перпендикулярні волокна чинять опір деформуванню у поперечному напрямку, що зменшує деформацію (осадку) у осьовому напрямку. Ці результати можна використати при проектуванні віброізоляторів для вибору марок матеріалів та схем армування у гумовокордному матеріалі.

**Список використаної літератури**

1. Большаков В.И. Асимптотические методы расчета композитных материалов с учетом внутренней структуры / В.И. Большаков, И.В. Андрианов, В.В. Данишевский. – Днепропетровск: "Пороги", 2008. – 196 с.
2. Механика композитов. Т.3. Статистическая механика и эффективные свойства материалов / [Л.П. Хорошун, Б.П. Маслов, Е.Н. Шикула, Л.В. Назаренко]; ред. Л.П. Хорошун. – К.: Наук. думка, 1993. – 390 с.
3. Kwon Y.W. Multiscale Modeling and Simulation of Composite Materials and Structures / Y.W. Kwon, D.H. Allen, R. Talreja. – New York: Springer, 2007. – 630 p.
4. Куимова Е.В. Численное прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик однонаправленного волокнистого композита с вязкоупругими компонентами / Е.В. Куимова, Н.А. Труфанов // Вестник СамГУ. Естественная серия. – 2009. – №4(70) – С. 129-148.
5. Gosz M. Effect of a viscoelastic interface on the transverse behavior of fiber-reinforced composites / M. Gosz, B. Moran, J.D. Achenbach // International Journal of Solids and Structures. – 1991. – Vol. 27. – P. 1757-1771.
6. Zhang Y. Nonlinear viscoelastic micromechanical analysis of fibre-reinforced polymer laminates with damage evolution / Y. Zhang, Z. Xia, F. Ellyin // International Journal of Solids and Structures. – 2005. – V. 42, Issue 2. – P. 591-604.
7. Фильштинський Л.А. Моделювання композитного матеріалу з в'язкопружними компонентами / Л.А. Фильштинський, П.І. Загряжська // Вісник Запорізького національного університету. – Запоріжжя: ЗНУ, 2010. – № 2. – С. 141-144.
8. Метод ориентационного усреднения в механике материалов / [А.Ж. Лагздинь, В.П. Тамуж, Г.А. Тетерс, А.Ф. Крегерс]. – Рига: Зинатне, 1989. – 190 с.
9. Зингерман К.М. Расчет напряжений вблизи жестких включений в телах из резиноподобного вязкоупругого материала с четырехпараметрическим ядром релаксации при конечных плоских деформациях / К.М. Зингерман, О.А. Рябова // Труды восемнадцатого симпозиума "Проблемы шин и резинокордных композитов". – М.: Изд-во ООО "Научно-технический центр "НИИШП", Т.1. – 2007. – С. 158-163.
10. Рябова О.А. Об учете взаимовлияния кордных нитей в резинокордном композите при конечных деформациях / О.А. Рябова, К.М. Зингерман // Труды восемнадцатого симпозиума "Проблемы шин и резинокордных композитов". – М.: Изд-во ООО "Научно-технический центр "НИИШП", Т.2. – 2007. – С. 146-149.
11. Aboudi J. Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach / J. Aboudi, S.M. Arnold, V.A. Bednarczyk. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. – 1006 p.
12. Barbero E.J. Finite Element Analysis of Composite Materials (Composite Materials: Design and Analysis) / E.J. Barbero. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – 360 p.
13. Гребенюк С.М. Напружено-деформований стан просторових конструкцій на основі гомогенізації волокнистих композитів Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. – 319 с.



УДК 519.8

В.М. ГОРБАЧУК, М.С.ДУНАЄВСЬКИЙ, С.-Б. СУЛЕЙМАНОВ  
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України**ПОДАТКОВА КОНКУРЕНЦІЯ І КООПЕРАЦІЯ ЗА СВІТОВІ КОРПОРАЦІЇ**

Глобальне поширення інформаційно-комунікаційних технологій загострює міжнародну конкуренцію, актуальну для України. Гетерогенність країн спонукає фірми до більшого рівноважного (за Нешем) податку в (більшій) країні 1 (до податкової асиметрії), а відтак до звітування фірмами більшого прибутку в (меншій) країні 2. Якщо країна 1 підвищує свою податкову ставку  $t_1$ , то збільшує податкову базу країни 2 і стимулює країну 2 до підвищення своєї податкової ставки  $t_2$ , і навпаки: податки країн  $i = 1, 2$  є стратегічними доповнювачами. Податкова конкуренція веде до втрати податкової бази країни 1. При цьому (сумарний) звітний прибуток фірм у країні 1 перевищує звітний прибуток у країні 2, а фіскальні надходження у країні 1 перевищують фіскальні надходження у країні 2.

Ключові слова: конкуренція, кооперація, корпорація, асиметрія, гетерогенність.

В.М. ГОРБАЧУК, М.С.ДУНАЕВСКИЙ, С.-Б. СУЛЕЙМАНОВ  
Институт кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины**НАЛОГОВАЯ КОНКУРЕНЦИЯ И КООПЕРАЦИЯ ЗА МИРОВЫЕ КОРПОРАЦИИ**

Глобальное распространение информационно-коммуникационных технологий обостряет международную конкуренцию, актуальную для Украины. Гетерогенность стран побуждает фирмы к большему равновесному (по Нэшу) налогу в (большей) стране 1 (к налоговой асимметрии), а поэтому к отчетности фирмами большей прибыли в (меньшей) стране 2. Если страна 1 повышает свою налоговую ставку  $t_1$ , то увеличивает налоговую базу страны 2 и стимулирует страну 2 к повышению своей налоговой ставки  $t_2$ , и наоборот: налоги стран  $i = 1, 2$  являются стратегическими дополнителями. Налоговая конкуренция ведет к потере налоговой базы страны 1. При этом (суммарная) отчетная прибыль фирм в стране 1 превышает отчетную прибыль в стране 2, а фискальные поступления в стране 1 превышают фискальные поступления в стране 2.

Ключевые слова: конкуренция, кооперация, корпорация, асимметрия, гетерогенность.

V.M. GORBACHUK, M.S.DUNAIEVSKYI, S.-B. SULEIMANOV  
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics, National Academy of Sciences of Ukraine**TAX COMPETITION AND COOPERATION FOR WORLD CORPORATIONS**

The global proliferation of information and communication technologies aggravates the international competition, topical for Ukraine today. Heterogeneity of countries induces firms to a larger (Nash) equilibrium tax in the bigger country 1 (to a tax asymmetry), and therefore to corporate reporting of a higher profit in the smaller country 2. If the country 1 increases its tax rate  $t_1$ , then it raises the tax base of country 2 and the incentive of the country 2 to hike its tax rate  $t_2$ , and vice versa: the taxes of countries  $i = 1, 2$  are strategic complements. The tax competition leads to the loss of tax base for country 1. At the same time, the total profit reported in country 1 exceeds the total profit reported in country 2 while the fiscal revenues in country 1 exceed the fiscal revenues in country 2.

A lower value of the parameter  $\delta$  in the costs for profit shifting among countries stands for the lower tax rates in countries, a lower difference between the rates and a higher tax competition, the lower joint fiscal revenues  $R(t_1, t_2) = R_1(t_1, t_2) + R_2(t_1, t_2)$ . This fact creates incentives for cooperation (fiscal harmonization) of the states. Then, at the absence of transfers among countries, those incentives may be sufficient for the inequality  $R_i(t_1, t_2) \leq R_i(1, 1)$  holding at some threshold value of  $\delta$ . At  $\delta \in (\delta_2, \delta_1]$  the country 1 has an incentive to cooperation while the country 2 does not. A potential advantage of the smaller country 2 is its lower equilibrium tax rate  $t_2 < t_1$ , implying growth of the profit reported on its territory (its tax base) at the expense of the country 1. As cooperation eliminates this advantage, then at  $\delta > \delta_2$  the country 2 has higher propensity to tax competition than to tax cooperation. On the international capital markets a smaller country has a lower market power and therefore enters the tax competition, decreasing tax rate for capital on its territory: under competition the gain of country 2 is larger than that of country 1, and under cooperation the gains of countries 1 and 2 are the same.

Keywords: competition, cooperation, corporation, asymmetry, heterogeneity.

**Постановка проблеми**

Конкуренція є рушійною силою для ефективної роботи як приватного, так і громадського сектору. У приватному секторі конкуренція сприятиме ефективності тому, що фірми, які найкраще задовольняють споживчим перевагам, виживатимуть і процвітатимуть, а інші втрачатимуть споживачів і зазнаватимуть збитків. Оскільки конкуренція дисциплінує всіх, то конкуренція серед урядів та юрисдикцій спонукатиме їх найкраще задовольняти волю їхніх резидентів [1]. Коли уряд або юрисдикція не може задовольняти потреби своїх резидентів, останні голосуватимуть своїми ногами і переходитимуть до інших (часто – сусідніх) юрисдикцій, які пропонують кращі умови [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Податкова конкуренція не включає фіскальну взаємодію серед урядів унаслідок зовнішніх ефектів громадського продукту, де резиденти однієї юрисдикції споживають громадські продукти, які забезпечують сусідні юрисдикції. Наприклад, податок на капітал змушуватиме капітал шукати кращої віддачі в альтернативних юрисдикціях, а податок на дохід змушуватиме мобільних працівників змінювати юрисдикцію. Оскільки втрата податкової бази однією юрисдикцією означає виграш інших юрисдикцій, то мобільність веде до зовнішніх ефектів серед юрисдикцій [3].

Глобалізація спонукає до створення транснаціональних фірм з підрозділами в різних країнах. В силу практики оподаткування за джерелом доходу, транснаціональна компанія (ТНК) має мотивацію зсувати прибуток і дохід між своїми територіальними підрозділами, щоб зменшувати свої загальні податкові зобов'язання [4; 5]. Наслідком цього є податкова конкуренція між країнами, а також виклики для податкових служб по всьому світу [3; 6]. Коли країни вибирають свої податкові ставки неодноразомно, то може існувати ефект податкового лідерства.

Країни, які користувалися своїм лідерством у встановленні високих податкових ставок на корпоративний прибуток, дедалі більше вимушені конкурувати з іншими юрисдикціями для залучення мобільних інвестицій і прибутків. Тому вважається, що менші країни, зіштовхуючись з більш еластичними податковими базами (еластичнішою пропозицією капіталу) порівняно з більшими країнами, мають сильніші стимули пропонувати низькі податкові ставки. Ці ставки також залежать від стратегічної поведінки та політичного впливу. Якщо у 1982 р. малі та великі країни мали середню податкову ставку 38.9% та 43.7% відповідно, то у 1999 р. малі та великі країни мали середню податкову ставку 31.1% та 33.8% відповідно [7]. Те, що при цьому в малих країнах ставка знизилася на 8.8%, а у великих – на 9.9%, є одним з наслідків зростаючої міжнародної податкової конкуренції, при якій великі країни користуються ринковою владою, встановлюючи вищі податкові ставки [8].

Якщо ТНК працює у двох державах (великій і малій), то кожна з держав конкурує з іншою, встановлюючи свій податок на корпоративний дохід на своїй території [9]. Тоді послідовна податкова рівновага (Штакельберга) завжди є Парето-домінантною відносно одночасної податкової рівноваги (Неша), причому кожній державі бути податковим послідовником (встановлювати податок після отримання інформації про податок іншої держави) вигідніше, ніж бути податковим лідером.

Замість мобільного капіталу можна досліджувати мобільний прибуток для двох країн різних ринкових обсягів (нехай країна 1 є великою, а країна 2 – малою) і двох ТНК (позначимо їх *a* та *b*) з підрозділами в кожній країні. Податкове лідерство великої держави є ризик-домінантним відносно податкового лідерства малої держави, що відрізняється від відомих результатів з неявним припущенням щодо еластичності податкового відгуку.

**Мета дослідження**

Нехай обернений попит на однорідний продукт у країнах *i* = 1, 2 задається лінійною функцією

$$p_i(q_i) = \gamma_i - \beta q_i, \tag{1}$$

де *q<sub>i</sub>* – обсяг купівлі даного продукту в країні *i*, *p<sub>i</sub>* – ціна продукту в країні *i*,  $\gamma_i$  та  $\beta$  – деякі додатні коефіцієнти. Нерівність  $\gamma_1 > \gamma_2$  означає, що у великій країні 1 вища готовність платити за продукт, ніж у малій країні 2 (цього можна очікувати, коли велика країна має вищий дохід на душу населення). Нехай підрозділи ТНК *a* та *b* конкурують за Курно у кожній країні 1, 2. Якщо питомі виробничі та транспортні витрати однакові й дорівнюють нулю, то прибуток ТНК *j* = *a, b* у країні *i* = 1, 2 становить

$$\pi_i^j = p_i(q_i^a + q_i^b) \times q_i^j, \tag{2}$$

де *q<sub>i</sub><sup>j</sup>* – обсяг продажу продукту фірмою *j* в країні *i*. Тоді сумарний реалізований прибуток фірми *j* в обох країнах становить  $\pi_1^j + \pi_2^j$ . Він має дорівнювати сумарному звітному прибутку фірми *j*:

$$\tilde{\pi}_1^j + \tilde{\pi}_2^j = q_1^j p_1(q_1^a + q_1^b) + q_2^j p_2(q_2^a + q_2^b), \tag{3}$$

де  $\tilde{\pi}_i^j$  – звітний прибуток фірми  $j$  в країні  $i$ . Якщо реалізований прибуток залежить від споживачів, то звітний прибуток залежить від рішення фірми. Коли реалізований прибуток відрізняється від звітного, тоді фірма зазнає витрат:

$$C(\pi_j^i, \tilde{\pi}_j^i) = 2\delta(\pi_j^i - \tilde{\pi}_j^i)^2, \quad (4)$$

де  $\delta$  – додатний параметр податкової конкуренції (вартість зсуву прибутку) [10]. Мінімізуючи свої загальні податкові зобов'язання, фірма бере до уваги ці витрати на зсув прибутку між країнами 1, 2. Ці витрати не залежать від напряму зсуву між країнами, не впливають на значення власне звітних прибутків, але включають витрати на експертів з бухгалтерського обліку, сподівані штрафи з боку країн, сподівані ринкові санкції за неточності даних.

Уряд країни  $i$  встановлює податкову ставку  $t_i \in [0,1]$  для звітного прибутку ТНК на території (в межах юрисдикції) даної країни. Оскільки сумарний звітний прибуток у країні  $i$  становить  $\tilde{\pi}_i = \tilde{\pi}_i^a + \tilde{\pi}_i^b$ , то податкові надходження країни  $i$  дорівнюють  $R_i = t_i \tilde{\pi}_i = t_i(\tilde{\pi}_i^a + \tilde{\pi}_i^b)$ . Уряд намагається максимізувати ці надходження [11]. Оскільки зсув прибутку не впливає споживчий надлишок, то цей надлишок можна не брати до уваги в цільовій функції уряду країни. Нехай уряди вибирають свої податкові ставки, максимізуючи свої податкові надходження, після чого ТНК (фірми) конкурують за Курно на ринку кожної країни, обираючи обсяг  $q_i^j$  продажу (виробництва) в кожній країні та частку відповідного прибутку для зсуву в юрисдикцію з нижчим податком. Мета дослідження полягає в з'ясуванні наслідків податкової конкуренції і кооперації країн за світові корпорації.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Фірма  $j = a, b$  максимізує свій вигравш (після податків):

$$f^j = (1-t_1)\tilde{\pi}_1^j + (1-t_2)\tilde{\pi}_2^j - C(\pi_1^j, \tilde{\pi}_1^j) = (1-t_1)\tilde{\pi}_1^j + (1-t_2)(\pi_1^j + \pi_2^j - \tilde{\pi}_1^j) - C(\pi_1^j, \tilde{\pi}_1^j) \quad (5)$$

Фірма  $a$  при умовах (1)–(5) максимізує по  $q_1^a$ ,  $q_2^a$ ,  $\tilde{\pi}_1^a$  свій вигравш:

$$\begin{aligned} f^a &= (1-t_1)\tilde{\pi}_1^a + (1-t_2)(\pi_1^a + \pi_2^a - \tilde{\pi}_1^a) - C(\pi_1^a, \tilde{\pi}_1^a) = \\ &= (1-t_1)\tilde{\pi}_1^a + (1-t_2)[q_1^a p_1(q_1^a + q_1^b) + q_2^a p_2(q_2^a + q_2^b) - \tilde{\pi}_1^a] - 2\delta(\pi_1^a - \tilde{\pi}_1^a)^2 = \\ &= (1-t_1)\tilde{\pi}_1^a + (1-t_2)\{q_1^a[\gamma_1 - \beta(q_1^a + q_1^b)] + q_2^a[\gamma_2 - \beta(q_2^a + q_2^b)] - \tilde{\pi}_1^a\} - \\ &\quad - 2\delta\{q_1^a[\gamma_1 - \beta(q_1^a + q_1^b)] - \tilde{\pi}_1^a\}^2, \end{aligned}$$

звідки впливають необхідні умови першого порядку максимізації:

$$0 = \frac{\partial f^a}{\partial \tilde{\pi}_1^a} = 1-t_1 - (1-t_2) + 4\delta\{q_1^a[\gamma_1 - \beta(q_1^a + q_1^b)] - \tilde{\pi}_1^a\}, \quad (6)$$

$$\tilde{\pi}_1^a = q_1^a[\gamma_1 - \beta(q_1^a + q_1^b)] - \frac{t_1-t_2}{4\delta} = \pi_1^a - \frac{t_1-t_2}{4\delta}, \quad (7)$$

тобто у країні 1 фірми  $a$  звітний прибуток дорівнює фактичному мінус певне додатне (від'ємне) значення для  $t_1 > t_2$  ( $t_1 < t_2$ ), яке спадає з ростом  $\delta$ . Крім того, враховуючи отриману рівність (6), знаходимо функцію реакції фірми  $a$  на фірму  $b$  для ринку 1:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial f^a}{\partial q_1^a} = (1-t_2)(\gamma_1 - 2\beta q_1^a - \beta q_1^b) - 4\delta\{q_1^a[\gamma_1 - \beta(q_1^a + q_1^b)] - \tilde{\pi}_1^a\}(\gamma_1 - 2\beta q_1^a - \beta q_1^b) = \\ &= (1-t_2)(\gamma_1 - 2\beta q_1^a - \beta q_1^b) - (t_1-t_2)(\gamma_1 - 2\beta q_1^a - \beta q_1^b) = (1-t_2-t_1+t_2)(\gamma_1 - 2\beta q_1^a - \beta q_1^b), \\ &\quad q_1^a = \frac{\gamma_1 - \beta q_1^b}{2\beta}. \end{aligned} \quad (8)$$

Нарешті, функцію реакції фірми  $a$  на фірму  $b$  для ринку 2 визначає рівняння:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial f^b}{\partial q_2^a} = (1-t_2)(\gamma_2 - 2\beta q_2^a - \beta q_2^b), \\ &\quad q_2^a = \frac{\gamma_2 - \beta q_2^b}{2\beta}. \end{aligned} \quad (9)$$

В силу симетрії, фірма  $b$  має функції реакції, аналогічні функціям (8) і (9):

$$q_1^b = \frac{\gamma_1 - \beta q_1^a}{2\beta}, \quad q_2^b = \frac{\gamma_2 - \beta q_2^a}{2\beta},$$

звідки в силу рівнянь (8) і (9) отримуємо рівноважні за Курно обсяги продажу:

$$2\beta q_1^b = \gamma_1 - \beta q_1^a = \gamma_1 - \frac{\beta(\gamma_1 - \beta q_1^b)}{2\beta} = \gamma_1 - \frac{\gamma_1}{2} + \frac{\beta q_1^b}{2}, \quad 4\beta q_1^b = \gamma_1 + \beta q_1^b,$$

$$q_1^b = \frac{\gamma_1}{3\beta} = q_1^a, \quad q_2^b = \frac{\gamma_2}{3\beta} = q_2^a.$$

Звідси в силу рівняння (1) впливають рівноважні ціни на ринках:

$$p_1 = \gamma_1 - \beta(q_1^a + q_1^b) = \gamma_1 - \beta\left(\frac{\gamma_1}{3\beta} + \frac{\gamma_1}{3\beta}\right) = \frac{\gamma_1}{3}, \quad p_2 = \frac{\gamma_2}{3},$$

а в силу рівняння (2) впливають рівноважні прибутки фірм:

$$\pi_i^j = p_i(q_i^a + q_i^b) \times q_i^j = \frac{\gamma_i}{3} \times \frac{\gamma_i}{3\beta} = \frac{(\gamma_i)^2}{9\beta}, \quad i=1,2, \quad j=a,b. \quad (10)$$

Знайдені значення  $q_i^j$ ,  $p_i$  не залежать від  $t_i$ , тому що не впливають на величини  $\tilde{\pi}_i^j$ ,  $i=1,2$ ,  $j=a,b$ . В силу рівняння (7) та симетрії маємо:

$$\tilde{\pi}_1^a = \pi_1^a - \frac{t_1 - t_2}{4\delta} = \frac{(\gamma_1)^2}{9\beta} - \frac{t_1 - t_2}{4\delta} = \tilde{\pi}_1^b, \quad (11)$$

звідки

$$\tilde{\pi}_2^a = \pi_1^a + \pi_2^a - \tilde{\pi}_1^a = \frac{(\gamma_1)^2}{9\beta} + \frac{(\gamma_2)^2}{9\beta} - \frac{(\gamma_1)^2}{9\beta} + \frac{t_1 - t_2}{4\delta} = \frac{(\gamma_2)^2}{9\beta} - \frac{t_2 - t_1}{4\delta} = \tilde{\pi}_2^b. \quad (12)$$

Для нормалізації величин  $\pi_i^j$  припустимо, що  $\gamma_1 = \frac{3}{2}\sqrt{\beta(1+\varepsilon)} > \frac{3}{2}\sqrt{\beta(1-\varepsilon)} = \gamma_2$ , де  $\varepsilon \in (0,1)$  є параметром розміру ринку. Звідси в силу рівностей (10) впливає:

$$\pi_1^a = \pi_1^b = \frac{(\gamma_1)^2}{9\beta} = \frac{9\beta(1+\varepsilon)}{4 \times 9\beta} = \frac{1+\varepsilon}{4}, \quad \pi_1 = \pi_1^a + \pi_1^b = \frac{1+\varepsilon}{2},$$

$$\pi_2^a = \pi_2^b = \frac{(\gamma_2)^2}{9\beta} = \frac{9\beta(1-\varepsilon)}{4 \times 9\beta} = \frac{1-\varepsilon}{4}, \quad \pi_2 = \pi_2^a + \pi_2^b = \frac{1-\varepsilon}{2}.$$

Тоді рівності (11), (12) дають

$$\tilde{\pi}_1^b = \tilde{\pi}_1^a = \pi_1^a - \frac{t_1 - t_2}{4\delta} = \frac{1+\varepsilon}{4} - \frac{t_1 - t_2}{4\delta}, \quad \tilde{\pi}_1 = \frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{t_1 - t_2}{2\delta},$$

$$\tilde{\pi}_2^b = \tilde{\pi}_2^a = \frac{(\gamma_2)^2}{9\beta} - \frac{t_2 - t_1}{4\delta} = \frac{1-\varepsilon}{4} - \frac{t_2 - t_1}{4\delta}, \quad \tilde{\pi}_2 = \frac{1-\varepsilon}{2} - \frac{t_2 - t_1}{2\delta}.$$

Оскільки сумарний звітний прибуток в обох країнах  $\tilde{\pi}_1 + \tilde{\pi}_2 = 1$  не залежить від  $t_1$ ,  $t_2$ , то вибір податкових ставок країнами зводиться до гри з нульовою сумою. При  $t_1 = t_2$  сумарний звітний прибуток у країні 1  $\tilde{\pi}_1 = \frac{1+\varepsilon}{2}$  чи країні 2  $\tilde{\pi}_2 = \frac{1-\varepsilon}{2}$  повністю визначається параметром  $\varepsilon$  розміру ринку. У випадку кооперації країн вони максимізуватимуть по  $t_1$ ,  $t_2 \in [0,1]$  функцію спільних фіскальних надходжень:

$$R(t_1, t_2) = t_1 \tilde{\pi}_1 + t_2 \tilde{\pi}_2 = t_1 \left( \frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{t_1 - t_2}{2\delta} \right) + t_2 \left( \frac{1-\varepsilon}{2} - \frac{t_2 - t_1}{2\delta} \right), \quad R(1,1) = 1 = \tilde{\pi}_1 + \tilde{\pi}_2.$$

Припустимо, що країни не кооперуються та не ділять між собою сумарні фіскальні надходження. Уряд країни  $i$  вибирає рівень  $t_i$ , що максимізує фіскальні надходження на її території  $R_i(t_1, t_2) = t_i \tilde{\pi}_i$ , звідки впливають функції реакції  $t_i(t_j)$ :

$$0 = \frac{\partial R_1}{\partial t_1} = \frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{t_1-t_2}{2\delta} - \frac{t_1}{2\delta} = \frac{(1+\varepsilon)\delta - t_1 + t_2 - t_1}{2\delta}, \quad t_1(t_2) = \frac{(1+\varepsilon)\delta + t_2}{2}, \quad (13)$$

$$0 = \frac{\partial R_2}{\partial t_2} = \frac{1-\varepsilon}{2} - \frac{t_2-t_1}{2\delta} - \frac{t_2}{2\delta} = \frac{(1-\varepsilon)\delta - t_2 + t_1 - t_2}{2\delta},$$

$$t_2(t_1) = \frac{(1-\varepsilon)\delta + t_1}{2} = \frac{(1-\varepsilon)\delta + 0.5(1+\varepsilon)\delta + 0.5t_2}{2} = \frac{2(1-\varepsilon)\delta + (1+\varepsilon)\delta + t_2}{4}. \quad (14)$$

Оскільки  $\frac{\partial^2 R_i}{\partial (t_i)^2} = -\frac{1}{\delta} < 0$ , то функція  $R_i(t_1, t_2)$  увігнута по  $t_i$ . Система рівнянь (13), (14) дає

рівноважні за Нешем податкові ставки:

$$4t_2 - t_2 = 2\delta - 2\varepsilon\delta + \delta + \varepsilon\delta = 3\delta - \varepsilon\delta, \quad t_2 = \delta \left(1 - \frac{\varepsilon}{3}\right), \quad (15)$$

$$2t_1 = (1+\varepsilon)\delta + t_2 = (1+\varepsilon)\delta + \delta \left(1 - \frac{\varepsilon}{3}\right) = 2\delta + \frac{2\varepsilon\delta}{3}, \quad t_1 = \delta \left(1 + \frac{\varepsilon}{3}\right). \quad (16)$$

Таким чином, гетерогенність країн спонукає фірми до більшого рівноважного податку в (більшій) країні 1 (до податкової асиметрії), а відтак до звітування більшого прибутку в (меншій) країні 2 [11]. Якщо країна 1 підвищує свою податкову ставку  $t_1$ , то збільшує податкову базу країни 2 і стимул країни 2 до підвищення своєї податкової ставки  $t_2$ , і навпаки: податки країн 1 і 2 є стратегічними доповнювачами.

Оскільки  $0 \leq t_2 < t_1 \leq 1$ , то

$$0 \leq \delta \left(1 - \frac{\varepsilon}{3}\right) < \delta \left(1 + \frac{\varepsilon}{3}\right) \leq 1, \quad 0 \leq 3\delta - \varepsilon\delta < 3\delta + \varepsilon\delta \leq 3, \quad \frac{\varepsilon\delta}{3} \leq \delta \leq \frac{3}{3+\varepsilon} < 1, \quad (17)$$

що означає обмеження для податкової ставки і звітного прибутку. Податкова конкуренція веде до втрати податкової бази (більшої) країни 1. З рівностей (15), (16) маємо величину виграшу країни 2 за ставкою:

$$t_1 - t_2 = \delta \left(1 + \frac{\varepsilon}{3}\right) - \delta \left(1 - \frac{\varepsilon}{3}\right) = \frac{2\varepsilon\delta}{3} \leq 2\delta, \quad (18)$$

який мотивує обидві фірми зсувати звітний прибуток від більшої до меншої країни. При цьому

$$\tilde{\pi}_1 = \frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{t_1-t_2}{2\delta} = \frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{2\varepsilon\delta}{3 \times 2\delta} = \frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{\varepsilon}{3} = \frac{1}{2} + \frac{3\varepsilon - 2\varepsilon}{6} = \frac{3+\varepsilon}{6},$$

$$\tilde{\pi}_2 = \frac{1-\varepsilon}{2} - \frac{t_2-t_1}{2\delta} = \frac{1-\varepsilon}{2} - \frac{-2\varepsilon\delta}{3 \times 2\delta} = \frac{1-\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{3} = \frac{1}{2} - \frac{3\varepsilon - 2\varepsilon}{6} = \frac{3-\varepsilon}{6},$$

тобто (сумарний) звітний прибуток у (більшій) країні 1 перевищує звітний прибуток у (меншій) країні 2.

Тому фіскальні надходження у країні 1 перевищують фіскальні надходження у країні 2:

$$R_1 = t_1 \tilde{\pi}_1 = \frac{\delta(3+\varepsilon) \times (3+\varepsilon)}{3 \times 6} > \frac{\delta(3-\varepsilon) \times (3-\varepsilon)}{3 \times 6} = t_2 \tilde{\pi}_2 = R_2.$$

Менше значення параметра  $\delta$  в силу співвідношень (15), (16), (18) означає нижчі податкові ставки в країнах, меншу різницю між ними і вищу податкову конкуренцію, менші спільні фіскальні надходження

$$R_1 + R_2 = \frac{\delta[(3+\varepsilon)^2 + (3-\varepsilon)^2]}{18} = \frac{\delta(9+6\varepsilon+\varepsilon^2+9-6\varepsilon+\varepsilon^2)}{18} = \frac{\delta(9+\varepsilon^2)}{9},$$

які, очевидно, менші за  $R(1,1)$ . Це створює стимули до кооперації (фіскальної гармонізації) держав. Тоді, за відсутності трансфертів між країнами, виникає питання про достатність цих стимулів, або про порогове значення  $\delta$ , при якому  $R_i(t_1, t_2) \leq R_i(1,1)$ ,

$$0 \leq R_1(1,1) - R_1(t_1, t_2) = \frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{\delta(3+\varepsilon)^2}{18} \quad \text{для } \delta \leq \frac{9(1+\varepsilon)}{(3+\varepsilon)^2} = \delta_1,$$

$$0 \leq R_2(1,1) - R_2(t_1, t_2) = \frac{1-\varepsilon}{2} - \frac{\delta(3-\varepsilon)^2}{18} \quad \text{для } \delta \leq \frac{9(1-\varepsilon)}{(3-\varepsilon)^2} = \delta_2.$$

Значимо, що з умови (17) випливають нерівності  $\delta \leq \delta_i$ , а також нерівність:

$$0 \geq \delta_2 - \delta_1 = \frac{9(1-\varepsilon)}{(3-\varepsilon)^2} - \frac{9(1+\varepsilon)}{(3+\varepsilon)^2} = \frac{9[(1-\varepsilon)(3+\varepsilon)^2 - (1+\varepsilon)(3-\varepsilon)^2]}{(3-\varepsilon)^2(3+\varepsilon)^2},$$

$$0 \geq (3+\varepsilon)^2 - \varepsilon(3+\varepsilon)^2 - (3-\varepsilon)^2 - \varepsilon(3-\varepsilon)^2 =$$

$$= (3+\varepsilon-3+\varepsilon)(3+\varepsilon+3-\varepsilon) - \varepsilon(9+6\varepsilon+\varepsilon^2+9-6\varepsilon+\varepsilon^2) =$$

$$= 12\varepsilon - \varepsilon(18+2\varepsilon^2) = 2\varepsilon(6-9-\varepsilon^2) = -2\varepsilon(3+\varepsilon^2).$$

Тоді при  $\delta \in (\delta_2, \delta_1]$  країна 1 має стимул до кооперації, а країна 2 – ні.

Потенційна перевага меншої країни 2 полягає у нижчій рівноважній податковій ставці  $t_2 < t_1$ , яка дозволяє збільшувати звітний прибуток на своїй території (свою податкову базу) на  $\frac{\varepsilon}{3}$  за рахунок країни 1.

Оскільки кооперація усуває цю перевагу, то при  $\delta > \delta_2$  країна 2 більше схильна до податкової конкуренції, ніж до кооперації. На міжнародних ринках капіталу менша країна має нижчу ринкову владу, а тому вступає у податкову конкуренцію, встановлюючи нижчу податкову ставку для капіталу на своїй території: при конкуренції виграш країни 2 більший, ніж країни 1, а при кооперації виграші країн 1 і 2 однакові [12; 13].

Отже, податкова конкуренція веде до заниження податків, при якому у більшій країні фіскальні надходження вищі, ніж у меншій країні. Оскільки податкова кооперація не завжди вигідна меншій країні, то виникає питання розподілу фіскальних надходжень за правилом:

$$R_i(\alpha) = (1-\alpha)t_i\tilde{\pi}_i + \alpha t_j\tilde{\pi}_j, \quad j \neq i, \quad i, j = 1, 2,$$

$$R_1(\alpha) = (1-\alpha)t_1\tilde{\pi}_1 + \alpha t_2\tilde{\pi}_2 = (1-\alpha)t_1\left(\frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{t_1-t_2}{2\delta}\right) + \alpha t_2\left(\frac{1-\varepsilon}{2} - \frac{t_2-t_1}{2\delta}\right),$$

$$R_2(\alpha) = \alpha t_1\tilde{\pi}_1 + (1-\alpha)t_2\tilde{\pi}_2 = \alpha t_1\left(\frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{t_1-t_2}{2\delta}\right) + (1-\alpha)t_2\left(\frac{1-\varepsilon}{2} - \frac{t_2-t_1}{2\delta}\right),$$

$$R_1(\alpha) + R_2(\alpha) = t_1\tilde{\pi}_1 + t_2\tilde{\pi}_2 = R(t_1, t_2) = R(\alpha), \tag{19}$$

де  $\alpha \in [0, 0.5)$  – частка (менша половини) власних фіскальних надходжень країни  $i$ , яку вона віддає країні  $j$ . Уряд країни  $i$  вибирає рівень  $t_i$ , що максимізує фіскальні надходження на її території  $R_i(\alpha)$ , звідки впливають функції реакції  $t_i(t_j)$ :

$$0 = \frac{\partial R_1(\alpha)}{\partial t_1} = (1-\alpha)\frac{1+\varepsilon}{2} - (1-\alpha)\frac{t_1-t_2}{2\delta} - (1-\alpha)\frac{t_1}{2\delta} + \alpha\frac{t_2}{2\delta} =$$

$$= \frac{(1-\alpha)(1+\varepsilon)\delta - (1-\alpha)(t_1-t_2) - (1-\alpha)t_1 + \alpha t_2}{2\delta} = \frac{(1-\alpha)(1+\varepsilon)\delta - 2(1-\alpha)t_1 + (1-\alpha)t_2 + \alpha t_2}{2\delta},$$

$$t_1(t_2, \alpha) = \frac{(1+\varepsilon)\delta}{2} + \frac{t_2}{2(1-\alpha)}, \tag{20}$$

$$0 = \frac{\partial R_2(\alpha)}{\partial t_2} = (1-\alpha)\frac{1-\varepsilon}{2} - (1-\alpha)\frac{t_2-t_1}{2\delta} - (1-\alpha)\frac{t_2}{2\delta} + \alpha\frac{t_1}{2\delta} =$$

$$= \frac{(1-\alpha)(1-\varepsilon)\delta - (1-\alpha)(t_2-t_1) - (1-\alpha)t_2 + \alpha t_1}{2\delta} = \frac{(1-\alpha)(1-\varepsilon)\delta - 2(1-\alpha)t_2 + (1-\alpha)t_1 + \alpha t_1}{2\delta},$$

$$t_2(t_1, \alpha) = \frac{(1-\varepsilon)\delta}{2} + \frac{t_1}{2(1-\alpha)}. \tag{21}$$

Оскільки  $\frac{\partial^2 R_i(\alpha)}{\partial (t_i)^2} = -\frac{1-\alpha}{\delta} < 0$ , то функція  $R_i(\alpha)$  увігнута по  $t_i$ . В силу рівнянь (20) і (21) нахил

функції відгуку менший, ніж 1, але більший, ніж 0.5:  $\frac{\partial t_1(t_2, \alpha)}{\partial t_2} = \frac{1}{2(1-\alpha)} = \frac{\partial t_2(t_1, \alpha)}{\partial t_1} < 1$  для  $\alpha \in [0, 0.5)$ .

Податки країн 1 і 2 є стратегічними доповнювачами:

$$0 < \frac{1}{2(1-\alpha)} = \frac{\partial t_1(t_1, \alpha)}{\partial t_2} = - \left( \frac{\partial^2 R_1(\alpha)}{\partial t_1 \partial t_2} \right) \left( \frac{\partial^2 R_1(\alpha)}{\partial (t_1)^2} \right)^{-1} = - \left( \frac{1}{2\delta} \right) \left( \frac{1-\alpha}{\delta} \right)^{-1}.$$

Система рівнянь (20), (21) дає рівноважні за Нешем податкові ставки:

$$2(1-\alpha)t_2 = (1-\alpha)(1-\varepsilon)\delta + t_1 = (1-\alpha)(1-\varepsilon)\delta + \frac{(1+\varepsilon)\delta}{2} + \frac{t_2}{2(1-\alpha)},$$

$$4(1-\alpha)^2 t_2 = 2(1-\alpha)^2 (1-\varepsilon)\delta + (1-\alpha)(1+\varepsilon)\delta + t_2,$$

$$t_2(1-2\alpha)(3-2\alpha) = t_2(2-2\alpha-1)(2-2\alpha+1) = t_2[2^2(1-\alpha)^2 - 1] =$$

$$= (1-\alpha)\delta[2(1-\alpha)(1-\varepsilon) + 1 + \varepsilon] = (1-\alpha)\delta(2-2\varepsilon-2\alpha+2\alpha\varepsilon+1+\varepsilon) = (1-\alpha)\delta(3-2\alpha-\varepsilon+2\alpha\varepsilon),$$

$$t_2(\alpha) = \frac{(1-\alpha)\delta[3-2\alpha-\varepsilon(1-2\alpha)]}{(1-2\alpha)(3-2\alpha)} = \delta(1-\alpha) \left( \frac{1}{1-2\alpha} - \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right); \quad (22)$$

$$t_1(\alpha) = \frac{(1+\varepsilon)\delta}{2} + \frac{t_2}{2(1-\alpha)} = \frac{(1+\varepsilon)\delta}{2} + \frac{\delta[3-2\alpha-\varepsilon(1-2\alpha)]}{2(1-2\alpha)(3-2\alpha)} =$$

$$= \frac{\delta[(1+\varepsilon)(1-2\alpha)(3-2\alpha) + 3-2\alpha-\varepsilon(1-2\alpha)]}{2(1-2\alpha)(3-2\alpha)} = \frac{\delta[\varepsilon(1-2\alpha)(3-2\alpha-1) + (3-2\alpha)(1-2\alpha+1)]}{2(1-2\alpha)(3-2\alpha)} =$$

$$= \frac{2\delta(1-\alpha)[\varepsilon(1-2\alpha)+3-2\alpha]}{2(1-2\alpha)(3-2\alpha)} = \delta(1-\alpha) \left( \frac{1}{1-2\alpha} + \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) > t_2(\alpha). \quad (23)$$

Умова  $t_2(\alpha) \geq 0$  передбачає нерівність:

$$\varepsilon \leq \frac{3-2\alpha}{1-2\alpha} = 1 + \frac{2}{1-2\alpha} \in (3, \infty), \quad (24)$$

що є наслідком лівої нерівності (17). Умова  $t_2(\alpha) \leq 1$  передбачає нерівність

$$\delta(1-\alpha)[\varepsilon(1-2\alpha)+3-2\alpha] \leq (1-2\alpha)(3-2\alpha), \quad \delta \leq \frac{(1-2\alpha)(3-2\alpha)}{(1-\alpha)[\varepsilon(1-2\alpha)+3-2\alpha]} = \delta(\alpha),$$

яка збігається з правою нерівністю (17) при  $\alpha = 0$ . Нерівність (23) відповідає висновкам [14; 15] (один з авторів роботи [15] – Нобелівський лауреат 2008 р.). Слід дослідити вплив збільшення  $\alpha$  на  $R_1(\alpha)$ ,  $R_2(\alpha)$ ,

$R(\alpha)$ , а також на фіскальний дисбаланс (чи вирівнювання)  $\frac{R_1(\alpha)}{R_2(\alpha)}$ . Рівності (22) і (23) дають:

$$\frac{\partial t_1(\alpha)}{\partial \alpha} = -\delta \left( \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} + \frac{1}{1-2\alpha} \right) + \delta(1-\alpha) \left( \frac{2}{(1-2\alpha)^2} + \frac{2\varepsilon}{(3-2\alpha)^2} \right) =$$

$$= \delta \left( -\frac{\varepsilon}{3-2\alpha} - \frac{1}{1-2\alpha} - \frac{2(1-\alpha)}{(1-2\alpha)^2} - \frac{2\varepsilon(1-\alpha)}{(3-2\alpha)^2} \right) = \delta \left( \frac{2\varepsilon(1-\alpha) - \varepsilon(3-2\alpha)}{(3-2\alpha)^2} + \frac{-2(1-\alpha) + 1 - 2\alpha}{(1-2\alpha)^2} \right) =$$

$$= \delta \left( \frac{1}{(1-2\alpha)^2} - \frac{\varepsilon}{(3-2\alpha)^2} \right) > 0 \quad (25)$$

для  $\frac{1}{(1-2\alpha)^2} > \frac{\varepsilon}{(3-2\alpha)^2}$ ,  $\varepsilon < \frac{(3-2\alpha)^2}{(1-2\alpha)^2}$ , що має місце за умови (24);

$$\frac{\partial t_2(\alpha)}{\partial \alpha} = -\delta \left( -\frac{\varepsilon}{3-2\alpha} + \frac{1}{1-2\alpha} \right) + \delta(1-\alpha) \left( \frac{2}{(1-2\alpha)^2} - \frac{2\varepsilon}{(3-2\alpha)^2} \right) =$$

$$= \delta \left( \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} - \frac{1}{1-2\alpha} + \frac{2(1-\alpha)}{(1-2\alpha)^2} - \frac{2\varepsilon(1-\alpha)}{(3-2\alpha)^2} \right) = \delta \left( \frac{-2\varepsilon(1-\alpha) + \varepsilon(3-2\alpha)}{(3-2\alpha)^2} + \frac{2(1-\alpha) - (1-2\alpha)}{(1-2\alpha)^2} \right) =$$

$$= \delta \left( \frac{1}{(1-2\alpha)^2} + \frac{\varepsilon}{(3-2\alpha)^2} \right) > \frac{\partial t_1(\alpha)}{\partial \alpha} > 0. \quad (26)$$

Наслідком посиленої стратегічної доповнюваності податків країн 1 і 2 є нерівності (25) і (26), тобто зростання податкових ставок в обох країнах. Аналогічно до податкової конкуренції на міжнародному ринку капіталу, в силу рівності (19) зниження рівня  $R_i(\alpha)$  веде до збільшення рівня  $R_j(\alpha)$  та мотивації встановлення вищої ставки  $t_j$ ,  $i \neq j$ . Міжнародна ціна капіталу вбирає частину вищої податкової ставки країни з ринковою владою. У більшій країні податкова база менш еластична до своєї власної податкової ставки, що підвищує рівноважні податкові ставки. Ліва нерівність (26) свідчить про більший вплив підвищення  $\alpha$  для країни 2, ніж для країни 1, а також про звуження різниці  $(t_1 - t_2)$ . Це зсуває податкову базу (звітний прибуток) від країни 2 до країни 1. Оскільки величина зсуву (звітного) прибутку від країни 2 до країни 1 пропорційна різниці  $(t_1 - t_2)$ , то звуження цієї різниці мотивує фірми до зменшення такого зсуву. Зважаючи на вартість зсуву прибутку відповідно до залежності (4), поділ фіскальних надходжень має ту перевагу, що не потребує ресурсів фірм для такого зсуву. При поділі фіскальних надходжень звітний прибуток країни 1 становить:

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_1(\alpha) &= \frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{t_1(\alpha)-t_2(\alpha)}{2\delta} = \frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{2\delta(1-\alpha)\varepsilon}{2\delta(3-2\alpha)} = \frac{1+\varepsilon}{2} - \frac{(1-\alpha)\varepsilon}{3-2\alpha} = \\ &= \frac{(1+\varepsilon)(3-2\alpha)-2\varepsilon(1-\alpha)}{2(3-2\alpha)} = \frac{3-2\alpha+3\varepsilon-2\alpha\varepsilon-2\varepsilon+2\alpha\varepsilon}{2(3-2\alpha)} = \frac{3-2\alpha+\varepsilon}{2(3-2\alpha)} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) > 0, \end{aligned} \quad (27)$$

де  $t_1(\alpha) = \delta(1-\alpha) \left( \frac{1}{1-2\alpha} + \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right)$ ,  $t_2(\alpha) = \delta(1-\alpha) \left( \frac{1}{1-2\alpha} - \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right)$ ,  $t_1(\alpha) - t_2(\alpha) = \frac{2\delta(1-\alpha)\varepsilon}{3-2\alpha}$ ;

$$\frac{\partial \tilde{\pi}_1(\alpha)}{\partial \alpha} = \frac{\varepsilon}{(3-2\alpha)^2} > 0. \quad (28)$$

Аналогічно при цьому звітний прибуток країни 2 дорівнює:

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_2(\alpha) &= \frac{1-\varepsilon}{2} - \frac{t_2(\alpha)-t_1(\alpha)}{2\delta} = \frac{1-\varepsilon}{2} + \frac{2\delta(1-\alpha)\varepsilon}{2\delta(3-2\alpha)} = \frac{1-\varepsilon}{2} + \frac{(1-\alpha)\varepsilon}{3-2\alpha} = \\ &= \frac{(1-\varepsilon)(3-2\alpha)+2\varepsilon(1-\alpha)}{2(3-2\alpha)} = \frac{3-2\alpha-3\varepsilon+2\alpha\varepsilon+2\varepsilon-2\alpha\varepsilon}{2(3-2\alpha)} = \frac{3-2\alpha-\varepsilon}{2(3-2\alpha)} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) > 0 \end{aligned} \quad (29)$$

для  $\varepsilon < 3-2\alpha < 2$ ; (30)

$$\frac{\partial \tilde{\pi}_2(\alpha)}{\partial \alpha} = -\frac{\varepsilon}{(3-2\alpha)^2} < 0. \quad (31)$$

Отже, чим більше значення  $\alpha$ , тим більші величини:

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_2 - \tilde{\pi}_2(\alpha) &= \frac{3-\varepsilon}{6} - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) = \frac{1}{2} - \frac{\varepsilon}{6} - \frac{1}{2} + \frac{\varepsilon}{2(3-2\alpha)} = \frac{3\varepsilon - \varepsilon(3-2\alpha)}{6(3-2\alpha)} = \\ &= \frac{3\varepsilon - 3\varepsilon + 2\varepsilon\alpha}{6(3-2\alpha)} = \frac{\varepsilon\alpha}{3(3-2\alpha)} > 0, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_1(\alpha) - \tilde{\pi}_1 &= \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) - \frac{3+\varepsilon}{6} = \frac{1}{2} + \frac{\varepsilon}{2(3-2\alpha)} - \frac{1}{2} - \frac{\varepsilon}{6} = \frac{3\varepsilon - \varepsilon(3-2\alpha)}{6(3-2\alpha)} = \\ &= \frac{3\varepsilon - 3\varepsilon + 2\varepsilon\alpha}{6(3-2\alpha)} = \frac{2\varepsilon\alpha}{3(3-2\alpha)} = \tilde{\pi}_2 - \tilde{\pi}_2(\alpha) > 0. \end{aligned} \quad (33)$$

Іншими словами, при цьому трансферти ресурсів від країни 2 (юрисдикції з нижчим податком) до країни 1 (юрисдикції з вищим податком) збільшуються.

Нерівності (28) і (31) свідчать, що із зростанням параметра  $\alpha$  поділу фіскальних надходжень додатна податкова база країни 1 збільшується, а країни 2 – зменшується (за умови (30), дещо жорсткішої, ніж умова (17)). Відповідно до рівності (19) сумарні фіскальні надходження обох країн:

$$\begin{aligned} R(\alpha) &= t_1(\alpha) \tilde{\pi}_1(\alpha) + t_2(\alpha) \tilde{\pi}_2(\alpha) = \delta(1-\alpha) \left( \frac{1}{1-2\alpha} + \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) + \\ &+ \delta(1-\alpha) \left( \frac{1}{1-2\alpha} - \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) = \end{aligned}$$



$$= \frac{1}{2} \delta(1-\alpha) \left( \frac{1+1}{1-2\alpha} + \frac{\varepsilon-\varepsilon}{(1-2\alpha)(3-2\alpha)} + \frac{\varepsilon^2+\varepsilon^2}{(3-2\alpha)^2} + \frac{\varepsilon-\varepsilon}{3-2\alpha} \right) = \delta(1-\alpha) \left( \frac{1}{1-2\alpha} + \frac{\varepsilon^2}{(3-2\alpha)^2} \right) > 0$$

збільшуються із зростанням параметра  $\alpha$  :

$$\begin{aligned} \frac{\partial R(\alpha)}{\partial \alpha} &= -\delta \left( \frac{1}{1-2\alpha} + \frac{\varepsilon^2}{(3-2\alpha)^2} \right) + \delta(1-\alpha) \left( \frac{2}{(1-2\alpha)^2} + \frac{2 \times 2\varepsilon^2}{(3-2\alpha)^3} \right) = \\ &= \delta \left( \frac{2(1-\alpha) - (1-2\alpha)}{(1-2\alpha)^2} + \frac{4\varepsilon^2(1-\alpha) - \varepsilon^2(3-2\alpha)}{(3-2\alpha)^3} \right) = \\ &= \delta \left( \frac{2-2\alpha-1+2\alpha}{(1-2\alpha)^2} + \frac{4\varepsilon^2-4\varepsilon^2\alpha-3\varepsilon^2+2\varepsilon^2\alpha}{(3-2\alpha)^3} \right) = \delta \left( \frac{1}{(1-2\alpha)^2} + \frac{\varepsilon^2(1-2\alpha)}{(3-2\alpha)^3} \right) > 0. \end{aligned}$$

Фіскальні надходження країни 2:

$$R_2(\alpha) = \alpha t_1 \tilde{\pi}_1 + (1-\alpha)t_2 \tilde{\pi}_2 = t_2(\alpha) \tilde{\pi}_2(\alpha) + \alpha [t_1(\alpha) \tilde{\pi}_1(\alpha) - t_2(\alpha) \tilde{\pi}_2(\alpha)] \quad (34)$$

є сумою фіскальних надходжень  $t_2(\alpha) \tilde{\pi}_2(\alpha)$  до поділу таких надходжень і чистих трансфертів  $\alpha [t_1(\alpha) \tilde{\pi}_1(\alpha) - t_2(\alpha) \tilde{\pi}_2(\alpha)]$  після поділу таких надходжень. В силу залежностей (25) і (26) значення  $t_1(\alpha)$  і  $t_2(\alpha)$  збільшуються із зростанням  $\alpha$ , але в силу нерівності (29) значення  $\tilde{\pi}_2(\alpha)$  податкової бази країни 2 при цьому зменшується. В силу рівнянь (22), (26), (29) і (31) маємо

$$\begin{aligned} t_2(\alpha) \tilde{\pi}_2(\alpha) &= \delta(1-\alpha) \left( \frac{1}{1-2\alpha} - \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right), \\ \frac{\partial [t_2(\alpha) \tilde{\pi}_2(\alpha)]}{\partial \alpha} &= \tilde{\pi}_2(\alpha) \frac{\partial t_2(\alpha)}{\partial \alpha} + t_2(\alpha) \frac{\partial \tilde{\pi}_2(\alpha)}{\partial \alpha} = \\ &= \delta \left( \frac{1}{(1-2\alpha)^2} + \frac{\varepsilon}{(3-2\alpha)^2} \right) \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) - \delta(1-\alpha) \left( \frac{1}{1-2\alpha} - \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) \frac{\varepsilon}{(3-2\alpha)^2} = \\ &= \delta \left( \frac{1}{2(1-2\alpha)^2} - \frac{\varepsilon}{2(1-2\alpha)^2(3-2\alpha)} + \frac{\varepsilon}{2(3-2\alpha)^2} + \frac{2(1-\alpha)\varepsilon^2 - \varepsilon^2}{2(3-2\alpha)^3} \right) - \delta \frac{(1-\alpha)\varepsilon}{(1-2\alpha)(3-2\alpha)^2} = \\ &= \delta \frac{(3-2\alpha)^2 - \varepsilon(3-2\alpha) + \varepsilon(1-2\alpha)^2 - 2(1-\alpha)\varepsilon(1-2\alpha)}{2(1-2\alpha)^2(3-2\alpha)^2} + \delta \frac{\varepsilon^2(1-2\alpha)}{2(3-2\alpha)^3} > \\ &> \delta \frac{(3-2\alpha)^2 - \varepsilon(3-2\alpha) + \varepsilon(1-2\alpha)^2 - 2(1-\alpha)\varepsilon(1-2\alpha)}{2(1-2\alpha)^2(3-2\alpha)^2}. \end{aligned}$$

Знаменник останнього дробу є додатним, а чисельник дорівнює:

$$\begin{aligned} &(3-2\alpha)^2 + \varepsilon[(1-2\alpha)^2 + 2\alpha - 3 - 2(1-\alpha)(1-2\alpha)] = \\ &= (3-2\alpha)^2 + \varepsilon(1-4\alpha + 4\alpha^2 + 2\alpha - 3 - 2 + 4\alpha + 2\alpha - 4\alpha^2) = \\ &= (3-2\alpha)^2 + \varepsilon(4\alpha - 4) = (3-2\alpha)^2 - 4\varepsilon(1-\alpha). \end{aligned}$$

Цей чисельник є додатним за умови:

$$\varepsilon < \frac{(3-2\alpha)^2}{1-\alpha} = \frac{(1+2-2\alpha)(3-2\alpha)}{1-\alpha} = 2(3-2\alpha) + \frac{3-2\alpha}{1-\alpha} = 2(3-2\alpha) + 2 + \frac{1}{1-\alpha},$$

яка є наслідком нерівності (30). Отже, фіскальні надходження  $t_i(\alpha) \tilde{\pi}_i(\alpha)$  країни  $i=1,2$  до поділу таких надходжень збільшуються із зростанням  $\alpha$ . Другий доданок суми (34) є чистими трансфертами від країни 1 до країни 2  $\alpha [t_1(\alpha) \tilde{\pi}_1(\alpha) - t_2(\alpha) \tilde{\pi}_2(\alpha)]$ , які є додатними через нерівність  $\tilde{\pi}_1(\alpha) > \tilde{\pi}_2(\alpha)$  в силу рівностей (27) і (29), а також через нерівність  $t_1(\alpha) > t_2(\alpha)$ . Другий множник цього доданку є додатним:

$$t_1(\alpha) \tilde{\pi}_1(\alpha) - t_2(\alpha) \tilde{\pi}_2(\alpha) = \delta(1-\alpha) \left( \frac{1}{1-2\alpha} + \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\varepsilon}{3-2\alpha} \right) -$$

$$\begin{aligned}
& -\delta(1-\alpha)\left(\frac{1}{1-2\alpha}-\frac{\varepsilon}{3-2\alpha}\right)=\frac{3-2\alpha-\varepsilon}{2(3-2\alpha)}=\frac{1}{2}\left(1-\frac{\varepsilon}{3-2\alpha}\right)>0 \\
& =\frac{1}{2}\delta(1-\alpha)\left(\frac{1-1}{1-2\alpha}+\frac{\varepsilon+\varepsilon}{(1-2\alpha)(3-2\alpha)}+\frac{\varepsilon+\varepsilon}{3-2\alpha}+\frac{\varepsilon^2-\varepsilon^2}{(3-2\alpha)^2}\right)= \\
& =\delta(1-\alpha)\frac{\varepsilon+\varepsilon(1-2\alpha)}{(1-2\alpha)(3-2\alpha)}=\frac{\delta(1-\alpha)\varepsilon(1-2\alpha+1)}{(1-2\alpha)(3-2\alpha)}=\frac{2\delta\varepsilon(1-\alpha)^2}{(1-2\alpha)(3-2\alpha)}>0.
\end{aligned}$$

#### Висновки

Таким чином, міжнародна податкова конкуренція поєднується з міжнародною податковою кооперацією за світові корпорації, які мають можливості зсуву звітних прибутків серед різних країн.

#### Список використаної літератури

1. Горбачук В.М. До бюджетно-податкової політики економічного росту / В.М. Горбачук // Загублене десятиріччя ... та майбутній бум? Проблеми українського економічного зростання. – К.: IREX, 2001. – С. 37-44.
2. Горбачук В.М. Моделі та методи міжнародної податкової конкуренції і оптимізації / В.М. Горбачук // Теорія оптимальних рішень. Моделювання та керування в умовах невизначеності. – К.: Ін-т кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України, 2000. – С. 58-72.
3. Домрачев В.Н. Анализ возможностей использования банковской системы в процессе отмывания доходов, полученных незаконным путем / В.Н. Домрачев, В.М. Горбачук // Международное сотрудничество в борьбе с отмыванием доходов, полученных незаконным путем. – М.: ЮрИнфоР, 1999. – С. 20-25.
4. Auerbach A. Taxing corporate income / A. Auerbach, M. Devereux, H. Simpson // Dimension of tax design: the Mirrlees review / J.Mirrlees et al. (eds.) – Oxford: Oxford University Press, 2010. – P. 837-913.
5. Devereux M. Evaluating tax policy for location decisions / M. Devereux, R. Griffith // International tax and public finance. – 2003. – V. 10. – I. 2. – P. 107-126.
6. Сергієнко І.В. Моделювання збалансованої бюджетно-податкової політики стійкого економічного росту / І.В. Сергієнко, Т.П. Мар'янович, В.М. Горбачук // Проблеми впровадження інформаційних технологій в економіці та бізнесі. – К.: АДПС України, 2001. – С. 78-81.
7. Hines J. Corporate Taxation and International Competition / J. Hines. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005. – 295 p.
8. Сергієнко І.В. Міжнародні аспекти кредитно-податкової політики України / І.В. Сергієнко, Т.П. Мар'янович, В.М. Горбачук // Економіка України. – 2001. – № 1. – С. 13-18.
9. Горбачук В.М. Шлях українських компаній на Варшавську фондову біржу через Кіпр, Люксембург, Нідерланди / В.М. Горбачук, Д.І. Бенедисюк, О.С. Знахуренко // Стратегії та тренди економічного розвитку країн під впливом інновацій (м. Київ, 24 січня 2018 р.). – К.: НаУКМА, 2018. – С. 23-24.
10. Huizinga H. International profit shifting within multinationals: a multi-country perspective / H. Huizinga, L. Laeven // Journal of Public Economics. – 2008. – Vol. 92. – I. 5-6. – P. 1164-1182.
11. Hindriks J., Peralta S., Weber S. Local Taxation of Global Corporation: a Simple Solution // Annals of economics and statistics. – 2014. – January-June. – P. 113-114.
12. Bucovetsky S. Asymmetric tax competition / S. Bucovetsky // Journal of urban economics. – 1991. – Vol. 30. – I. 2. – P. 167-181.
13. Wilson J.D. Tax Competition with Interregional Differences in Factor Endowments / J.D. Wilson // Regional science and urban economics. – 1991. – Vol. 21. – I. 3. – P. 423-451.
14. Krogstrup S. Are Capital Taxes Running to the Bottom in the EU? / S. Krogstrup // HEI Working Paper. – 2003. – № 1. – 75 p.
15. Baldwin R. Agglomeration, integration and tax harmonization / R. Baldwin, P. Krugman // European economic review. – 2004. – Vol. 48(1). – P. 1-23.

УДК 621.367.3:664.7

М.Г. ДИКТЕРУК, В.Т. КРАВЧУК, А.С. ЗАСЛУЖЕННИЙ

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

Ю.В. ЧОВНЮК

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧИХ  
МАТЕРИАЛОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЁМКОСТЯХ (СИЛОСЫ/БУНКЕРЫ):  
МОНИТОРИНГ СТАТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ И АНАЛИЗ  
ИСТЕЧЕНИЯ ПО ВТОРОЙ ФОРМЕ В ОБЩЕЙ ПОСТАНОВКЕ**

*Вторая форма истечения сыпучего материала из вертикальной ёмкости характеризуется перемещением всей его массы единым столбом, сверху до низа ёмкости. При этом не происходит образования самостоятельных линий тока с видимым их смещением друг относительно друга, т.е. скорости движения всех частиц среды, попадающих в одно горизонтальное сечение, равны между собой. Решение задачи об истечении сыпучего материала из вертикальной ёмкости имеет весьма важное значение. При истечении сыпучего именно по второй форме возникает повышенное давление на стенки силосов, значительно превосходящее расчётные значения давлений, найденных по теории Янсена–Кенена. Вначале рассмотрена задача в такой постановке, когда фактор движения не играет по существу никакой роли. Сыпучая среда при этом принимается несжимаемой, а движение – установившимся. Главная цель, которую преследует решение задачи в такой постановке, – это исследование статического напряжённого состояния в предельном равновесии и точное удовлетворение граничным условиям на вертикальных стенках ёмкости (силоса/бункера). Одним из главных недостатков теории Янсена–Кенена является именно неудовлетворение граничным условиям на стенках, так как они являются там одновременно и площадками скольжения, и площадками минимальных главных напряжений. Дано решение задачи о второй форме истечения сыпучего материала в наиболее общей постановке – с учётом сжимаемости среды и неустановившегося характера движения. Рассматриваются плоские ёмкости (бункеры) и ёмкости круглые (силосы). Получены в первой постановке задачи асимптотические решения. В общей постановке задачи о неустановившемся движении сжимаемой сыпучей среды учтены наряду с её переменной плотностью также переменный коэффициент трения сыпучего материала о стенку ёмкости и переменный угол внутреннего трения в материале. Подчёркнута необходимость существования специальной системы мониторинга (с использованием средств мехатроники), которая отслеживает статическое напряжённое состояние сыпучего материала и способствует предотвращению сводообразований, приводящих при выгрузке материала из ёмкости к её разрушению. Определены закономерности адаптации и управления сводоразрушающими устройствами при выгрузке сыпучих (например, зерновых) материалов из глубоких бункеров.*

*Ключевые слова: закономерности, установившееся движение, несжимаемый сыпучий материал, вертикальная ёмкость, силосы, бункеры, мониторинг, статика, напряжённое состояние, анализ, истечение по второй форме, неустановившееся движение, сжимаемость, переменный угол внутреннего трения материала, переменный коэффициент трения материала со стенками ёмкости.*

М.Г. ДИКТЕРУК, В.Т. КРАВЧУК, О.С. ЗАСЛУЖЕНИЙ

Київський національний університет будівництва і архітектури

Ю.В. ЧОВНЮК

Національний університет біоресурсів і природокористування України

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РУХУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У ВЕРТИКАЛЬНИХ  
ЇМКОСТЯХ (СИЛОСИ/БУНКЕРИ): МОНІТОРИНГ СТАТИЧНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ Й  
АНАЛІЗ ВИТОКУ ЗА ДРУГОЮ ФОРМОЮ У ЗАГАЛЬНІЙ ПОСТАНОВЦІ**

*Друга форма виток сипкого матеріалу з вертикальної ёмкості характеризується переміщенням всієї його маси єдиним стовпом, зверху до низу ёмкості. При цьому не відбувається утворення самостійних ліній течії з видимим їх переміщенням однієї відносно другої, тобто швидкості руху усіх частинок середовища, які попадають у один горизонтальний переріз, рівні між собою. Розв'язок задачі про виток сипкого матеріалу з вертикальної ёмкості має доволі важливе значення. При виток сипкого матеріалу саме за другою формою виникає підвищений тиск на стінки силосів, який суттєво перевищує розрахункові значення тисків, знайдених за теорією Янсена–Кенена. Спочатку розглянута задача у такій постановці, коли фактор руху не грає по суті ніякої ролі. Сипке середовище при цьому приймається таким, що не стискається, а рух – ustalеним. Головна мета, яку переслідує розв'язок задачі в такій постановці, – це дослідження статичного напруженого стану у граничній рівновазі й точне задоволення граничним умовам*

на вертикальних стінках ємкості (силоса/бункера). Одним з головних недоліків теорії Янсена–Кенена є саме не задоволення граничним умовам на стінках, оскільки вони там є одночасно й поверхнями ковзання, й поверхнями мінімальних головних напружень. Даний розв'язок задачі за другою формою витоку сипкого матеріалу у найбільш загальній постановці – із урахуванням стиснення середовища й неусталеного характеру руху. Розглянуті плоскі ємкості (бункери) та ємкості круглі (силоси). Отримані у першій постановці задачі асимптотичні розв'язки. У загальній постановці задачі про неусталений рух стиснутого сипкого середовища враховані разом з її змінною щільністю також змінний коефіцієнт тертя сипкого матеріалу зі стінкою ємкості та змінний кут внутрішнього тертя у матеріалі. Підкреслена необхідність існування спеціальної системи моніторингу (з використанням засобів мехатроніки), котра відслідковує статичний напружений стан сипкого матеріалу й сприяє запобіганню склепутворень, які призводять при вивантаженні матеріалу з ємкості до її руйнування. Визначені закономірності адаптації та керування пристроями, які руйнують склепутворення при вивантаженні (наприклад, зернових) матеріалів з глибоких бункерів.

Ключові слова: закономірності, усталений рух, нестискуваний сипкий матеріал, вертикальна ємкість, силоси, бункери, моніторинг, статика, напружений стан, аналіз, виток за другою формою, неусталений рух, стискуваність, змінний кут внутрішнього тертя матеріалу, змінний коефіцієнт тертя матеріалу зі стінками ємкості.

M.G. DIKTERUK, V.T. KRAVCHYUK, A.S. ZASLUZENNII

Kyiv National University of Construction and Architecture

Y.V. CHOVNYUK

National University of Bioresources and Life Sciences of Ukraine

#### INVESTIGATION OF FREE-FLOWING BULK MATERIAL'S MOVEMENT LAWS AT VERTICAL VESSELS (SILOS/HOPPERS): MONITORING OF STATIC STRESS STATE AND ANALYSIS OF EFFLUX BY THE SECOND FORM AT THE GENERAL DEFINITION OF A PROBLEM

*The second form of efflux of free-flowing bulk materials at vertical vessels is characterized by the displacement of all mass as common pole from the top to lower part of the vessel. The generation of individual flow lines with visible displacement one to another is not appear, that's why velocities of movement of all particles of medium which are at one horizontal section must be equal. The solution of the problem of efflux of free-flowing bulk material from vertical vessels is very important. During the efflux of free-flowing bulk material just by the second form, the increased pressure on silos walls is aroused, and this pressure is superior in magnitude than that calculated with the help of Janssen–Canen's theory. First of all, the problem is investigated at such definition when the movement factor is slightly. The free-flowing bulk material here is not compressed and its movement is stable. The main purpose of the solution of this problem at such definition is to investigate the static stress state in the limiting equilibrium and to fulfill the boundary conditions at vertical walls of vessel (silo/hopper). One of the main disadvantages of Janssen–Canen's theory is just that it not fulfills the boundary conditions at the walls, because they are here, in this theory, the surfaces of sliding and the surfaces of the minimum of main stresses, as well. The solution of the problem of the efflux of free-flowing bulk material by the second form at the general definition is presented, the compression of the medium and non-stable character of its movement are included. The flat vessels (hoppers) and the circular vessels (silos) are considered. The asymptotic solutions of the problem at the first definition are obtained. At the general definition of the problem for the non-stable movement of compressed free-flowing bulk material, the varying density of the medium, the varying friction coefficient of this material with a vessel's wall and the varying angle of the interior friction in material are included. The existence of the special monitoring system (with the help of mechatronics devices) is necessary in order to watch the static stress state of free-flowing bulk material and to favor the prevention of hang-up generations in it which gives the possibility of destroying the vessel during the act of material's unload from it. The laws of adaptation and control of devices for destroying of hang-up generations during the process of unload of free-flowing bulk materials (for example, grain) from the deep hoppers are determined.*

Keywords: laws, stable movement, uncompressed free-flowing bulk material, vertical vessel, silos, hoppers, monitoring, static, stress state, analysis, efflux by the second form, constable movement, compression, varying angle of the interior friction of material, varying coefficient of friction of material with the vessel's walls.

#### Постановка проблемы

Одна из особенностей нынешнего развития сельского хозяйства Украины – реструктуризация его хозяйственной деятельности. Существенную роль в этом играют различной конструкции мини-заводы по переработке и хранению зернопродуктов. Неотъемлемой частью их технологического оборудования являются глубокие ёмкости типа элеваторных силосов. При разгрузке зерновых (и прочих сыпучих материалов) из них наблюдаются перебои в процессе истечения. Одна из причин – сводообразование,

препятствующее равномерному истечению и оказывающее значительные циклические динамические нагрузки на стенки глубокой ёмкости (силосов/бункеров).

В настоящее время широко применяются глубокие ёмкости, оснащённые разнообразными сводоразрушающими устройствами.

Существующее многообразие конструкций данных устройств свидетельствует о сложности выбора оптимального варианта, зависящего не только от конструктивных параметров бункеров, но и от вида зернопродукта (иного сыпучего материала), находящегося в нём.

В процессе истечения сыпучего материала из глубокого осесимметричного бункера происходит переход его свойств из одного состояния в качественно иное (из сплошной среды в подвижное, как бы "псевдооживленное" состояние). Целенаправленность перехода определяется механикой сыпучих тел. Зерновой материал – открытая система, в результате воздействия на которую (например, с помощью сводоразрушающего устройства) происходит приспособление (адаптация) её свойств под требуемые. Таким образом, изменения состояния сыпучих материалов при их истечении из силосов/бункеров имеют адаптационный характер и требуют рассмотрения с позиций теории синергетики, управляемых адаптационных систем.

В условиях острой конкурентной борьбы на современных рынках научно-технической продукции проектирование машин и рабочих органов, выполняющих те или иные технологические процессы, во всё большей степени должно основываться на точном инженерном расчёте технологических процессов с использованием интеллектуальных систем управления (реализуемых с помощью средств и устройств современной мехатроники), а также иных новейших достижений науки.

Средой, с которой взаимодействуют рабочие органы машин, во многих случаях являются различные сыпучие материалы. В сельскохозяйственном производстве наиболее распространёнными сыпучими материалами являются зерно, семена технических культур, минеральные удобрения, почва; в угольной, горнодобывающей и металлургической промышленности – уголь, руда, кокс; в строительстве – песок, гравий, грунты, цемент; в химической промышленности – порошки, гранулы и т.п. Перевозка сыпучих материалов составляет значительную часть грузооборота всех видов транспорта Украины, причём с развитием народного хозяйства поток сыпучих грузов непрерывно нарастает.

Необходимой составной частью машин, предназначенных для работы с сыпучими телами, являются бункеры различных форм и трубы постоянного сечения. К трубам постоянного сечения относятся цилиндрические бункеры (силосы), кожухи винтовых транспортёров.

Несмотря на повсеместное распространение бункеров и их кажущуюся простоту, теория их рабочего процесса находится в зачаточном состоянии. В весьма немногочисленных теоретических работах, посвящённых этому вопросу, рассматриваются, как правило, только силы, действующие на стенки бункера при покое сыпучего тела. Движение сыпучих тел в бункерах и силосах изучается лишь экспериментально, причём данные, полученные различными исследователями, не всегда согласуются.

Такое положение в динамике сыпучих тел вообще, и в теории движения сыпучих тел в трубах и бункерах (силосах), в частности, сдерживает технический прогресс в рассматриваемой области.

В предлагаемом исследовании предпринята попытка создания теории движения сыпучих тел в трубах постоянного и переменного сечения. Теория основана на представлении о сыпучем теле, разработанном профессором Гениевым Г.А. [1].

#### Анализ последних исследований и публикаций

Остановимся вначале вкратце на существующих методах исследования сил, действующих на сыпучее тело в сосуде. Автор [2] приводит подробный обзор исследований движения сыпучих материалов в трубах и бункерах. Здесь приведен обзор лишь основных работ, касающихся предмета исследования данной.

В 1895 г. появилась работа Г.А. Янсена [3]. Автор выполнил некоторые экспериментальные исследования и пришёл к выводам, аналогичным выводам М. Фрида [4] и А.Е. Делакроа [5], утверждавшим, что давление на дно силоса значительно меньше веса зернового столба. При этом М. Фрид объясняет подобную ситуацию эффектом передачи части веса зерна на стенки сосуда в виде сил, действующих на распор и на трение. Давление на стенки, по мнению М. Фрида, есть величина постоянная и не зависит от расстояния этой единицы поверхности от горизонта зернового столба. А.Е. Делакроа провёл опыты по определению давления зерна в силосах натуральных размеров и пришёл к выводу, что давление с глубиной возрастает. Однако этот рост не беспределен; начиная с некоторой глубины давление заметно не изменяется. В теоретической части работы Г.А. Янсена автором получена формула для осевых давлений в призматическом силосе с квадратным поперечным сечением. В основу вывода положено уравнение равновесия элемента, выделенного из сыпучего тела двумя бесконечно близкими горизонтальными плоскостями. Боковое давление считается пропорциональным осевому.

В результате получена формула:

$$p = \frac{\gamma}{4k} \cdot \left( 1 - \exp \left[ -4k \cdot \frac{x}{s} \right] \right), \quad (1)$$

где  $p$  – осевое давление в сечении с абсциссой  $x$ ;  $s$  – сторона квадрата поперечного сечения силоса;  $\gamma$  – удельный вес сыпучего материала, помещённого в силос;  $k = \frac{p_s \cdot f}{p}$ , причём  $p_s$  – боковое давление;  $f$  – коэффициент трения зерна о стенку силоса.

Работа Янсена явилась значительным шагом вперёд в развитии теории давления сыпучих тел на стенки сосудов. Формула Янсена (1), подтверждённая опытом, получила широкое распространение при расчётах давления зерна в силосах элеваторов и других подобных случаях. Недостатком теории Янсена является отсутствие обоснования принципиального положения о пропорциональности между осевым и боковым давлениями. Не раскрыт физический смысл коэффициента пропорциональности между давлениями и его зависимость от физико-механических свойств и геометрических размеров частиц сыпучего тела. Эти недостатки ограничивают возможности использования теории Янсена при инженерных расчётах и могут в некоторых случаях приводить к ошибкам.

Кенен и Эри для определения сил, действующих на сыпучее тело в сосуде, воспользовались разработанной Кулоном теорией давления сыпучей среды на подпорные стенки. Однако полученные ими формулы не были подтверждены опытом [2]. Подробное описание и анализ формул Янсена, Кенена и Эри даётся в работах профессора Д.В. Шумского [6] и профессора В.И. Колычева [7].

Интересное теоретическое исследование давления зерна в силосах выполнено профессором Е.М. Гутьяром [8]. Автор развил теорию Янсена, учтя сжимаемость сыпучего тела, и получил формулу более общего вида, чем у Янсена.

В работе Н.В. Сорокина [9] формула Янсена обобщена на случай силоса, заполненного по высоте разнородными материалами. В работе того же автора [10] сделана попытка обобщения формулы Янсена для случая силоса переменного сечения. В основу вывода положено допущение о пропорциональности между осевым давлением и давлением на стенку силоса, причём коэффициент пропорциональности считается не зависящим от глубины расположения слоя, а, следовательно, и от размеров поперечного сечения силоса.

Наконец, в работе [11] рассматриваются давления в силосе, возникающие при движении. Выделяя из движущего столба сыпучего тела элемент и рассматривая действующие на него силы, автор полагает ускорение элемента равным нулю, считая движение установившимся, а столб – имеющим постоянное сечение.

Однако допущение о постоянстве сечения столба в общем случае не соответствует действительности. Вследствие этого даже при установившемся движении каждый элемент сыпучего тела движется с ускорением, причём это ускорение различно для различных по высоте элементов.

В оригинальном исследовании Дженкина [12] сыпучее тело рассматривается как совокупность однородных абсолютно твёрдых плоских дисков, уложенных правильными рядами. Автор рассматривает силы, действующие на диски и на стенки сосуда, а также влияние на эти силы перемычек и сводов, образуемых частью зёрен. В результате теоретических и экспериментальных исследований автор приходит к следующим выводам: 1) угол между силой, действующей на стенку, и нормалью к стенке равен углу трения; 2) положение центра давления не предопределено и может быть значительно выше, чем на одной трети высоты стенки над основанием. Таким образом, давление не распределяется равномерно и не меняется линейно с изменением высоты над основанием; 3) результаты зависят от модели упаковки и от формы зёрен. Недостатком работы Дженкина является отсутствие аналитических зависимостей для сил, действующих на стенки сосуда. Автор ограничился графическим анализом сил и лишь в применении к плоской задаче.

Р.Л. Зенков [13] при выводе формул, определяющих давление сплошной сыпучей среды на дно и стенки узкого высокого сосуда постоянного сечения, воспользовался, по существу, методом Янсена. В работе рассмотрены два случая: перемещение поршня вниз (силы трения направлены вверх) и перемещение поршня вверх (силы трения направлены вниз).

Авторы [14] исследовали распределение давления в цилиндрических и конических бункерах с сыпучим порошкообразным материалом и учли эффект адгезии между материалом и стенкой. В случае цилиндрического бункера, в котором отсутствует адгезия между сыпучим материалом и стенкой сосуда, полученные соотношения для давления на дно сводятся к обычному уравнению Янсена (1).

Более точное распределение давления в вертикальном бункере было предложено Уолкером [15], предположившим, что в сыпучем материале существует подвижное равновесие, при котором круги Мора, представляющие условие нагружения, на определённом уровне касаются линии предельного напряжения. Полученный им результат очень незначительно отличается оттого, что дают авторы [14].

Значительный интерес представляет распределение нагрузки в конических бункерах. Уолкер [15] получил уравнения для распределения нагрузки по вертикали и вдоль стенки при постоянном массовом расходе, т.е. при условии, что весь материал движется по направлению к выходу. Результирующее вертикальное напряжение или распределение давления определяется как:

$$p = \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\bar{\mu}} \cdot p_0 + \frac{\rho_b \cdot g \cdot h}{\bar{\mu} - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\bar{\mu}-1}\right], \quad (2)$$

где  $h_0$  – высота, на которой вертикальная нагрузка (по давлению) равна напряжению  $p_0$  (это может быть давление на основание бункера цилиндрической формы, расположенного над конической загрузочной воронкой);  $h$  – текущая высота в конической части бункера, отсчитываемая вверх от точки пересечения продолжений образующих конусной части бункера;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_b$  – объёмная плотность материала, находящегося в бункере;  $\bar{\mu}$  – коэффициент, который зависит от вида загрузочного бункера и для конической и клиновидной формы соответственно определяется как:

$$\bar{\mu} = 2B' \cdot D^* / \text{tg} \alpha; \quad \bar{\mu} = B' \cdot D^* / \text{tg} \alpha. \quad (3)$$

Здесь  $2\alpha$  – угол загрузочной воронки;  $D^*$  – функция распределения, которая может быть принята в первом приближении равной единице;  $B'$  определяется по формуле:

$$B' = \frac{\sin \delta \cdot \sin(2\alpha + k_0)}{1 - \sin \delta \cdot \cos(2\alpha + k_0)}, \quad (4)$$

где

$$k_0 = \beta_w + \arcsin\left(\frac{\sin \beta_w}{\sin \delta}\right); \quad \arcsin\left(\frac{\sin \beta_w}{\sin \delta}\right) < \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Здесь, в (4) и (5)  $\beta_w$  – угол трения у стенки бункера,  $\delta$  – эффективный угол трения [16], определяемый из следующих соображений.

Каждая линия предельного нагружения (ЛПН) для системы слипшихся макрочастиц вещества в бункере ограничивается значениями нормальных напряжений, равными значению уплотняющего давления. Увеличение нагрузки означает повышение уплотняющего давления и, следовательно, переход к другой ЛПН. Круг Мора теперь можно провести так, чтобы он касался конкретной ЛПН. Продолжение этого процесса приведёт к построению серии кругов Мора. Касательная к этим кругам Мора называется линией эффективного предельного нагружения (ЛЭПН) [14]. Она является обычно прямой линией, проходящей через начало координат и образующей с абсциссой угол  $\delta$ . Следует отметить, что ЛЭПН характеризует зависимость предела прочности материала, находящегося в бункере, при сдвиге от напряжений сжатия для сыпучих сред, которые уплотняются и сдвигаются при таких условиях нагружения. Этот вывод справедлив также и по отношению к установившемуся движению. Так, во время движения тангенциальное смещение сыпучего материала будет происходить во всех точках, и, следовательно, круг Мора, отражающий напряжённое состояние в данной точке, должен касаться ЛЭПН. Если поле напряжений таково, что круг Мора лежит ниже ЛЭПН, то никакого сдвигового движения не происходит. Для неспрессованных сыпучих сред ЛЭПН совпадает с ЛПН. Поэтому и в установившемся движении [16] отношение главных напряжений ( $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ ) во всех точках будет определяться выражением:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \frac{1 + \sin \delta}{1 - \sin \delta}. \quad (6)$$

Кстати, как отмечают авторы [14],  $\delta$  совпадает с  $\beta$  для неслипшихся сыпучих сред, где  $\beta$  – угол внутреннего трения в материале, который находится в бункере.

В конической части загрузочного устройства, появляющейся в бункере при переходе от его цилиндрической части к конической, как вертикальная, так и нагрузка у стенки достигают максимального значения [14]. Поэтому, при установке цилиндрической секции в верхней части конуса в переходной области (от цилиндра к конусу) может возникать нестабильность условий нагружения [17].

**Из изложенного выше следует, что выполненные к настоящему времени экспериментальные и теоретические исследования сил, действующих на дно и стенки труб и бункеров, не охватывают многих вопросов, имеющих важное практическое значение, и не раскрывают механизма действия сил в сыпучих телах.**

Остановимся далее на обзоре работ, посвящённых исследованию закономерностей истечения сыпучих материалов.

Систематические экспериментальные исследования закономерностей истечения сыпучих материалов из бункеров начались с середины XIX века, как утверждают авторы обзора [18]. Большинство исследователей считают, что скорость истечения не зависит от высоты столба материала в бункере, а определяется диаметром отверстия и множеством других факторов (диаметром частиц, углом естественного откоса материала, углом внутреннего трения частиц, углом наклона стенок конусного днища). Формулы

имеют различный вид и приводят к различным результатам. В [2] представлен анализ исследований по истечению сыпучих материалов из бункеров, проведенных в СССР. Эти исследования показали, что основным фактором, определяющим скорость истечения, является диаметр отверстия, а также признаётся влияние размеров частиц на скорость истечения.

Работ, посвящённых теоретическому исследованию процесса истечения сыпучих материалов, в настоящее время известно мало. В литературе по механике сыпучих тел этот вопрос обычно или совсем не затрагивается, или рассматривается вскользь и на основе чрезмерно упрощённых представлений. Исключение составляет работа Г.А. Гениева [1], который исследует напряжённое состояние сыпучей среды в бункере достаточно строго. Переходя к рассмотрению закономерностей истечения, он, отступая от этой строгости (по мнению автора [2]), утверждает, что в зоне выхода сыпучего (в горловине) происходит его интенсивное разрыхление, связанное с резким падением коэффициента внутреннего трения. В связи с этим, свойства сыпучего материала приближаются к свойствам идеальной жидкости. Таким образом, Г.А. Гениев ставит физические свойства зёрен сыпучего материала (угол внутреннего трения) в зависимость от того, в какой части бункера они в данный момент находятся, а скорость истечения – в зависимость от высоты столба сыпучего материала над отверстием. Хотя автор [2] и считает, что последнее утверждение ошибочно, т.к., по его мнению, скорость истечения от высоты столба практически не зависит (в соответствии с экспериментальными исследованиями многих авторов), авторы данного исследования будут придерживаться точки зрения Г.А. Гениева. Такую позицию позволяют занять рассуждения о бифуркационных процессах, происходящих в сыпучем материале, по мере его истечения из бункера.

Авторы [19–21] развивают так называемую "гипотезу динамического разгружающегося свода". Сущность гипотезы состоит в том, что над отверстием при истечении образуется "динамический" свод, проходя через который, частицы выпадают в отверстие. Скорость истечения зависит в этом случае от высоты падения частиц, т.е. от высоты свода, высота же свода пропорциональна диаметру отверстия. Таким образом, скорость истечения сыпучего материала ставится в зависимость от диаметра отверстия, а не от высоты столба сыпучего материала в бункере.

Существование "динамического" свода опытом не подтверждается. Гипотеза о динамическом своде носит искусственный характер и, по мнению автора [2], ничего не даёт для выяснения действительных закономерностей движения.

Р.Л. Зенков [13] для определения скорости истечения ( $v_0$ ) предлагает использовать формулы вида:

$$v_0 = \sqrt{2g \cdot \frac{P}{S \cdot \gamma}} = \sqrt{2g \cdot \frac{\sigma}{\gamma}}. \quad (7)$$

Здесь, в (7),  $P$  – усилие, а  $\sigma$  – давление на плоскость отверстия, площадь которого  $S$ ,  $\gamma$  – удельный вес сыпучего материала,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Между тем, как усилие  $P$ , так и давление  $\sigma$  в процессе истечения равны нулю, т.к. через открытое отверстие бункера частицы свободно падают с ускорением  $g$  и вышележащие частицы на них давить не могут. Давление на плоскость отверстия имеет место только при закрытом отверстии. По-видимому, в формулы для скорости истечения должны входить значения  $P$ ,  $\sigma$ , соответствующие закрытому отверстию, но остаётся неясным [2], каким способом могут быть найдены эти величины. Кроме того, формулы типа (7) не отражают влияния на скорость истечения такого важного фактора, как размеры самого отверстия.

На основании обзора работ [13, 18–21] можно сделать вывод о том, что рассматриваемый вопрос был изучен в СССР недостаточно. Не существует единства мнений ни о физической сущности процесса истечения, ни о факторах, влияющих на истечение. Необходимо дальнейшее исследование этого процесса, в особенности, теоретическое.

Зарубежные (за пределами бывшего СССР) исследования гравитационного движения сыпучих материалов в бункерах сводятся к следующему.

Имеются три, представляющих практический интерес, аспекта поведения сыпучего материала, вытекающего из бункера и загрузочных устройств: нарушение течения, кинематика потока и расход [14]. В бункерах и загрузочных устройствах существует два основных типа гравитационных течений. При "массовом" потоке большая часть сыпучего материала движется по направлению к выходу, а при "воронкообразном" потоке частицы движутся только в центральной части выходного отверстия. В первом случае главная причина нарушения движения состоит в образовании сводов или завесаний, при этом материал поддерживается стенками, тогда как в последнем случае нарушение движения может произойти путём образования в материале пустой центральной трубы, и тогда движение называют "трубным". Эти и другие нарушения движения рассматривались Йохансоном [22]. В обоих случаях (как при завесании, так и при образовании трубок) материал должен быть уплотнён настолько, чтобы достигнутый уровень прочности (предельное напряжение лавинного движения) был достаточным для выдерживания веса зависшего



сыпучего материала. Следовательно, в уплотнённом сыпучем материале возникают нарушения движения (особенно при неограниченно высоком пределе текучести), и они зависят не только от свойств материала, но и от геометрии загрузочного устройства, что оказывает влияние на распределение усилий в системе. Дженике [16] разработал методы конструирования и определил критерии для создания бункеров и загрузочных устройств, в которых не возникают нарушения движения. Основные причины возникновения механизма нарушения движения изложены ниже.

Рассмотрим, в частности, проблему образования сводов. Саморазгружаемость загрузочных воронок может быть охарактеризована функцией, называемой "коэффициентом подвижности", которая определяется как:

$$ff = \sigma_1 / \bar{\sigma}_1 \quad (8)$$

где  $\sigma_1$  – уплотняющее давление;  $\bar{\sigma}_1$  – напряжение, которое действует на образовавшийся свод.

Напряжение  $\bar{\sigma}_1$  является единственным ненулевым главным напряжением, поскольку предполагается, что свод самоподдерживается. И  $\sigma_1$ , и  $\bar{\sigma}_1$  – линейные функции ширины загрузочного устройства, а их отношение для данного устройства постоянно. Коэффициент подвижности зависит от геометрии загрузочного устройства и свойств материала; его значения рассчитаны для ряда загрузочных устройств и материалов с разными свойствами. Предел текучести уплотнённого материала устойчивого свода определяется пределом текучести материала в ненагруженном состоянии  $\sigma_c$ , который в свою очередь является функцией напряжения сжатия  $\sigma_1$ . Поэтому условие, при котором свод не образуется, состоит в следующем:

$$\sigma_c < \bar{\sigma}_1. \quad (9)$$

Построив зависимость предела текучести ненагруженного материала от давления сжатия, которая была определена Дженике [16] как "функция движения", и используя её совместно с коэффициентом подвижности, можно установить условие образования свода. Подобный анализ необходимо проделать, чтобы избежать "трубного" движения. (Подобный подход развит в [1]). Детальное исследование "трубного движения" и движения с зависанием можно найти в литературе [16, 23, 24]. Ричмонд [25] использовал теорию сводов для конструирования загрузочного устройства оптимальной формы. Браун и Хаукслей [26] исследовали модели потоков при установившемся истечении материала из прямоугольного бункера через открытую узкую щель. Они наблюдали пять областей движения: 1) область  $A$  – частицы здесь оползают общей массой, и их движение более или менее похоже на движение в области  $B$ ; 2) область  $B$  – частицы здесь скользят более медленно, чем в  $A$ , образуя внутреннюю границу с неподвижной областью  $E$ . Во время истечения угол откоса у вершин так же, как и у поверхности раздела, остаётся неизменным; 3) области  $A$  и  $B$  подпитывают область  $C$ , из которой частицы, ускоряясь, движутся вниз и достигают области  $D$ ; 4) в области  $D$  частицы падают подобно свободным телам в гравитационном поле. Эта область расширяется и даёт усадку, но происходит это пульсациями, которые возникают из-за сжатия частиц в плотный ком с последующим расширением при выпадении частиц материала через отверстие; 5) область  $E$  является неподвижной, примыкающей к стенкам бункера.

Структура движения в загрузочных устройствах несколько иная. Если области застоя материала полностью отсутствуют, то такое загрузочное устройство называют устройством массового стока [14].

Ли с сотрудниками [27] определили рентгенографическим методом поле скоростей частиц и поле пористости в двумерном пространстве загрузочного устройства. Следы, оставленные помеченными частицами во время движения, позволили определить поле векторов локальной скорости, а интенсивность тени – пористость. Располагая полем скоростей и полем пористости, авторы выделили четыре области: 1) область  $D$  – была названа зоной пробкового движения; 2) область  $B$  – в ней наблюдалось поведение неподвижно закреплённого тела; 3) область  $A$  – была названа "зоной разлома" вещества из-за интенсивной деформации, которая происходила в этом месте; 4) область  $C$  – зона свободного движения.

Резник с сотрудниками [28] выполнил детальное картографирование кинематики потока плоского движения с помощью стереоскопической техники, разработанной Баттерфелдом с сотрудниками [29], и получил серию фотографий потока, сделанных через короткие интервалы времени. Пары последовательных фотографий в стереоскопе позволяют воссоздать объёмную модель меняющегося поля, с помощью которой можно рассчитать поле скоростей.

**Несмотря на значительные успехи, достигнутые в изучении поля скоростей сыпучих материалов, и создание критериев безарочного движения, полезных при конструировании, до настоящего времени не удаётся рассчитать производительность, исходя только из этих данных. Для этого до сих пор используют эмпирические уравнения.**

Следует, вероятно, отметить, что в большинстве применяемых процессов переработки и транспортировки сыпучих материалов, где используется оборудование для загрузки такого рода материалов, максимальные скорости истечения намного выше, чем существующие скорости дальнейшей их переработки.

Поэтому, по мнению авторов данной работы, теоретические исследования процессов истечения сыпучих материалов из бункеров и силосов требуют дальнейших уточнений и совершенствования.

#### Цель исследования

Цель работы – обоснование моделей напряжённого состояния и процесса истечения сыпучих материалов из бункеров/силосов, установление общих закономерностей адаптации и управления сводоразрушающими устройствами, используемыми для выгрузки сыпучих материалов из глубоких ёмкостей. Указанные модели и закономерности в дальнейшем могут быть использованы для создания системы мониторинга (средствами мехатроники) процессов выгрузки таких материалов (в частности, зерновых) из глубоких бункеров и силосов, которая позволяет упреждать возникновение нежелательных состояний материалов в ёмкостях их хранения, когда возникают сводообразования, препятствующие равномерному истечению и оказывающие значительные циклические динамические нагрузки на стенки ёмкостей. При этом сводоразрушающие устройства функционируют в зоне резонанса их рабочей частоты колебаний и собственной частоты колебаний истекающего сыпучего (например, зернового) материала.

В данном исследовании частично использованы результаты работ [1, 30, 31].

#### Изложение основного материала исследования

1. Решение задачи о движении сыпучего материала в вертикальной ёмкости по второй форме истечения.

Вторая форма истечения сыпучего из вертикальной ёмкости характеризуется перемещением всей его массы единым столбом, сверху до низа ёмкости [1]. При этом не происходит образования самостоятельных линий тока с видимым их смещением друг относительно друга, т.е. скорости движения всех частиц среды, попадающих в одно горизонтальное сечение, равны между собой. Особенности возникновения двух форм истечения подробно описаны в [32].

Решение задачи об истечении сыпучего материала из вертикальной ёмкости имеет важное значение. В частности, при истечении сыпучего материала именно по второй форме возникает повышенное давление на стенки силосов, значительно превосходящее расчётные значения давлений, найденных по теории Янсена–Кенена.

В рассматриваемой задаче в той постановке, в какой она решается в данном пункте исследования, фактор движения не играет по существу никакой роли. (Сыпучая среда принимается несжимаемой, а движение – установившимся). Главная цель, которую преследует решение задачи в такой постановке, – это исследование статического напряжённого состояния в предельном равновесии и точное удовлетворение граничным условиям на вертикальных стенках ёмкости (силоса). Следует отметить, что одним из главных недостатков теории Янсена–Кенена является именно неудовлетворение граничным условиям на стенках, т.к. они являются там одновременно и площадками скольжения, и площадками минимальных главных напряжений.

Излагаемые здесь вопросы представляют собой лишь подготовительный материал для решения задачи о второй форме истечения сыпучего материала в наиболее общей её постановке – с учётом сжимаемости среды и неустановившегося характера движения. Это решение будет дано в следующем пункте исследования. Рассматриваются плоские ёмкости (бункеры) и ёмкости круглые (силосы). Вначале приведём так называемые асимптотические решения.

По мере заглубления в какой-либо вертикальной ёмкости неограниченной глубины значения напряжений в заполняющей её сыпучей среде, находящейся в состоянии предельного равновесия, не будут неограниченно возрастать, а будут стремиться к определённому предельному значению, достигаемому на бесконечной глубине. Эти предельные значения мы будем называть асимптотическими.

Примем расположение координатных осей следующим образом: 1) координата  $x$  направлена вдоль оси бункера; 2) координата  $y$  – перпендикулярно к оси бункера. Тогда из определения асимптотических напряжений следует, что последние будут являться функциями лишь координаты  $y$ .

Переходя к получению асимптотических решений, сформулируем окончательную постановку этой задачи. Требуется найти решение, удовлетворяющее во всех точках среды уравнениям движения, уравнению сплошности среды, уравнению предельного равновесия и граничному условию на стенках ёмкости:

при  $y = \pm a/2$   $X_y = \pm f \cdot Y_y$ , где  $a$  – ширина бункера,  $X_x$ ,  $X_y$ ,  $Y_y$  – напряжения в материале вдоль соответствующих осей, каждое из которых зависит от  $y$ ,  $f$  – коэффициент трения сыпучего материала по стенке бункера. Будем считать, что  $tg\varphi \geq f$ , где  $\varphi$  – угол внутреннего трения. Благодаря тому, что  $v_x = const$ ,  $v_y = 0$ , инерционные члены в уравнении движения обращаются в нуль. Здесь  $v_x, v_y$  – компоненты скорости движения материала вдоль соответствующей оси.

Получим асимптотическое решение для случая плоской задачи применительно к определению напряжённого состояния сыпучего материала, находящегося в удлиённом бункере.

Асимптотические напряжения  $X_x, X_y, Y_y$  суть функции  $y$ . Они удовлетворяют системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial X_x}{\partial x} + \frac{\partial X_y}{\partial y} - X = 0; \\ \frac{\partial X_y}{\partial x} + \frac{\partial Y_y}{\partial y} - Y = 0; \\ (X_x - Y_y)^2 + 4 \cdot X_y^2 = \sin^2 \varphi \cdot (X_x + Y_y)^2, \end{cases} \quad (10)$$

где  $X, Y$  – массовые силы, действующие на сыпучий материал в бункере вдоль соответствующей оси. При этом выполняется граничное условие:

$$X_y(\pm a/2) \mp f \cdot Y_y(\pm a/2) = 0. \quad (11)$$

Решением задачи (10), (11) является следующая система функций [1]:

$$X_x = M_1 \cdot \psi(y); \quad Y_y = M_1; \quad X_y = M_1 \cdot \zeta(y), \quad (12)$$

где

$$\psi(y) = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \cdot \left( 1 + 2 \sin \varphi \cdot \sqrt{1 - \xi^2 m^2} + \sin^2 \varphi \right); \quad \zeta(y) = f \cdot \xi; \quad M_1 = \frac{a}{2} \cdot \frac{g \cdot \rho}{f}; \quad \xi = \frac{2y}{a}; \quad m = \frac{f}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (13)$$

т.е.  $\xi$  – приведенная координата  $y$ ,  $m$  – отношение коэффициента трения сыпучего материала о стенку ёмкости к коэффициенту внутреннего трения,  $\rho$  – плотность материала, находящегося в бункере.

Напряжение  $Y_y$  (распор) – величина постоянная.

Таким образом, решение (12), (13), точно удовлетворяющее исходной системе уравнений в каждой точке среды и точно удовлетворяющее граничному условию на стенках, характеризуется неравномерным законом распределения вертикального напряжения  $X_x$  по горизонтальному сечению ёмкости, достигая максимального значения в её середине, в то время, как абсолютное значение горизонтальной составляющей напряжения  $X_y$  максимально у стенок ёмкости ( $y = \pm a/2$ ).

Напряжения  $X_x$  и  $Y_y$  являются главными напряжениями (соответственно  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ) лишь в середине ёмкости, при  $\xi = 0$ . Действительно, при  $\xi = 0$  из (12), (13) получаем:

$$\frac{Y_y}{X_x} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}; \quad \operatorname{tg} 2\beta = 0; \quad \beta = 0. \quad (14)$$

Здесь введена функция  $\beta$  следующим соотношением:

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{2X_y}{X_x - Y_y} = \frac{2\zeta(y)}{\psi(y) - 1}. \quad (15)$$

Соотношение между  $Y_y$  и  $X_x$  у стенок ёмкости при  $f = \operatorname{tg} \varphi$  составляет:

$$\frac{Y_y}{X_x} = \frac{1 - \sin^2 \varphi}{1 + \sin^2 \varphi}; \quad \operatorname{tg} 2\beta = \pm \operatorname{ctg} \varphi; \quad \beta = \pm \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (16)$$

Таким образом, на вертикальную стенку действует не меньшее главное напряжение, а напряжение  $Y_y(\pm a/2) > \sigma_2$ .

Приведенному выше решению можно дать следующую интерпретацию. Формулы (12), (13) можно рассматривать как выражения для единичных усилий в цилиндрических сводах, перекрывающих пролёт ёмкости  $L = a$ , имеющих стрелку подъёма  $h$ :

$$h = 0,25 \cdot a \cdot f \quad (17)$$

и описанных по параболе.

Напряжение  $Y_y$  соответствует распору,  $X_y$  – сдвигающим (поперечным) силам,  $X_x$  – некоторой двусторонней нагрузке, найденной из условия предельного равновесия и препятствующей рассыпанию свода. Причём в данном случае значение  $X_x$  – активное давление – является большим из двух возможных значений  $X_x$ , удовлетворяющих условию предельного равновесия при заданных  $Y_y$  и  $X_y$ . Нагрузкой для

этих цилиндрических сводов в условиях асимптотического решения является их собственный вес. Силы трения на концах свода полностью воспринимают последний, удерживая свод в равновесии.

Получим асимптотическое решение для случая пространственной осесимметричной задачи применительно к определению напряжённого состояния сыпучего материала, находящегося в цилиндрическом круглом силосе диаметра  $d$ . Асимптотические напряжения  $R_r, Z_z, R_z, \Theta_\theta$  суть функции  $R_r = R_r(r); Z_z = Z_z(r); R_z = R_z(r); \Theta_\theta = \Theta_\theta(r)$ . Системе уравнений (в цилиндрических координатах  $(r, z, \theta)$ ):

$$\begin{cases} \frac{\partial R_r}{\partial r} + \frac{\partial R_z}{\partial z} + \frac{R_r - \Theta_\theta}{r} - R = 0; \\ \frac{\partial R_z}{\partial r} + \frac{\partial Z_z}{\partial z} + \frac{R_z}{r} - Z = 0; \\ (Z_z - R_r)^2 + 4R_z^2 = \sin^2 \varphi \cdot (Z_z + R_r)^2 \end{cases} \quad (18)$$

и граничному условию:

$$R_z(d/2) - f \cdot R_r(d/2) = 0 \quad (19)$$

удовлетворяет следующая система функций [1]:

$$Z_z = M_2 \cdot \psi(r); R_r = \Theta_\theta = M_2; R_z = M_2 \cdot \zeta(r), \quad (20)$$

где

$$\psi(r) = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \cdot \left( 1 + 2 \sin \varphi \cdot \sqrt{1 - \xi^2 \cdot m^2} + \sin^2 \varphi \right); \zeta(r) = f \xi; M_2 = 0,25 \cdot \frac{dg\rho}{f}; \xi = \frac{2r}{d}; m = f \cdot \text{ctg} \varphi. \quad (21)$$

Таким образом, как и в случае плоской задачи, вертикальное напряжение  $Z_z$  распределено по горизонтальным сечениям неравномерно, достигая максимального значения в центре ёмкости.

Статической интерпретацией решения пространственной осесимметричной задачи является напряжённое состояние круглого в плане свода, имеющего диаметр, равный диаметру ёмкости, стрелку подъёма  $h$ :

$$h = \frac{1}{6} \cdot d \cdot f \quad (22)$$

и описанного по параболоиду вращения. Напряжение  $R_r$  соответствует радиальному усилию,  $\Theta_\theta$  – кольцевому,  $R_z$  – поперечным силам,  $Z_z$  – двустороннему вертикальному усилию обжатия.

**В случае  $f \rightarrow 0$  закон распределения вертикальных напряжений стремится к равномерному, и мы приходим в пределе к асимптотическому решению Янсена–Кенена, справедливому лишь, строго говоря, для идеально гладких стенок.**

Обобщим полученные выше решения на случай ёмкости конечной глубины.

В данном случае все искомые напряжения являются функциями уже двух независимых переменных:  $x, y$  (или  $z, r$ ). Точное решение этой задачи дано в [33]. Здесь приведены результаты приближённого решения, полученного в [1], при следующем допущении. Предполагаем, что зависимость между  $X_x, Y_y, X_y$  (или  $R_r, Z_z, R_z, \Theta_\theta$ ) в пределах какого-либо одного горизонтального сечения  $x = \text{const}$  ( $z = \text{const}$ ) остаётся такой же, как и для случая асимптотического решения. Учёт же изменения напряжённого состояния при изменении глубины осуществляется посредством некоторого коэффициента затухания, входящего в каждый из компонентов напряжения.

Принимая во внимание, что  $X_x = Y_y \cdot \psi(y)$  или  $Z_z = R_r \cdot \psi(r)$ , дифференциальное уравнение

равновесия элемента  $dx \cdot a$  (или  $dz \cdot \frac{\pi d^2}{4}$ ) запишется следующим образом:

$$\frac{s_i}{g \cdot \rho} \cdot \frac{dH}{du} + \frac{H}{M_i} - 1 = 0. \quad (23)$$

Здесь  $u$  – координата  $x$  или  $z$ ;  $H$  – горизонтальное напряжение  $Y_y$  или  $R_r$ ;  $M_i$  – ( $i = 1, 2$ ) значения величин  $M$  для плоской или пространственной осесимметричной задачи, численно равные соответствующим асимптотическим горизонтальным напряжениям;

$$s_1 = \int_{-a/2}^{a/2} \psi(y) dy / a; \quad s_2 = \int_F \psi(r) dF / F. \quad (24)$$

Здесь, в последнем выражении интеграл берётся по площади  $F$  поперечного сечения ёмкости.

Таким образом,  $s_1$  и  $s_2$  есть усреднённые по ширине или по площади ёмкости значения коэффициентов  $\psi(y)$  и  $\psi(r)$  – коэффициентов пропорциональности между вертикальным и горизонтальным напряжениями.

Решение дифференциального уравнения (23) имеет вид [1]:

$$H = H(u) = M_i \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{g\rho}{M_i s_i} \cdot u\right) \right]. \quad (25)$$

Раскрывая значения  $M_i$  и обозначая  $\gamma = g \cdot \rho$ , запишем развёрнутые выражения напряжений для случаев плоской и круглой ёмкости:

– для плоской ёмкости

$$\begin{aligned} X_x &= X_x(x, y) = \frac{\gamma a}{2f} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2f}{as_1} \cdot x\right) \right] \cdot \psi(y); \\ Y_y &= Y_y(x) = \frac{\gamma a}{2f} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2f}{as_1} \cdot x\right) \right]; \\ X_y &= X_y(x, y) = \gamma \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2f}{as_1} \cdot x\right) \right] \cdot y; \end{aligned} \quad (26)$$

– для круглой ёмкости

$$\begin{aligned} Z_z &= Z_z(z, r) = \frac{\gamma d}{4f} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{4f}{ds_2} \cdot z\right) \right] \cdot \psi(r); \\ R_r &= R_r(z) = \frac{\gamma d}{4f} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{4f}{ds_2} \cdot z\right) \right]; \\ R_z &= R_z(z, r) = \frac{\gamma}{2} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{4f}{ds_2} \cdot z\right) \right] \cdot r. \end{aligned} \quad (27)$$

То обстоятельство, что одно из напряжений ( $Y_y$  или  $R_r$ ) является функцией лишь одной координаты ( $x$  или  $z$ ) весьма благоприятно, т.к. позволяет при учёте неустановившегося характера движения свести решение к изучению одномерного движения в координатах  $x, t$  (или  $z, t$ ). Следует подчеркнуть, что напряжения, определяемые формулами (26) и (27), точно удовлетворяют условию предельного равновесия в каждой точке сыпучей среды. Введение коэффициента затухания напряжений не меняет геометрическую картину направлений траекторий главных напряжений и линий скольжения.

В дальнейшем мы введём обозначения для коэффициентов затухания напряжений:

$$E_1(x) = 1 - \exp\left(-\frac{2f}{as_1} \cdot x\right); \quad E_2(z) = 1 - \exp\left(-\frac{4f}{ds_2} \cdot z\right). \quad (28)$$

При  $x = 0, z = 0$  соответственно  $E_1(x) = E_2(z) = 0$ .

Аналитические выражения коэффициентов  $s_1$  и  $s_2$ , которые зависят от величин  $\varphi$  и  $f$ , имеют следующий вид [1]:

$$\begin{aligned} s_1 &= \frac{1}{\cos^2 \varphi} \cdot \left[ 1 + \sin^2 \varphi + \sin \varphi \cdot \left( \sqrt{1 - m^2} + \frac{\arcsin m}{m} \right) \right]; \\ s_2 &= \frac{1}{\cos^2 \varphi} \cdot \left\{ 1 + \sin^2 \varphi + \frac{4}{3} \cdot \sin \varphi \cdot \frac{\left[ 1 - (1 - m^2)^{3/2} \right]}{m^2} \right\}. \end{aligned} \quad (29)$$

Интересно отметить, что наличие неравномерного закона распределения вертикальных напряжений по горизонтальному сечению ёмкости приводит к тому, что в полученном решении коэффициент затухания

напряжения  $[E_i(u)]$  при прочих равных условиях имеет большее значение, чем таковой, фигурирующий в решении Янсена–Кенена.

Так, например, для круглого силоса значения коэффициентов затухания напряжений:

$$E_2(z) = 1 - \exp\left(-\frac{4f}{ds_2} \cdot z\right), \tag{30}$$

а по Янсону–Кенену:

$$E_0(z) = 1 - \exp\left(-\frac{4fk}{d} \cdot z\right), \quad k = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right). \tag{31}$$

Нетрудно показать, что  $\frac{1}{s_2} > k$ . Равенство имеет место лишь при  $m = 0$ , т.е. для гладких стенок силоса.

Таким образом,  $E_2(z) > E_0(z)$ . То же можно сказать и о коэффициенте затухания в случае плоской ёмкости.

Следовательно, в рассматриваемом решении зона увеличения горизонтального давления на стенки ёмкости до величины, практически равной асимптотическому давлению, уменьшается по сравнению с таковой, соответствующей решению Янсена–Кенена. В соответствии с этим горизонтальные давления  $H$ , вычисленные по формулам (26), (27), превосходят значения  $H$ , найденные по формуле Янсена–Кенена, хотя и имеют тот же асимптотический предел. (Проведенные нами вычисления показали, что для круглых ёмкостей (силосов) значения  $H = R_r$ , вычисленные в соответствии с (27), могут на 25% превышать значения давлений на стенки, найденные по формуле Янсена–Кенена (при определённом значении  $\varphi$ ).

Факт превышения экспериментальных значений горизонтальных давлений на стенки ёмкостей (при второй форме истечения) над соответствующими теоретическими давлениями в 2...3 раза и более неоднократно отмечался многими исследователями (С.Г. Тахтамышев, В.С. Ким, М.С. Бернштейн [32]). Однако полученные здесь и в [1, 34] значения горизонтальных давлений дают максимальное превышение над давлениями по Янсону–Кенену не более, чем на 25%.

**Это обстоятельство говорит о том, что решение, основанное на рассмотрении установившегося режима движения, несжимаемой среды и постоянного угла внутреннего трения, не может описать все весьма сложные изменения напряжённого состояния среды, возникающие после открывания затвора ёмкости и начала процесса истечения.**

2. Решение задачи о неустановившемся движении сжимаемой сыпучей среды в ёмкости по второй форме истечения при переменном угле внутреннего трения.

Будем рассматривать движение сжимаемой нелинейно-упругой сыпучей среды в вертикальной ёмкости, возникающее под действием собственного веса среды при открывании затвора в нижней части ёмкости. Предполагается, что плотность среды зависит от напряжённого состояния в рассматриваемой точке, т.е.  $\rho = \rho(\sigma)$ . Для компонентов напряжения принимаются справедливыми асимптотические зависимости, полученные из уравнений равновесия и условия предельного равновесия. Имеем две основные неизвестные функции:

$$\begin{cases} H = H(u, t), \\ v = v(u, t) \end{cases} \tag{32}$$

– нормальное горизонтальное напряжение и модуль вектора скорости. Учёт сжимаемости среды обязывает полагать  $v$  функцией не только времени, но и координаты  $u$ . Начало координат системы  $(u, w)$  совмещаем с поверхностью сыпучего материала в начальный момент времени  $t = 0$ .

"Вертикальное" напряжение  $S(u, w, t)$  выражается через  $H(u, t)$  по формуле:

$$S(u, w, t) = H(u, t) \cdot \psi(w), \tag{33}$$

где коэффициент  $\psi(w)$  найден из условия предельного равновесия и определяется по формулам, приведенным в п.1. Такой подход позволяет свести эту вторую задачу к исследованию одномерного движения [1]. При решении динамической задачи будем принимать во внимание среднеинтегральное (по сечению) вертикальное напряжение  $S = H \cdot s_i$ , т.е. составлять динамические условия равновесия для элемента высоты  $du$  и площадью  $F$  (или шириной  $a$  в плоской задаче). Так как в этом случае напряжённое состояние в каждой точке определяется напряжением  $H$ :  $\sigma = \sigma(H)$ , следует вывод, что плотность среды есть функция величины  $H$ :  $\rho = \rho(H)$ . В конечном счёте,  $\rho$  является функцией также двух независимых

переменных –  $u$  и  $t$ , т.е. в любой момент времени в пределах одного горизонтального сечения ( $u = const$ ) плотность среды сохраняет постоянную величину.

**Случай постоянного угла внутреннего трения сыпучего материала.** Вначале проведём решение для неустановившегося режима движения с учётом сжимаемости среды при постоянном угле внутреннего трения  $\varphi$ . Отметим, что учёт переменнойности угла внутреннего трения является весьма важным моментом в решении задач, связанных с исследованием предельного равновесия сыпучих сред [1]. Причём величина  $\varphi$  существенным образом зависит от изменения плотности среды. Так, например, по данным, приведенным в [35], изменение плотности песка на 4...5% влечёт за собой изменение коэффициента внутреннего трения почти в 2 раза. Будем предполагать, что величина  $\varphi$ , как и плотность среды, определяется напряжённым состоянием в рассматриваемой точке  $\varphi = \varphi(\sigma)$  или  $\varphi = \varphi(H)$ .

Система двух квазилинейных дифференциальных уравнений первого порядка относительно двух неизвестных функций данной задачи:  $H(u, t)$  и  $v(u, t)$ , – имеет следующий вид:

$$\begin{cases} s_i \frac{\partial H}{\partial u} + \rho(H) \cdot \left( v \frac{\partial v}{\partial u} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) + T_i H - g\rho(H) = 0; \\ v \frac{\partial H}{\partial u} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\rho(H)}{(d\rho/dH)} \cdot \frac{\partial v}{\partial u} = 0. \end{cases} \quad (34)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$T_i = \frac{1}{M_i} \cdot g\rho(H), \quad i = \overline{(1,2)}. \quad (35)$$

Для плоской задачи  $T_1 = \frac{2f}{a}$ , а в случае осесимметричной задачи -  $T_2 = \frac{4f}{d}$ . При этом ни  $s_i$ , ни  $T_i$  не зависят от  $H$ .

Детальное решение системы уравнений (34) дано в [1] с использованием метода характеристик и метода конечных разностей и здесь не приведено. Вертикальные напряжения  $S(u, w, t)$  находятся по формуле (33).

**Случай переменного угла внутреннего трения  $\varphi$  и переменного коэффициента трения сыпучего материала  $f$  о стенку ёмкости.** В этом случае предполагаем, что величины указанных коэффициентов, как и плотность, являются функциями напряжённого состояния в рассматриваемой точке среды. Таким образом, принимая во внимание среднеинтегральное по сечению вертикальное напряжение  $s_i H(u, t)$ , можно записать:

$$\varphi = \varphi(H) = \varphi[H(u, t)]; \quad f = f(H) = f[H(u, t)]. \quad (36)$$

Учёт переменнойности  $\varphi$  и  $f$  скажется на приведенном выше решении системы (34) в [1] лишь в том смысле, что коэффициенты первого уравнения системы (34)  $s_i$  и  $T_i$  будут переменными, а именно будут зависеть от искомой функции  $H$ :  $s_i = s_i(H) = s_i[H(u, t)]; \quad T_i = T_i(H) = T_i[H(u, t)]$ .

Действительно:

$$s_1 = s_1(H) = \frac{1}{a} \int_{-a/2}^{a/2} \psi(y) dy = \frac{1}{\cos^2 \varphi(H)} \cdot \left\{ 1 + \sin^2 \varphi(H) + \sin \varphi(H) \cdot \left[ \sqrt{1 - m^2(H)} + \frac{\arcsin m(H)}{m(H)} \right] \right\}; \quad (37)$$

$$s_2 = s_2(H) = \frac{1}{F} \int_F \psi(r) dF = \frac{1}{\cos^2 \varphi(H)} \cdot \left\{ 1 + \sin^2 \varphi(H) + \frac{4}{3} \sin \varphi(H) \cdot \frac{\left[ 1 - \left( 1 - m^2(H) \right)^{3/2} \right]}{m^2(H)} \right\}; \quad (38)$$

$$T_1 = T_1(H) = \frac{2f(H)}{a}; \quad T_2 = T_2(H) = \frac{4f(H)}{d}. \quad (39)$$

Здесь, в (37), (38) принято обозначение:  $m(H) = f(H)/[\text{tg} \varphi(H)]$ .

Методика решения системы уравнений (34) остаётся в силе, как и в предыдущем случае.

Следует особо остановиться на граничном условии, возникающем в месте перехода цилиндрического бункера в сужающийся – конический бункер (типичная схема выпускного устройства ёмкости, хранящей сыпучий материал). В практике эксплуатации силосов нижняя часть их ёмкости имеет вид суживающейся горловины. Именно в зоне выпуска сыпучего материала (в горловине) происходит

бифуркация его состояния, а именно – интенсивное разрыхление, связанное с резким падением коэффициента внутреннего трения. В связи с этим свойства сыпучего материала в этой зоне приближаются к свойствам идеальной жидкости [1]. При мгновенном открывании затвора возникает скачкообразное изменение величины давления в этом сечении, что может привести к образованию распространяющейся волны сильных разрывов. В этом случае решение на волне сильного разрыва может быть получено из динамических условий совместности, а сама волна должна быть принята за линию начальных условий, от которой следует отправляться при построении решения задачи во всей области его существования. Подобные эффекты могут возникнуть и при мгновенном закрывании затвора во время истечения сыпучего из ёмкости (скачки уплотнения). Будем считать, что зависимость плотности от давления для рассматриваемой среды удовлетворяет энергетическому критерию возможности существования волн сильного разрыва при сжатии, данному Х.А. Рахматулиным в [36].

В рамках возможного объёма данной статьи приведём, как пример, алгоритм определения горизонтального давления на стенки вертикальной составляющей ёмкости цилиндрически-конического силоса (именно в месте перехода от цилиндрической поверхности к конической) при мгновенном открывании затвора, находящегося в конце сужающейся горловины (его конической части).

Нижняя часть ёмкости на уровне  $u = L$  имеет переход от цилиндрической поверхности к сужающейся конической. Требуется на этом уровне определить величину  $H_+$  при мгновенном открывании затвора. (Знаки в виде индексов внизу означают следующее: "+" – область позади волны сильного разрыва; "-" – область перед волной сильного разрыва). Будем считать при этом, что угол внутреннего трения  $\varphi$  и плотность сыпучего материала  $\rho$  являются функциями среднеинтегрального по сечению вертикального давления в данном сечении  $p$ , т.е.  $\varphi = \varphi(p)$ ,  $\rho = \rho(p)$ . Выведем расчётную формулу для определения  $H_+$ . Динамические условия совместности имеют вид:

$$\rho \cdot (v_+ - v_-) = s_+ H_+ - s_- H_-; \rho_+ \theta_+ = \rho_- \theta_-, \tag{40}$$

где  $\theta$  – скорость распространения волны сильного разрыва. В момент выхода этой волны из сечения  $u = L$ :

$$p_+ = s_+ H_+ = p_1; p_- = s_- H_- = p_{cm}; v_- = 0; \theta_+ = N(u) - v_+ = -(N + v_+); \theta_- = N(u) - v_- = -N. \tag{41}$$

Здесь  $N(u)$  – скорость перемещения волны сильного разрыва. Скорость распространения волны сильного разрыва  $\theta$  и скорость её перемещения  $N(u)$  связаны соотношением:

$$\theta = N(u) - v. \tag{41}$$

(Следует отметить, что скорость перемещения  $N(u)$  – функция непрерывная. Скачки скорости распространения волны  $\theta$  обусловлены именно наличием скачков функции  $v$ . Введём для удобства следующее обозначение модуля вектора скорости перемещения волны сильного разрыва:  $N = |N(u)|$ ). В (41) значение  $p_{cm}$  находим из статического расчёта. Граничное условие при  $u = L$  имеет вид:

$$p_1 + \rho_0 g h + 0,5 \rho_0 v_1^2 = p_2 + 0,5 \rho_0 v_2^2, \tag{42}$$

где  $p_1 = p_+; p_2 = 0; \Omega_1 v_1 = \Omega_2 v_2; v_1 = v_+$ . Здесь  $\rho_0$  – средняя плотность сыпучего материала на участке  $u \in [L, L+h]$ ,  $h$  – высота сужающейся конической части силоса,  $\Omega_{1,2}$  – площадь поперечного сечения силоса/потока сыпучего тела при  $u = L$  и  $u = L+h$ , соответственно.

Тогда система трёх уравнений с тремя неизвестными функциями  $N, v_+, p_+$  может быть записана в форме:

$$\begin{cases} N \rho_- v_+ = p_- - p_+; N \rho_- = (N + v_+) \rho_+; \\ p_+ = \mu \cdot \frac{\rho_0}{2} v_+^2 - g \rho_0 h, \end{cases} \tag{43}$$

где  $\mu = \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right)^2 - 1$ . Из первого уравнения (43) имеем:

$$N = \frac{p_- - p_+}{\rho_- v_+}. \tag{44}$$

Подставляя (44) во второе уравнение (43), найдём:

$$v_+^2 = (p_- - p_+) \cdot \left(\frac{1}{\rho_+} - \frac{1}{\rho_-}\right). \tag{45}$$



Вводя (45) в третье уравнение (43), получим:

$$p_+ = \mu \cdot \frac{\rho_0}{2} \cdot (p_- - p_+) \cdot \left( \frac{1}{\rho_+} - \frac{1}{\rho_-} \right) - g\rho_0 h, \quad (46)$$

или после некоторых преобразований:

$$\frac{\mu}{2} \cdot (p_- - p_+) \cdot \left( \frac{1}{\gamma_+} - \frac{1}{\gamma_-} \right) \cdot \gamma_0 - p_+ - \gamma_0 h = 0. \quad (47)$$

В (47)  $\gamma_+ = g\rho_+ = g\rho(p_+)$ ;  $\gamma_- = g\rho_- = g\rho(p_-)$ ;  $\gamma_0 = g\rho_0$ . Значение  $\rho_0$  может быть определено по формуле:

$$\rho_0 = 0,5 \cdot (\rho(0) + \rho(p_+)). \quad (48)$$

Величина  $p_- = p_{cm}$  определяется на основании статического расчёта методом конечных разностей [1].

Таким образом, уравнение (47) содержит одну неизвестную величину  $p_+$ , определяющую искомое значение  $H_+$ .

**Следует подчеркнуть, что (47) является основным расчётным уравнением при исследовании явлений, сопутствующих мгновенному открыванию затворов ёмкостей. Оно либо непосредственно определяет искомое значение  $H_+$ , если последнее ищется в сечении  $u = L$  (в месте образования и выхода волны сильного разрыва), либо определяет начальное значение  $H_+$ , на основании которого находится решение на перемещающейся волне сильного разрыва, если значение  $H_+$  ищется в промежуточной точке по высоте ёмкости (силоса).**

При расчётах по формуле (47) необходимо знать наперёд зависимости  $\varphi(p)$  и  $\gamma(p)$ . Зависимость  $\gamma(p)$  характеризуется зоной интенсивного уплотнения (разрыхления) сыпучего материала, а зоне уплотнения (разрыхления) среды соответствует в зависимости  $\varphi(p)$  зона интенсивного повышения (понижения) угла внутреннего трения (т.е. происходит бифуркация внутренних физических свойств сыпучего материала).

Горизонтальное давление на стенку ёмкости (силоса) на уровне  $u = L$  в момент открытия затвора определяется по формуле:

$$H_+ = p_+ / s_+. \quad (49)$$

Величина коэффициента увеличения бокового давления находится из соотношения:

$$k = H_+ / H_-. \quad (50)$$

Скорость перемещения волны сильного разрыва  $N$  в момент выхода её из сечения  $u = L$  рассчитывается по формуле:

$$N = \sqrt{\frac{\rho_+ \cdot (p_- - p_+)}{\rho_- \cdot (\rho_- - \rho_+)}}. \quad (51)$$

При определении  $k$ , как правило, максимальное значение последнего (по высоте ёмкости/силоса) имеет место в том сечении, где  $p_{cm} = p_-$  соответствует зоне интенсивного разрыхления сыпучего материала (зависимость  $\gamma(p)$ ). Мы здесь условно приняли, что эта зона соответствует сечению  $u = L$ . (Вообще говоря, максимальное увеличение бокового давления может иметь место и в промежуточных сечениях по высоте ёмкости (силоса/бункера)).

По нашему мнению, **необходимо осуществлять постоянный мониторинг  $p_{cm}$  в зоне  $u = L$  для определения (по известной наперёд для конкретного сыпучего материала зависимости  $\gamma(p)$ ) момента, когда удельный вес материала (или его плотность) достигает критической величины, соответствующей зоне его интенсивного уплотнения (разрыхления), с целью предотвращения возникновения волн сильного разрыва при открывании (закрывании) выпускного затвора. Для этой цели можно использовать средства современной мехатроники (датчики) и своевременно задействовать специальные сводоразрушающие устройства (основанные на принципах вибрационного воздействия на материал через стенку силоса [30]), позволяющие существенно уменьшить величину бокового давления в опасных сечениях ( $u \approx L$ ) оболочки ёмкости (силоса/бункера).**

3. Модели неравновесной механики в анализе общих закономерностей адаптации и управления сводоразрушающими устройствами при выгрузке сыпучих материалов из глубоких бункеров.

С развитием нового направления фундаментальной науки – неравновесной механики – появилась возможность разработки адаптивных средств механизации. В основе этого направления заложено

представление о движении вообще, как о любом процессе расхода или накопления энергии в физических системах, а также как о процессе перехода энергии из одного вида в другой [37, 38]. В замкнутой системе полная энергия сохраняется, происходит лишь переход кинетической энергии в потенциальную энергию и обратно. Для открытой системы важным является баланс притока энергии извне и её отток наружу. Эта система способна проявлять постоянную устойчивость в неустойчивом мире за счёт специальных актов: поглощения энергии извне или отдачи её. Когда баланс потока энергии изменяется, открытая система реагирует изменением ансамбля своих функций. А это, в свою очередь, обязательно означает изменение её структуры. Поэтому структура открытой системы претерпевает изменения гораздо чаще, и сами эти изменения гораздо разнообразнее, чем у замкнутых систем.

Многообразие изменений структуры открытой системы принято называть адаптацией, т.е. система "адаптируется" между устойчивыми траекториями. Изменение в структуре системы выражается через энергию, и изменение структуры физической системы означает изменение её потенциальной энергии, а вместе с ней и формы действия.

В наиболее распространённом определении устойчивость природной системы – это её способность сохранять свою структуру и характер функционирования в пространстве и во времени при изменяющихся условиях среды. Следует отметить и существенное влияние самой структуры или внутренних системообразующих факторов на её устойчивое функционирование в составе систем более высокого уровня [39].

Профессор Беспмятнова Н.М. [40] разработала теоретические основы решения адаптационных задач. В их основу положены теория управления системами и теория параметрически возбуждаемых систем при наложении на решения уравнений местных ограничений в виде агротехнического допуска на исследуемый процесс, что позволяет определить целенаправленность изменения структуры системы, допустимые частотные интервалы и вид необходимых управляющих воздействий на них. Технологические процессы при этом могут быть представлены как результат взаимодействия открытых распределённых систем и являются колебательными процессами (в широком смысле) со взаимным переходом энергии из одной системы в другую: "условие функционирования – среда – машина".

Изменения структуры, состояния сыпучего (зернового) материала при истечении его из силоса (бункера), имеющего адаптационный характер, удобнее всего, с нашей точки зрения, рассматривать с позиций теории синергетики [41].

Относительно проблемы, рассматриваемой в данном исследовании, можно утверждать следующее. В ходе взаимодействия сводоразрушающего устройства с сыпучим (зерновым) материалом происходит обмен энергией и информацией между изначальной направленностью потока истечения сыпучего (зернового) материала и задаваемой сводоразрушающим устройством направленностью. В таком взаимодействии порождается неравновесная устойчивость системы "сводоразрушающее устройство – сыпучий (зерновой) материал", структурные компоненты которой, несмотря на неравенство весовых вкладов, обеспечивают стабильное истечение потока сыпучего (зернового) материала после воздействия на него сводоразрушающего устройства. В результате взаимодействия технической, исполнительной системы (сводоразрушающего устройства) с открытой системой (зерновым материалом) возникает новая структура и составляющие её функционирования [42].

**В качестве критерия оптимизации целенаправленного изменения в структуре технической системы используем принцип термодинамики, в частности, явление энтропии при обмене энергией и информацией в процессе взаимодействия рабочих органов с сыпучим (зерновым) материалом, при котором обеспечивается неравновесная устойчивость системы. При взаимодействии с сыпучим (зерновым) материалом необходимо целенаправленно изменять степень её (системы) упорядоченности, т.е. сообщать потокам сыпучего (зернового) материала движение с необходимым числом степеней свободы, что и является механизмом адаптации к заданным условиям.**

Отсюда вытекает необходимость установить более удобный вид управляющего воздействия сводоразрушающих устройств на истекающий из бункера сыпучий (зерновой) материал.

Для получения равномерного истечения зернового материала из глубокого осесимметричного силоса (бункера) необходимо определить существующие для сыпучих (зерновых) материалов зоны устойчивости их истечения, обеспечить точку неустойчивого фокуса в системе и выбрать режим её работы на границе устойчивости, который обеспечивается следующим соотношением частоты колебаний сводоразрушающего устройства ( $\omega_\lambda$ ) и собственной частоты колебаний истекающего сыпучего (зернового) материала ( $\omega_0$ ) [40]:

$$\tilde{m} = \left( \frac{4\omega_\lambda / k}{\omega_\lambda^2 / k^2 - 4 - \omega_\lambda^2 / \omega_0^2} \right) > \frac{2\omega_\lambda^2}{\omega_0^2}, \text{ при } k = 1c^{-1}, \quad (52)$$

где  $\tilde{m}$  – критерий движения потока сыпучего (зернового) материала.

По данной зависимости (52) следует построить график устойчивости возмущённого движения зернового материала из силоса/бункера под воздействием частоты колебаний сводоразрушающего устройства, установленного в нём. Величину  $\omega_0$  можно найти из соотношения:

$$\omega_0 = \frac{\Omega_1}{\Omega_2 \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{2gh}{\left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right)^2 - 1}}. \quad (53)$$

На указанном выше графике появляются характерные зоны, в которые попадает критерий движения потока сыпучего (зернового) материала ( $\tilde{m}$ ) в зависимости от соотношения  $2\omega_\lambda^2/\omega_0^2$ . Затем устанавливается центр вариационной системы (особая точка), соответствующий цели исследуемого процесса ( $z = 0$ ).

При совпадении частот колебаний  $\omega_\lambda$  и  $\omega_0$  для особой точки возникает резонанс, а вокруг него – биение. Если ограничить биение особой точки определёнными значениями, то станет возможным управление исследуемым процессом.

Таким образом, если уподобить особую точку (центр бифуркации) средним значением заданного процесса истечения сыпучего (зернового) материала из силоса (бункера), то ограничение биения вокруг особой точки возможно задавать (агро-) техническими требованиями. Нахождение соответствующего взаимодействия частот  $\omega_\lambda/\omega_0$  и позволит задавать режим работы сводоразрушающего устройства.

Проведенный компьютерный анализ графика устойчивости возмущённого движения сыпучего (зернового) материала из силоса/бункера под воздействием частоты колебаний сводоразрушающего устройства показал, что нестационарные колебания ( $z = 0$ ) истечения сыпучего (зернового) материала из глубокого силоса (бункера) могут иметь три зоны возможного истечения в зависимости от соотношений возбуждающей  $\omega_\lambda$  и возбуждаемой  $\omega_0$  частот колебаний системы [43].

**1. Зона  $\tilde{m} < (-2\omega_\lambda^2/\omega_0^2)$  наиболее вероятного образования статически устойчивых сводов.**

Возмущающая частота сводоразрушающего устройства не превышает собственную частоту потока истечения сыпучего (зернового) материала  $\omega_0$ .

**2. Зона  $(-2\omega_\lambda^2/\omega_0^2) < \tilde{m} < (2\omega_\lambda^2/\omega_0^2)$  возможного уплотнения истекающего из силоса (бункера) сыпучего (зернового) материала.**

При этом в идеале в силу самой природы действия вибрации на обрабатываемую среду может наступить момент, когда полностью прекратится истечение сыпучего (зернового) материала из выпускного отверстия силоса (бункера). В этом случае сводоразрушающее устройство не разрыхляет, а уплотняет истекающий сыпучий материал. Это зона невосприимчивости сыпучего (зернового) материала к внешнему воздействию.

**3. Зона  $\tilde{m} > (2\omega_\lambda^2/\omega_0^2)$  неустойчивого состояния между частотой сводоразрушающего устройства  $\omega_\lambda$  и потока истекающего сыпучего (зернового) материала  $\omega_0$ .**

При этом возможен вариант частот, когда появление и разрушение динамических сводов в сыпучем (зерновом) материале имеет постоянный характер, что способствует равномерному истечению его из силоса (бункера). Наблюдается это на границе устойчивости системы.

Однако не следует забывать (!), что с увеличением частоты пульсации сыпучего (зернового) материала дозирующая способность силоса/бункера повышается, но при этом чрезмерное увеличение частоты пульсации отрицательно сказывается на сроке службы самой ёмкости хранения материала. Стенки ёмкости испытывают повышенные динамические знакопеременные нагрузки, приводящие к усталости материала стен и к последующему его разрушению [44].

С целью выбора оптимума между равномерностью истечения сыпучего (зернового) материала и давлениями, действующими в бункере, внутри него устанавливается сводоразрушающее устройство с регламентированными характеристиками (которые, в свою очередь, постоянно контролируются (осуществляется непрерывный мониторинг) средствами мехатроники).

Равномерное истечение разных видов сыпучих (зерновых) материалов из глубоких силосов/бункеров возможно только на границе устойчивости системы между зоной 2 ( $(-2\omega_\lambda^2/\omega_0^2) < \tilde{m} < (2\omega_\lambda^2/\omega_0^2)$ ) и зоной 3 ( $\tilde{m} > (2\omega_\lambda^2/\omega_0^2)$ ), т.е. в резонансной зоне.

При этом с увеличением собственной частоты колебаний истекающего из силоса/бункера потока сыпучего (зернового) материала  $\omega_0$  зона возможного уплотнения материала сужается, а границы устойчивого состояния системы становятся более пологими, вследствие чего происходит смещение точки

неустойчивого фокуса системы, т.е. частотные уровни рабочих процессов сводоразрушающего устройства возрастают. Пребывание в зоне неустойчивого состояния системы увеличивается. Это характерно для любого сыпучего (зернового) материала.

#### Выводы

1. Обоснована физико-механическая модель истечения сыпучих материалов из глубоких бункеров и силосов по второй форме, позволяющая установить основные закономерности этого истечения, а также основные характеристики потока материала из ёмкости хранения при его выгрузке.
2. Предложена система мониторинга основных характеристик истекающего материала, позволяющая избегать образований внутри ёмкости сводов, препятствующих выгрузке из неё хранящегося материала. Эта система может функционировать на основе специальных датчиков и аппаратурного обеспечения современной мехатроники.
3. Создание управляемых адаптивных сводоразрушающих устройств с регламентированными характеристиками возможно при определении оптимального диапазона частоты их режимов на основе взаимодействия частот истечения реальных сыпучих (зерновых) материалов и сводоразрушающих устройств. Для этого необходимо определить реальные диапазоны частот колебаний сводоразрушающих устройств  $\omega_\lambda$ , их попадания в характерные зоны, возможные собственные частоты  $\omega_0$  стабильного истечения сыпучих (зерновых) материалов из силосов/бункеров, их соотношения и задаваемые на их основе режимы работы сводоразрушающих устройств, частоты их вибрации.
4. Полученные в данном исследовании результаты могут быть в дальнейшем использованы для уточнения и совершенствования инженерных методов расчёта сводоразрушающих устройств, используемых для непрерывного (плавного) истечения (выгрузки) сыпучих (зерновых) материалов из глубоких силосов/бункеров как на стадиях их проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации.

#### Список использованной литературы

1. Гениев Г.А. Вопросы динамики сыпучей среды / Г.А. Гениев. // ЦНИИСК. Научное сообщение. Вып. 3. – М.: Госстройиздат, 1958. – 123 с.
2. Гячев Л.В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах / Л.В. Гячев. – М.: Машиностроение, 1968. – 184 с.
3. Janssen H.A. Versuche uber Getreidedruck in Silozellen (Tests on Grain Pressure Silos) / H.A. Janssen // Z.d. VDI. – 1895. – В. XXXIX. – № 35. – P. 1045-1049.
4. Фрид М. Результаты опытов давления зерна на дно и стены глубоких сосудов / М. Фрид // Журнал МПС. – 1890. – Апрель-май. – С. 921-933.
5. Делаacroа А.Е. Опыт непосредственного определения давления зерна в закромах элеваторов / А.Е. Делаacroа // Журнал МПС. – 1894. – Кн. 3. – С. 280-290.
6. Шумский Д.В. Давление зерна на дно и стены закромов / Д.В. Шумский // Советское мукомолье и хлебопечение. – 1929. – №1. – С. 7-13; №2. – С. 81-89.
7. Колычев В.И. Зернохранилища и элеваторы / В.И. Колычев. – М.-Л.: Сельхозгиз, 1932. – 580 с.
8. Гутьяр Е.М. Распределение давления на стенки силосной башни / Е.М. Гутьяр // Труды Московского автодорожного института. – 1935. – №2. – С. 182-184.
9. Сорокин Н.В. Обобщение формулы Янсена для силосов, наполненных разнородными материалами / Н.В. Сорокин // Советское мукомолье и хлебопечение. – 1934. – №3. – С. 16-17.
10. Сорокин Н.В. Давление сыпучих тел на стены и дно силосов переменного сечения / Н.В. Сорокин // Советское мукомолье и хлебопечение. – 1935. – №4. – С. 17-20.
11. Сорокин Н.В. Давление вытекающего зерна на стены и дно силосов / Н.В. Сорокин // Советское мукомолье и хлебопечение. – 1936. – №2. – С. 23-26.
12. Jenkin C.F. The Pressure Exerted by Granular Material: an Application of the Principles of Dilatancy / C.F. Jenkin // Proceedings of Royal Society of London. Ser. A. – 1931. – Vol. 131. – P. 53-89.
13. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов / Р.Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964. – 251 с.
14. Тадмор З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
15. Walker D.M. An Approximate Theory for Pressures and Arching in Hoppers / D.M. Walker // Chem. Eng. Sci. – 1966. – Vol. 21. – P. 975-997.
16. Jenike A.W. Gravity Flow of Bulk Solids/A.W. Jenike//Bulletin of the Utah Engineering Experimental Station. - University of Utah, Salt Lake City, 1961. – No. 108.
17. Bransby P.L. Wall Stresses in Mass-Flow Bunkers / P.L. Bransby, P.M. Blair-Fish // Chem. Eng. Sci. – 1974. – Vol. 29. – P. 1061-1074.

18. Циборовский Я. Свободное истечение сыпучего материала через отверстие в конусном днище сосуда / Я. Циборовский, М. Бондзыньски // Инженерно-физический журнал. – Минск, 1963. – Т. VI. – Вып. 7. – С. 26-35.
19. Покровский Г.И. Об истечении сыпучих тел / Г.И. Покровский, А.И. Арефьев // Журнал технической физики. – 1937. – Т. VII. – Вып. 4. – С. 424-427.
20. Линчевский И.П. К вопросу об истечении сыпучих тел / И.П. Линчевский // Журнал технической физики. – 1939. – Т. IX. – Вып. 4. – С. 343-347.
21. Платонов П.Н. Пропускная способность выпускных отверстий силосов и бункеров / П.Н. Платонов, Е.А. Банит // Мукомольно-элеваторная промышленность. – 1958. – №8. – С. 28-30.
22. Johanson J.R. Feeding / J.R. Johanson // Chem. Eng. – 1969. – October 13. – P. 75-82.
23. Brown R.L. Principles of Powder Mechanics / R.L. Brown, J.C. Richards. – Oxford: Pergamon Press, 1970. – 236 p.
24. Richmond O. Limiting Spans for Arching of Bulk Material in Vertical Channels / O. Richmond, G.C. Gardner // Chem. Eng. Sci. – 1962. – Vol. 17. – P. 1071-1078.
25. Richmond O. Gravity Hopper Design / O. Richmond // Mech. Eng. – 1963. – January. – P. 46-49.
26. Brown R.L. The Internal Flow of Granular Masses / R.L. Brown, P.G. Hawksley // Fuel. – 1947. – Vol. 26. – P. 171.
27. Lee J. An Experimental Study of the Kinematics of Flow Through Hoppers / J. Lee, S.C. Cowin, J.S. Templeton // Trans. Soc. Rheol. – 1974. – Vol. 18. – P. 247-269.
28. Levinson M. Displacement Velocity Fields in Hoppers / M. Levinson, B. Shmutter, W. Resnick // Powder Technol. – 1977. – Vol. 16. – P. 29-43.
29. Butterfield R.A Stereophotogrammetric Method of Measuring Displacement Fields / R. Butterfield, R.M. Harkness, K.Z. Andrews // Geotechnique. – 1970. – Vol. 8. – P. 308.
30. Анибаев С.М. Об истечении сыпучего материала из щелевого бункера при вибрации одной из наклонных стенок / С.М. Анибаев, Семипалатинский технол. ин-т мясной и молочной пром-ти, 1990. – Рукопись деп. в Казахском НИИТИККИ, Алма-Ата, 1990. – № 9. – 106173. – 7 с.
31. Добровольская С.Г. Общие закономерности адаптации и управления сводоразрушающими устройствами при выгрузке зерновых материалов из глубоких бункеров / С.Г. Добровольская // Хранение и переработка зерна. – 2015. – №1 (190). – С. 33-36.
32. Бернштейн М.С. Форма истечения и давления зерна в силосах / М.С. Бернштейн // Сб. статей "Исследовательские работы по инженерным конструкциям" / Под ред. В.В. Бургмана. – М.: Стройиздат, 1949. – Вып. II. – С. 139-168.
33. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М.: Гостехиздат, 1954. – 213 с.
34. Гениев Г.А. Теория установившегося движения сыпучей среды / Г.А. Гениев // Сб. "Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных материалов". – М.: Гос. Изд-во л-ры по строительству и архитектуре, 1955. – 114 с.
35. Бернштейн М.С. О статических свойствах несвязного сыпучего тела в предельном равновесии / М.С. Бернштейн, А.Г. Иммерман // Сб. Исследования, "Массивные и стержневые конструкции". – М.: Гос. изд-во по строительству и архитектуре, 1952. – 321 с.
36. Рахматулин Х.А. О распространении плоских волн в упругой среде при нелинейной зависимости напряжений от деформации / Х.А. Рахматулин // Учёные записки МГУ. – 1951. – Вып. 152.
37. Бергаланфи Л. Общая теория систем – критический обзор / Л. Бергаланфи // Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23-82.
38. Дубошин Г.Н. Основы теории устойчивости движения / Г.Н. Дубошин. – М.: Изд-во МГУ, 1952. – 97 с.
39. Курдюмов С.П. Самоорганизация сложных систем / С.П. Курдюмов // Экология и жизнь. – 2001. – № 5. – С. 42-45.
40. Беспаятнова Н.М. Научно-методические основы адаптации почвообрабатывающих машин / Н.М. Беспаятнова. – Ростов-на-Дону: Тера, 2002. – 175 с.
41. Хакен Г. Синергетика / Г. Хакен. – М.: Мир, 1980. – 405 с.
42. Добровольская С.Г. Методология синтеза адаптивных сводоразрушающих устройств, установленных в глубоких осесимметричных бункерах (силосах) / С.Г. Добровольская // Технология и механизация животноводства. – зерноград, 2002. – Вып. 1. – С. 74-76.
43. Добровольская С.Г. Теоретические расчёты по условиям устойчивого истечения разных видов зернового, сыпучего материала из глубокого бункера / С.Г. Добровольская // Научная молодёжь – агропромышленному комплексу. – зерноград, 2003. – С. 84-89.
44. Добровольская С.Г. Динамические нагрузки, действующие в сыпучем теле при его движении в глубоких ёмкостях / С.Г. Добровольская // Механика дискретных сред. – зерноград, 2002. – С. 29-34.

УДК 539.3

Т.С. КАГАДИЙ  
НТУ Дніпровська політехніка  
О.В. БЕЛОВА, І.В. ЩЕРБИНА  
Національна металургічна академія України

### ОБОБЩЕНИЕ РЕШЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ МЕТОДОМ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ТЕЛ С ЛИНЕЙНОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

*Приведены аналитические решения двух новых контактных задач. В первой из них материал пластины обладает прямолинейной, во второй – криволинейной анизотропией. Для решения применен метод возмущения, разработанный в [1]. Сохранена основная идея подхода, когда на основе асимптотического интегрирования задачи теории упругости сводятся к последовательному решению задач теории потенциала, проведены необходимые обобщения метода. Выполнены различные асимптотические оценки.*

*Ключевые слова:* асимптотический метод, ортотропный материал, контактное усилие, прямолинейная анизотропия, цилиндрическая анизотропия.

Т.С. КАГАДИЙ  
НТУ Дніпровська політехніка  
О.В. БЕЛОВА, І.В. ЩЕРБИНА  
Національна металургічна академія України

### УЗАГАЛЬНЕННЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ КОНТАКТНИХ ЗАДАЧ МЕТОДОМ ЗБУРЕНЬ ДЛЯ ТІЛ З ЛІНІЙНОЮ І ЦИЛІНДРИЧНОЮ АНІЗОТРОПІЄЮ

*Наведено аналітичні розв'язки двох нових контактних задач. У першій з них матеріал пластины має прямолінійну, у другій - криволінійну анізотропію. Для розв'язання застосований метод збурення, розроблений в [1]. Збережена основна ідея підходу, коли на основі асимптотичного інтегрування задачі теорії пружності зводяться до послідовного розв'язування задач теорії потенціалу, проведені необхідні узагальнення методу. Виконано різні асимптотичні оцінки.*

*Ключові слова:* асимптотичний метод, ортотропний матеріал, контактне зусилля, прямолінійна анізотропія, циліндрична анізотропія

T.S. KAGADIY  
NTU Dnieper Polytechnic  
O.V. BELOVA, I.V. SHCERBINA  
National Metallurgical Academy of Ukraine

### GENERALIZATION OF SOLVING THE CONTACT PROBLEMS BY THE PERTURBATION METHOD FOR BODIES WITH LINEAR AND CYLINDRICAL ANISOTROPY

*Planar problems about load transfer by one-dimensional elastic elements to two-dimensional complex bodies are of interest for analysis and calculation of mechanical tensions in a variety of airplane constructional elements, for example plates joined with stringers or overlays. Such types of problems have quite a long history and have been sufficiently researched for elastic isotropic as well as for anisotropic infinite or semi-infinite bodies. Similar problems in case of finite and especially multilayered bodies have been significantly less studied. This paper describes such complicated new cases of load transfer and demonstrates how to solve them using of an asymptotic method based on ideas of L.I. Manevich and A.V. Pavlenko. The considered issue is a contact problem about a load transfer by an elastic sustaining element (stringer) to an elastic plate which consists of two joined orthotropic rectangles made of different materials and is fixed at two opposite edges. The stringer is placed in the middle between the other two (free) edges in such a way that the axis of the stringer is perpendicular to the plate's edge and continuously attached to it. The scheme of line contact is assumed to be used here. The paper presents investigation of flat problems considering a load transmission by an elastic rod to an elastic anisotropic half-space through application of various loading types (i.e. uniform and non-uniform distribution of a load). Various asymptotic estimations at "small" and "big" arguments  $x$  have been done. The proposed method has been generalized taking into account also curvilinear coordinates. In particular, the problem about the elastic plate  $R_0 \leq r < \infty, -\gamma \leq \theta \leq \gamma$  fixed at the edges  $\theta = \pm\gamma$  was considered. The boundary  $r = R_0$  remains free, the stresses and the deformations are absent at infinity. Along the medial radius ( $\theta = 0$ ) the plate is strengthened by a stringer which is loaded by longitudinal*

efforts  $P_0$ . The material of the plate is orthotropic; the main directions of anisotropy coincide with the polar coordinates  $r, \theta$ . Analytical solutions of two new contact problems are given. In the first of these, the material of the plate has a rectilinear, in the second - curvilinear anisotropy. For the solution, the perturbation method developed in [1] is applied. The basic idea of the approach is preserved, when on the basis of asymptotic integration the problems of the theory of elasticity are reduced to a sequential solution of the problems of potential theory, necessary generalizations of the method are carried out. Various asymptotic estimates are fulfilled.

Keywords: asymptotic method, orthotropic material, contact force, rectilinear anisotropy, cylindrical anisotropy.

**Постановка проблемы и изложение основного материала исследования**

**1. Задача о контактном взаимодействии ортотропного прямоугольника, обладающего линейной анизотропией со штампом.**

Пусть упругий ортотропный прямоугольник  $0 \leq x \leq h$ ,  $|y| \leq b$  закреплен по кромкам  $y = \pm b$ . В грань прямоугольника ( $x = 0$ ) вдавливается жесткий прямоугольный штамп ширины  $2l$  ( $l < b$ ), который под действием центральной силы  $P_0$  движется поступательно параллельно оси  $Ox$ . На штамп действует сдвигающая сила  $Q_0$ . Между штампом и прямоугольником учитывается сила трения, подчиняющаяся закону Кулона. Рассматривается состояние предельного равновесия штампа. Противоположная грань прямоугольника ( $x = h$ ,  $y < b$ ) остается свободной. Прямоугольник представляет собой пластину толщины  $h_*$ , работающую в условиях обобщенного плоского напряженного состояния. Требуется определить закон распределения напряжений под штампом и в прямоугольнике.

Задача сводится к интегрированию уравнений равновесия прямоугольника в перемещениях:

$$B_1 u_{xx} + G u_{yy} + m G v_{xy} = 0, \quad B_2 v_{yy} + G v_{xx} + m G u_{xy} = 0 \tag{1}$$

при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} = \sigma_{12} = 0 \quad (x = 0, \quad l < |y| < b), \quad u = const, \quad \sigma_{12} = \rho \sigma_{11} \quad (x = 0, \quad |y| < l), \\ u = v = 0 \quad (y = \pm b), \quad \sigma_{11} = \sigma_{12} = 0, \quad (x = h, \quad |y| < b), \end{aligned} \tag{2}$$

где  $B_j = \frac{E_j h_*}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}$ ,  $G = G_{12} h_*$ ,  $m = 1 + \nu_{21} \frac{B_1}{G}$ .

Здесь  $E_1, E_2$  – модули упругости вдоль главных направлений  $Ox, Oy$ ,  $\nu_{12}, \nu_{21}$  – коэффициенты Пуассона,  $G_{12}$  – модуль сдвига,  $\sigma_{11}, \sigma_{22}$  – нормальные напряжения,  $\sigma_{12} = \sigma_{21}$  – касательные напряжения;  $u$  и  $v$  – компоненты вектора перемещений;  $h_*$  – толщина пластинки; индексы  $x$  и  $y$  означают дифференцирование по соответствующим координатам.

Кроме того, должны быть выполнены условия равновесия штампа:

$$\int_{-l}^l \sigma_{11}(0, y) dy + P_0 = 0, \quad \int_{-l}^l \sigma_{12}(0, y) dy + Q_0 = 0. \tag{3}$$

Задача решается асимптотическим методом [1]. Для нахождения аналитической в прямоугольнике  $0 \leq x_1 \leq h$ ,  $|y_1| \leq \beta$  функции  $u^{1,0}$  по заданным граничным условиям (2) отображают прямоугольник из плоскости  $z_1$  ( $z_1 = y_1 + ix_1$ ) в полуплоскость изображений плоскости  $\zeta_1$  ( $\eta_1 = \eta_1 + i \xi_1$ ) с помощью функции

$$Z_1 = c_1 \int_0^{\zeta_1} \frac{d\zeta_1}{\sqrt{(1 - \zeta_1^2)(1 - k_1^2 \zeta_1^2)}}, \tag{4}$$

причем параметры  $k_1$  ( $0 < k_1 < 1$ ) и  $c_1$  определяют из уравнений:

$$\beta = c_1 \int_0^1 \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2t^2)}} = c_1 K(k_1), \quad h_1 = c_1 \int_1^{1/k_1} \frac{dt}{\sqrt{(t^2-1)(1-k_1^2t^2)}} = c_1 K(k_1') \quad (5)$$

где  $K(k_1)$  – полный эллиптический интеграл первого рода  $k_1' = \sqrt{1-k_1^2}$ .

Тогда  $\frac{K(k_1')}{K(k_1)} = \frac{h_1}{\beta} = \alpha_1$ . Так как на границе полуплоскости  $\zeta_1$  в интервале  $|\eta_1| < l_1$  действительная часть функции  $\varphi_1^0$  равна нулю, а на остальной части мнимая ее часть равна нулю, то решение для функции  $\varphi_1^0$  во всей полуплоскости имеет вид:

$$\varphi_1^0(\zeta_1) = \frac{A}{\sqrt{\zeta_1^2 - l_1^2}}, \quad (6)$$

где  $A$  – действительная постоянная; выбирается та ветвь корня, которая положительная при положительных значениях аргумента.

Действительная и мнимая часть  $\varphi_1^0(\zeta_1)$  определяют функции  $u_{y_1}^{1,0}$  и  $u_{x_1}^{1,0}$ .

$$\text{При } \xi_1 = 0 \quad (x_1 = 0; \text{ или } y_1 = \pm\beta; \text{ или } x_1 = h_1, \quad |y_1| < \beta) \quad \varphi_1^0(\eta_1) = \frac{A}{\sqrt{\eta_1^2 - l_1^2}},$$

$$u_{y_1}^{1,0} = 0, \quad u_{x_1}^{1,0} = \frac{A}{\sqrt{l_1^2 - \eta_1^2}} \quad (|\eta_1| < l_1), \quad u_{y_1}^{1,0} = \frac{A}{\sqrt{\eta_1^2 - l_1^2}}, \quad u_{x_1}^{1,0} = 0 \quad (|\eta_1| > l_1), \quad (7)$$

где  $\eta_1 = sn(K(k_1)y_1/\beta, k_1)$ .

$$A = -\frac{P_0}{2\sqrt{GB_1} c_1 \mu}, \quad \text{где } \mu = \int_0^{l_1} \frac{d\eta_1}{\sqrt{(l_1^2 - \eta_1^2)(1 - \eta_1^2)(1 - k_1^2 \eta_1^2)}}. \quad (8)$$

Нормальное напряжение  $\sigma_{11}^{1,0}$  и составляющая касательного напряжения  $\sigma_{12}$ , соответствующая функции  $u^{1,0}$  находятся по формулам:

$$\sigma_{11}^{1,0} = B_1 u_{x_1}^{1,0} = (\sqrt{GB_1}/l) u_{x_1}^{1,0}; \quad \sigma_{12}^{1,0} = G u_y^{1,0} = (G/l) u_y^{1,0}.$$

В нулевом приближении нормальное напряжение под штампом и составляющая касательного напряжения вне штампа соответственно имеют вид:

$$\sigma_{11}^{1,0} = -\frac{P_0}{2l c_1 \mu} \frac{1}{\sqrt{l_1^2 - \eta_1^2}}, \quad \sigma_{12}^{1,0} = -\frac{G P_0}{2l \sqrt{GB_1} c_1 \mu} \frac{1}{\sqrt{l_1^2 - \eta_1^2}}, \quad (9)$$

$$v_{y_1} = -(mG/B_2) \sqrt{GB_1} u_{x_1}^{1,0}, \quad \text{т.е. при } \xi_1 = 0, \quad |\eta_1| > l_1 \quad v_y^{1,0} = 0, \quad v_{y_1} = 0 \quad |\eta_1| < l_1,$$

$$v_{y_1}^{1,0} = \frac{mG}{B_1 B_2} \frac{P_0}{2 c_1 \mu} \frac{1}{\sqrt{l_1^2 - \eta_1^2}}. \quad (10)$$

Таким образом, граничные условия по нормальному напряжению под штампом удовлетворяются, но получается невязка по касательному напряжению вне штампа, которая снимается при определении напряженно-деформируемого состояния второго типа в нулевом приближении.

Отметим, что при  $h < l$  для напряженно-деформированного состояния второго типа вместо прямоугольника фактически имеет место полуполоса и задача в этом случае будет такой: найти аналитическую в полуплоскости  $\zeta_2$  функцию  $v^{2,0}$ , при условии, что на действительной оси полуплоскости ( $\xi_2 = 0$ ) функция  $v_{x_2}^{2,0}$  принимает значения:



$$\begin{aligned} v_{x_2}^{2,0} &= \frac{P_0}{2\sqrt{B_1 B_2} c_1 \mu} \frac{1}{\sqrt{\eta_2^2 - l_1^2}} \left( l_1 < |\eta_2| < c_2 \right), \quad v_x^{2,0} = 0 \quad (|\eta_2| > c_2), \\ v_x^{2,0} &= -\frac{\rho P_0}{2\sqrt{G B_2} c_1 \mu} \frac{1}{\sqrt{l_1^2 - \eta_2^2}} \quad (|\eta_2| < l_1) \end{aligned} \quad (11)$$

Следует заметить, что при  $b > l$  ( $c_2 > l$ ) формула (11) существенно упрощается, даже при учете нескольких первых приближений по параметру  $l_1/c_2$ . В частности в нулевом приближении на границе полуплоскости ( $\xi_2 = 0$ ).

После первых двух приближений нормальное напряжение под штампом принимает вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= -\frac{P_0}{\pi l} \frac{\pi}{2c_1 \mu l_1} \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \left\{ 1 + \varepsilon^{1/2} \frac{m}{\pi} \sqrt{\frac{G}{B_2}} \left( \rho \ln \frac{1+t}{1-t} + \right. \right. \\ &+ \left. \left. \sqrt{\frac{G}{B_1}} \frac{4\sqrt{1-t^2}}{\pi c_2} \left[ \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1-t^2}{c_2^2-1}} + \sqrt{\frac{1+t}{1-t}} \ln \left( c_2 + \sqrt{c_2^2-1} \right) \right] \right) \right\} + O(\varepsilon), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\gamma = \frac{\pi}{2c_1 \mu l_1}$ .

Особенность напряжений  $\sigma_{11}$  в (12) в угловых точках штампа  $|y| = l$  ( $|t| = 1$ ) с учетом трения такая же как и для полуплоскости. Для гладкого штампа особенность совпадает с точной.

## 2. Решение задачи о вдавливании штампа в ортотропную пластину с цилиндрической анизотропией.

Упругая пластина ( $R_0 \leq r \leq \infty; -\gamma \leq \theta \leq \gamma$ ) закреплена по кромкам  $\theta = \pm\gamma$ . На границу  $r = R_0$  действует жесткий штамп с основанием, которое совпадает с  $r = R_0$  ( $-\lambda \leq \theta \leq \lambda$ ). Штамп нагружен нормальным усилием  $P_0$  и касательным  $Q_0$ .

При этом между штампом и пластиной учитывается трение (рассматривается состояние предельного равновесия штампа). На бесконечности ( $r \rightarrow \infty$ ) перемещения и деформации равны нулю.

Решение данной задачи осуществляется с помощью отображения сектора на полуплоскость и сводится к решению смешанной краевой задачи теории аналитических функций для полуплоскости.

Интегрирование уравнений (1) проводится при выполнении следующих граничных условий:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= B_1 \left( R_0 e^{\xi} \right)^{-1} (u_{\xi} + \mathcal{G}_2(v_{\eta} + u)) = 0, \\ \tau &= G \left( R_0 e^{\xi} \right)^{-1} (u_{\eta} + v_{\xi} - v) = 0 \quad (\xi = 0, \lambda \leq |\eta| \leq \gamma), \\ u &= v = 0 \quad (\eta = \pm\gamma), \\ u &= C_0, \tau = \rho \sigma_1 \quad (\xi = 0, |\eta| < \lambda), \end{aligned}$$

где  $\rho$  – коэффициент трения ( $\rho < 1$ ). На бесконечности перемещения и напряжения стремятся к нулю. Выполняются условия равновесия штампа:

$$\int_{-\lambda}^{\lambda} \sigma_1(0, \eta) d\eta + P_0 = 0; \quad \int_{-\lambda}^{\lambda} \tau(0, \eta) d\eta + Q_0 = 0.$$

Найдено распределение напряжений под штампом и в пластине. Исследовано влияние отношения длины штампа к длине свободной границы пластины на распределение нормальных напряжений под штампом.

Таблица 1

Сравнение распределения нормальных напряжений под штампом для кольцевого полубесконечного сектора и полуполосы

$t$		0	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	0.99
$\sigma^*$	1)	1.09	1.11	1.21	1.33	1.43	2.03	23.26
	2)	1.186	1.203	1.258	1.369	1.59	2.141	26.536

- 1) известное асимптотическое решение для ортотропной полуполосы [1];
- 2) полученное в работе асимптотическое решение для ортотропного полубесконечного кольцевого сектора с криволинейной анизотропией.

Влияние трения на усилие под штампом и на характер особенности учитывается с третьего приближения. В окрестности угловой точки штампа характер напряженного состояния такой же, как и для полуплоскости. Поэтому проведено сравнение известного асимптотического решения для полуплоскости [1] с решением Л.А. Галина. Установлено, что указанное решение совпадает с разложенным в ряд точным решением Галина [2].

Учет первых двух приближений дает достаточную аппроксимацию точного решения и указывает на характер особенности в окрестности угловых точек штампа. Как и в [2], эта особенность имеет вид:

$$\sigma = -B(1 - \eta_1/l_1)^{-1/2+\theta}.$$

Для гладкого штампа особенность совпадает с точной. Полученное в исходной задаче решение может быть "подправлено" вблизи особых точек при помощи "сращивания" с указанным особым решением. Известно [1], что с уменьшением значения угла  $\gamma$  точка "сращивания" приближается к границе области контакта.

**Выводы**

Для исследования применен метод возмущений, который позволил свести решение краевых задач теории упругости к последовательному решению краевых задач теории потенциала. Нужно заметить, что в рассмотренных задачах решения для усилия контактного взаимодействия, полученные асимптотическим методом, справедливы всюду, кроме непосредственной окрестности точек  $\xi = 0, \eta = 0$  и  $\xi = 0, \eta = \gamma$ , где необходимо использовать особое решение  $\tau(x) = Ax^{-\lambda}$ . Неизвестный постоянный коэффициент  $A$  находится из условий "сращивания" (в некоторой точке совпадают как особое и приближенное решения, так и их производные). Эти условия позволяют определить точку сращивания двух решений и константу особого. Показано, что зона, в которой необходимо использовать особое решение, незначительна. Таким образом, полученные на основании предложенного подхода значения для контактных напряжений вместе с особым решением дают равномерно пригодное во всей области контакта приближенное решение поставленных задач.

**Список использованной литературы**

1. Manevich L.I. Asymptotic method in the theory of an elasticity of an orthotropic skew field / L.I. Manevich, A.V. Pavlenko, S.G. Koblik. – К.: Vusha shkola, 1982. – 152.
2. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости / Л.А. Галин. – М.: Наука, 1980. – 303 с.

УДК 519.246.85

И.Ю. КОНДРАТЬЕВА, А.В. РУДАКОВА, О.В. ПОЛИВОДА  
Херсонский национальный технический университет**МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ  
МЕТОДОМ АВТОРЕГРЕССИИ СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО**

*В данной статье авторами проведено моделирование акустического шума, генерируемого электромеханическими системами в режиме реального времени. Осуществлен обзор моделей и методов прогнозирования временных рядов, выявлены достоинства и недостатки каждого класса. Параметры модели авторегрессии идентифицированы при помощи метода наименьших квадратов. Определена зависимость коэффициентов от порядка модели. Качество полученной модели авторегрессионного скользящего среднего оценено по шести критериям. Показано, что с помощью спектрального анализа можно оценить максимальные частоты спектра случайных процессов, на основании которых определяется шаг дискретизации согласно теореме Котельникова.*

*Ключевые слова: акустические сигналы, временные ряды, авторегрессия, скользящее среднее, МНК*

I.YU. KONDRATIEVA, A.V. RUDAKOVA, O.V. POLYVODA  
Херсонський національний технічний університет**МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ МЕТОДОМ  
АВТОРЕГРЕСІЇ КОВЗНОГО СЕРЕДНЬОГО**

*У даній статті авторами проведено моделювання акустичного шуму, що генерується електромеханічними системами в режимі реального часу. Здійснено огляд моделей і методів прогнозування часових рядів, виявлені переваги і недоліки кожного класу. Параметри моделі авторегресії ідентифіковані за допомогою методу найменших квадратів. Визначено залежність коефіцієнтів від порядку моделі. Якість отриманої моделі авторегресійного середнього змінного оцінено по шести критеріям якості. Показано, що за допомогою спектрального аналізу можна оцінити максимальні частоти спектра випадкових процесів, на підставі яких визначається крок дискретизації згідно теореми Котельникова.*

*Ключові слова: акустичні сигнали, часові ряди, авторегресія, ковзне середнє, МНК*

I.U. KONDRATIEVA, H.V.RUDAKOVA, O.V.POLYVODA  
Kherson National Technical University**MODELING OF ELECTRICAL EQUIPMENT ACOUSTIC SIGNALS BY THE METHOD OF  
AUTOREGRESSIVE SLIDING AVERAGE**

*In this article, the authors simulated acoustic noise generated by electromechanical complexes in real time. A detailed study of the sound signals of operating equipment is of great importance for the functional diagnostics of electrical equipment. Each state of the system's working capacity corresponds to its characteristic spectrum of the acoustic signal. According to the registered data obtained as a result of the experiment, it is possible to determine the technical state of the controlled object. The method for extracting the dominant information component of the signal on the background of external and internal excitations of the object operation is developed in the article. A thorough review of models and methods for predicting time series has been made, and the merits and demerits of each class have been revealed. The model was chosen based on the results of the experiment; it accurately describes the acoustic process. The parameters of the autoregression model are identified by the least squares method. The dependence of the coefficients of the acoustic process on the order of the model is determined. The dispersion and mathematical expectation of the model are calculated. With the help of spectral analysis, which is a fairly objective criterion, the authors calculated the maximum frequencies of the spectrum of random processes. On the basis of the calculations performed, the step of discretization of measurements was clarified, the authors used Kotel'nikov's theorem in the analysis. The spectral density of the amplitudes of the random process was found by means of the Fourier transform of the correlation function. The quality of the obtained model of the autoregressive moving average is estimated by 6 quality criteria. A comprehensive approach to studying the methods of acoustic analysis allowed not only to analyze the data, but to draw specific conclusions based on the information obtained.*

*Keywords: acoustic signals, time series, autoregression, average variable.*

**Постановка проблеми**

Повышение производительности и точности работы современного электрооборудования требует обеспечения надежности и безопасности его эксплуатации, как следствие, улучшения точности и быстроты действия технической диагностики в режиме реального времени.

Для получения оперативной информации об исследуемом объекте можно использовать акустический сигнал, порождаемый электромеханическими компонентами в процессе работы. Это позволяет расширить возможности мониторинга и управления работой сложных технических систем.

**Анализ последних исследований и публикаций**

Исследование акустических сигналов относится к классу задач анализа временных рядов. Задачи подобного плана решаются на основе создания модели, адекватно описывающей происходящий процесс. На сегодняшний день существует множество моделей анализа и прогнозирования временных рядов: регрессионные и авторегрессионные модели, нейросетевые модели, модели экспоненциального сглаживания, модели на базе цепей Маркова, классификационные модели и др. [1].

Одним из распространенных классов являются регрессионные модели. Они просты и гибки в использовании, единообразны в анализе и проектировании [2]. Работа с линейными регрессионными моделями дает возможность для анализа всех промежуточных значений, к тому же результаты можно получить быстрее. Однако низкая адаптивность и отсутствие способности моделирования нелинейных процессов делает линейные модели узкоспециализированными. А в нелинейных моделях того же класса сложно определять параметры и вид функциональной зависимости модели.

Модели и методы экспоненциального сглаживания чаще других используют для долгосрочного прогнозирования. Они унифицированы и просты в использовании, но в них отсутствует гибкость [1].

Нейросетевые модели и методы способны улавливать нелинейные зависимости между будущими и фактическими значениями процессов. Им свойственна адаптивность, масштабируемость (параллельная структура ускоряет вычисления) и сходство в анализе и проектировании. Но в них – отсутствует прозрачность моделирования, сложная процедура подбора архитектуры, высокие требования к непротиворечивости обучающей выборки, ресурсоемкость процесса обучения и неоднозначность подбора алгоритма при обучении [3].

Моделям и методам на базе цепей Маркова присущи легкость и унифицируемость в анализе и проектировании, но с их помощью невозможно моделировать процессы с длинной памятью [1].

Модели классификационно-регрессионных деревьев отличаются масштабируемостью, за счет которой возможна быстрая обработка сверхбольших объемов данных. Они характеризуются быстротой и однозначностью процесса обучения дерева (в отличие от нейросетевых моделей), а также возможностью использовать категориальные внешние факторы. Недостатками данных моделей являются неоднозначность алгоритма построения структуры дерева; сложность вопроса останова (момент прекращения дальнейших ветвлений); отсутствие единообразия анализа и проектирования [4].

В области анализа временных рядов наиболее популярными и широко используемыми являются классы авторегрессионных моделей. Однако им присуще большое число свободных параметров, идентификация которых неоднозначна и ресурсоемка. Перспективными для анализа акустических сигналов являются алгоритмы цифровой обработки, построенные на базе авторегрессионной модели скользящего среднего.

**Цель исследования**

Целью работы является разработка метода анализа акустических сигналов, возникающих при работе электромеханических системам, на базе авторегрессионной модели скользящего среднего. Требуется осуществить разработку методики выделения доминантной информационной из составляющих сигнала.

**Изложение основного материала исследования**

В основу авторегрессионной модели заложено предположение о том, что значение процесса  $y[k]$  линейно зависит от некоторого количества предыдущих значений того же процесса  $y[k-1], \dots, y[k-n]$  [5]. Для достижения большей гибкости в подгонке модели целесообразно объединить в одной модели авторегрессию и скользящее среднее (по сути дела являющееся фильтром низких частот).

Особенностью возникающих акустических сигналов является наличие периодически повторяющихся интервалов (участков), что позволяет для их моделирования использовать авторегрессионные модели вида:

$$y[k] = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i y[k-i]. \quad (1)$$

Для идентификации параметров модели (1) на основе проведенных экспериментов можно использовать метод наименьших квадратов (МНК) [2]. Из экспериментальных данных формируем уравнение:

$$\vec{Y} = X \vec{a}, \tag{2}$$

где  $\vec{Y} = [y[n+1] \ y[n+2] \ \dots \ y[N]]^T$  – вектор выхода, формируемый из элементов временного ряда, начиная с  $(n+1)$ -го порядка. Матрица входных факторов  $X$  так же комплектуется из элементов того же временного ряда:

$$X = \begin{bmatrix} y[n] & y[n-1] & \dots & y[1] \\ y[n+1] & y[n] & \dots & y[2] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y[N] & y[N-1] & \dots & y[N-n] \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Вектор параметров модели определяется, согласно МНК, как:

$$\vec{a} = [X^T X]^{-1} X^T \vec{Y}. \tag{4}$$

В результате обработки зарегистрированных акустических сигналов получены значения коэффициентов моделей 1–7 порядков, значения которых показаны в табл.1.

Таблица 1

Расчеты коэффициентов в зависимости от порядка модели

Коэффициенты модели	Порядок модели $n$						
	1	2	3	4	5	6	7
A1	0.918	1.528	1.757	1.904	2.06	2.21	2.244
A2	-	-0.664	-1.192	-1.696	-2.099	-2.55	-2.656
A3	-	-	0.346	1.089	1.716	2.411	2.576
A4	-	-	-	-0.423	-1.127	-1.977	-2.178
A5	-	-	-	-	0.37	1.204	1.417
A6	-	-	-	-	-	-0.405	-0.589
A7	-	-	-	-	-	-	0.083

Для анализируемого временного ряда акустического сигнала, порождаемого электрооборудованием, получаем модель 4-го порядка в виде:

$$y[k] = 1,904y[k-1] - 1,696y[k-2] + 1,089y[k-3] - 0,423y[k-4]. \tag{5}$$

На рис.1,а показаны графики фактических нормированных значений временного ряда, полученных в результате эксперимента (жирная линия) и прогнозируемые, согласно модели (тонкая линия). Относительная ошибка восстановления прогнозируемых временных рядов приведена на рис. 1,б.

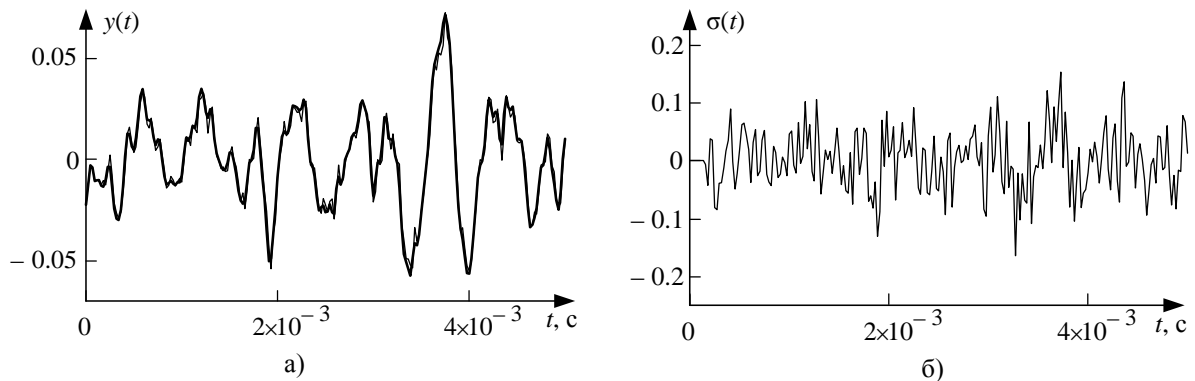


Рис.1. Графическое представление временных рядов

Для оценки работоспособности полученной модели можно использовать следующие критериям качества [5]:

1. Средняя ошибка (ME) – характеризует предвзятость в оценивании параметров модели:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{oi} - y_{mi}), \quad (6)$$

где  $N$  – количество отчетов,  $y_o$  – фактические нормированные значения временного ряда, а  $y_m$  – прогнозные.

2. Среднеквадратичная ошибка (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{oi} - y_{mi})^2. \quad (7)$$

3. Среднеквадратическая ошибка восстановления прогнозируемых временных рядов (SKO):

$$SKO = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{oi} - y_{mi})^2}{\sum_{i=1}^N y_{oi}^2}}. \quad (8)$$

4. Мера точности – иллюстрирует стандартное отклонение остатков модели (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{oi} - y_{mi})^2}. \quad (9)$$

5. Средняя абсолютная ошибка (MAE). Этот показатель характеризует, насколько велики ошибки прогноза в сравнении с действительными значениями ряда:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_{oi} - y_{mi}|. \quad (10)$$

6. Коэффициент несоответствия Тейла  $U$ . Его значение должно находиться в пределах от 0 до 1:

$$U = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{oi} - y_{mi})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{oi})^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{mi})^2}}. \quad (11)$$

Если величина коэффициента выше 1, то модель нельзя использовать для прогноза, поскольку прогнозируемые и реальные временные ряды являются некоррелированными [5]. В нашем случае согласно критерию Тейла прогнозные и реальные ряды совпадают, поэтому можно сделать вывод, что построенная модель адекватно прогнозирует реальный ряд.

Результаты расчетов зависимостей вышеупомянутых критериев качества от порядка полученной модели приведены в табл.2.

Таблица 2

Критерии качества полученных моделей авторегрессионного среднего

Порядок модели $n$	SCO	ME	MSE	RMSE	MAE	U
2	0.296	$-2.256 \cdot 10^{-6}$	$2.67 \cdot 10^{-5}$	$5.167 \cdot 10^{-3}$	$4.075 \cdot 10^{-3}$	0.148
3	0.278	$-1.33 \cdot 10^{-6}$	$2.35 \cdot 10^{-5}$	$4.848 \cdot 10^{-3}$	$3.835 \cdot 10^{-3}$	0.139
4	0.252	$-1.819 \cdot 10^{-6}$	$1.93 \cdot 10^{-5}$	$4.393 \cdot 10^{-3}$	$3.47 \cdot 10^{-3}$	0.126
5	0.234	$-9.683 \cdot 10^{-7}$	$1.666 \cdot 10^{-5}$	$4.081 \cdot 10^{-3}$	$3.21 \cdot 10^{-3}$	0.117
6	0.214	$-1.536 \cdot 10^{-6}$	$1.393 \cdot 10^{-5}$	$3.732 \cdot 10^{-3}$	$2.957 \cdot 10^{-3}$	0.107
7	0.213	$-1.222 \cdot 10^{-6}$	$1.383 \cdot 10^{-5}$	$3.719 \cdot 10^{-3}$	$2.947 \cdot 10^{-3}$	0.107

С увеличением порядка модели  $n$  значения всех критериев качества уменьшаются, что естественно. Однако, в связи с высокими скоростями протекающих процессов для уменьшения объема вычислений целесообразно проводить расчеты не по всем отсчетным временным точкам, а через некоторые интервалы с использованием агрегации значений по интервалам. В зависимости от приложенной нагрузки и/или от физического состояния компонентов электромеханического состояния характер акустических сигналов может меняться. Это особенно актуально при осуществлении процедуры идентификации параметров модели в системах адаптивного управления в режиме реального времени.

Для определения оптимальной величины интервала агрегации можно воспользоваться классическим спектральным методом анализа сигналов [6].

Спектральный анализ позволяет оценить максимальные частоты спектра случайных процессов, на основании которых можно выяснить шаг дискретизации, согласно теоремы Котельникова:

$$\Delta t \leq \frac{\pi}{\omega_c}, \tag{12}$$

где  $\omega_c$  – частота среза, для нахождения которой традиционно используют уравнение Парсевяля:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_c} [S(\omega)]^2 d\omega = \frac{\mu}{\pi} \int_0^{\infty} [S(\omega)]^2 d\omega, \tag{13}$$

где  $\mu$  – коэффициент характеризующий точность воспроизведения, обычно  $\mu = 0,95$ ;  $S(\omega)$  – спектральная плотность амплитуд случайного процесса, которую можно найти на основе автокорреляционной функции сигнала  $K_y(\tau)$  с помощью преобразования Фурье:

$$S(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} K_y(\tau) \cos(\omega\tau). \tag{14}$$

Автокорреляционную функцию можно определить с помощью методов статистического анализа непосредственно из экспериментально полученной выборки [7].

### Выводы

Перспективно использовать авторегрессионные модели скользящего среднего для анализа звуковых сигналов, генерируемых электрооборудованием. Параметры модели можно рассчитать методом наименьших квадратов, но для идентификации в режиме реального времени целесообразно применять рекуррентный метод. Для уменьшения объемов перерабатываемой информации без потери точности используют агрегированные значения. Длительность процесса агрегирования стоит определять на основе спектрального анализа акустического сигнала. Все это открывает возможности для обеспечения безопасности и надежности эксплуатации электрооборудования за счет своевременного обнаружения и предотвращения аварийных сбоев работы в режиме реального времени.

**Список использованной литературы**

1. Рунова Л.П. Модель авторегрессии и скользящего среднего (ARMA) / Л.П. Рунова. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. – 59 с.
2. Королев А.Л. Компьютерное моделирование / А.Л. Королев. – М.: БИНОМ. ЛЗ, 2013. – 230 с.
3. Савиных В.Н. Математическое моделирование производственного и финансового менеджмента: Учебное пособие / В.Н. Савиных. – М.: КноРус, 2013. – 192 с.
4. Чупрынов Б.П. Математика в экономике: математические методы и модели / М.С. Красс, Б.П. Чупрынов; Под ред. М.С. Красс. – М.: Юрайт, 2013. – 541 с.
5. Бидюк П.И. Моделирование и прогнозирование нелинейных динамических процессов/ И.В. Баклан, Я.И. Баклан, Л.О. Коршевнюк, В.И. Литвиненко, М.Ю. Минин, В.В. Петренко, О.О. Петренко, Ю.М. Селин, А.А. Фелелов // К.:ЕКМО, 2004 – 120с.
6. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации / В.И. Дмитриев. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.



УДК 519.7: 664.723

Д.Г. ЛИТВИНЧУК, О.В. ПОЛИВОДА, В.О. ГАВРИЛЕНКО

Херсонський національний технічний університет

В.В. ПОЛИВОДА

Херсонська державна морська академія

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ВОЛОГОСТІ  
ТА ТЕМПЕРАТУРИ ЗЕРНА В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ**

*Розроблено математичну модель процесу сушіння зерна з використанням методу скінченних різниць. Проаналізовано параметричну схему процесу сушіння зерна та визначено вхідні, вихідні та керуючі параметри для зерносушильного обладнання стрічкового типу. Отримано модель динаміки температури та вологості зерна, що враховує основні особливості конструкції зерносушильного обладнання, стан шару зерна та кількісні характеристики теплофізичних і термодинамічних властивостей зерна, що впливають на процес тепло- і масопереносу, а саме коефіцієнт дифузії вологи зерна, теплопровідність, теплоємність та температуропровідність.*

*Ключові слова: математична модель, зерно, сушіння, метод скінченних різниць.*

Д.Г. ЛИТВИНЧУК, О.В. ПОЛИВОДА, В.А. ГАВРИЛЕНКО

Херсонский национальный технический университет

В.В. ПОЛИВОДА

Херсонская государственная морская академия

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ВЛАЖНОСТИ  
И ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕРНА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ**

*Разработана математическая модель процесса сушки зерна с использованием метода конечных разностей. Проанализирована параметрическая схема процесса сушки зерна и определены входные, выходные и управляющие параметры для зерносушильного оборудования ленточного типа. Получена модель динамики температуры и влажности зерна, учитывающая основные особенности конструкции зерносушильного оборудования, состояние слоя зерна и количественные характеристики теплофизических и термодинамических свойств зерна, влияющих на процесс тепло- и массопереноса, а именно коэффициент диффузии влаги зерна, теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность.*

*Ключевые слова: математическая модель, зерно, сушка, метод конечных разностей.*

D.G. LYTVYNCHUK, O.V. POLYVODA, V.O. HAVRYLENKO

Kherson National Technical University

V.V. POLYVODA

Kherson State Maritime Academy

**MATHEMATICAL MODEL OF GRAIN HUMIDITY  
AND TEMPERATURE DYNAMICS IN THE DRYING PROCESS**

*The modern control systems of grain drying equipment assume the presence of an automated system for monitoring the humidity and grain temperature, the development of which should be based on objective data on the grain state at each point of the grain layer. These data can be obtained by analyzing the grain temperature and humidity dynamics based on heat and mass transfer equations. The goal of the research is to develop a mathematical model of the grain drying process that takes into account the main features of the grain drying equipment design, the state of the grain layer and the quantitative characteristics of the thermophysical and thermodynamic properties of the grain, which influence the process of heat and mass transfer. To achieve the goal, the parametric scheme of the grain drying process was analyzed and the input, output and control parameters for the grain drying equipment were determined. The input parameters are the initial moisture content and the initial temperature of the grain. Output parameters are the final moisture content and the final temperature of the grain. The control parameters include the initial temperature, moisture content, velocity and flow rate of the drying agent, the speed of the tape and the height of the grain mass layer. Models of quantitative grain characteristics are proposed, such as grain moisture diffusion coefficient, thermal conductivity, heat capacity and temperature conductivity. The model of temperature and humidity dynamics of grain based on the equations of heat and mass transfer using the finite difference method is developed. After selecting the characteristic parameters for a specific type of grain and grain drying equipment, the model can be used to solve many problems, such as determining the static and dynamic characteristics of grain drying equipment, drying parameters selection and optimization, solution of tasks monitoring and process control.*

*Keywords: mathematical model, grain, drying, finite difference method.*

**Постановка проблеми**

Задача контролю вологовмісту та температури зерна виникає при оперативному керуванні зерносушильним обладнанням на хлібоприймальних та борошномельних підприємствах. Сушка зерна дозволяє як продовжити термін його зберігання без можливості утворення осередків самозігрівання, так і надати оптимальну вологість при сортовому помелі зерна, що зумовить найкращі результати переробки, рентабельність роботи борошномельного підприємства й конкурентоспроможність отриманого борошна з погляду стабільності його хлібопекарських достоїнств [1]. Щоб не допустити пересушування або перезволоження зернової маси і запобігти втраті цінних властивостей продукту, необхідно контролювати вологість та температуру зерна в реальному часі з метою підтримки оптимальних параметрів процесу сушіння.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Для контролю вологості зернової маси традиційно використовують різні методи і засоби вимірювання, що засновані на зміні фізичних характеристик зерна (електропровідність, діелектрична проникність, поглинання та відбиття інфрачервоного випромінювання та ін.) при зміні його вологості, але їх неможливо використовувати в автоматизованих системах керування для вимірювання вологості зерна в потоці [2]. Використання віртуального датчика на основі штучної нейронної мережі, яка зможе прораховувати вологість та температуру зерна по непрямим параметрах технологічного процесу [3] має суттєві недоліки, серед яких головний – це необхідність великого масиву даних для навчання нейронної мережі.

Сучасні системи керування зерносушильним обладнанням передбачають наявність автоматизованої системи моніторингу вологості та температури зерна, розробка яких повинна здійснюватися на основі об'єктивних даних про стан зерна в кожній точці зернового шару. Ці дані можна отримати, аналізуючи закономірність динаміки температури та вологості зерна на основі рівнянь тепло- і масопереносу [4], що пов'язано із знаходженням нестационарних полів вологовмісту і температури в процесі сушіння, тобто з рішенням системи диференціальних рівнянь виду:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_m \frac{\partial W}{\partial x} + a_m \delta \frac{\partial t_3}{\partial x} \right), \tag{1}$$

$$c\rho_0 \frac{\partial t_3}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma \frac{\partial t_3}{\partial x} + \varepsilon r \rho_0 \frac{\partial W}{\partial x} \right), \tag{2}$$

де  $W$  – вологовміст,  $t_3$  – температура,  $\rho_0$  – щільність,  $c$  – теплоємність,  $\gamma$  – теплопровідність зерна,  $a_m$  – коефіцієнт дифузії вологи;  $\delta$  – термоградієнтний коефіцієнт;  $\varepsilon$  – критерій фазового перетворення;  $x$  – координата;  $\tau$  – час.

Рівняння (1), (2) містять частинні похідні, що ускладнює отримання точного розв'язку, тому на практиці користуються спрощеними, інженерними методами розрахунку на підставі експериментального визначення деяких коефіцієнтів і дослідження кінетики певних матеріалів, не розв'язуючи системи диференціальних рівнянь [5]. Дані методи розрахунків не дозволяють адекватно визначити динаміку зміни вологовмісту та температури зерна в процесі сушіння.

**Мета дослідження**

Метою досліджень є розробка математичної моделі процесу сушіння зерна, що враховує основні особливості конструкції зерносушильного обладнання, стан шару зерна та кількісні характеристики теплофізичних і термодинамічних властивостей зерна, що впливають на процес тепло- і масопереносу.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Незалежно від методу сушки, існує певна кількість теплофізичних і масообмінних параметрів, які впливають на процес сушіння і динаміку температури та вологості висушеного зерна. Параметрична схема процесу сушки зерна наведена на рис.1.

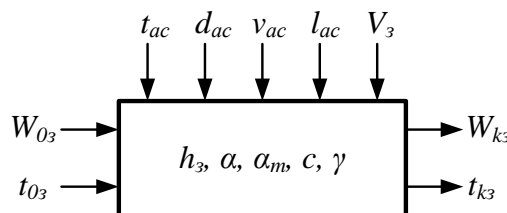


Рис. 1. Параметрична схема процесу сушки зерна.

Вхідними параметрами, що визначають сушку зерна, є початковий вологовміст  $W_{03}$  та початкова температура  $t_{03}$ . Вихідні параметри – кінцевий вміст вологи  $W_{k3}$  та кінцева температура зерна  $t_{k3}$ . До керуючих параметрів відносяться характеристики агента сушіння, такі як початкова температура  $t_{ac}$ , вміст вологи  $d_{ac}$ , швидкість  $v_{ac}$  і витрати  $l_{ac}$ , а також об'єм зерна  $V_3$ . Внутрішніми параметрами зерна вважають кількісні характеристики теплофізичних і термодинамічних властивостей, такі як коефіцієнти теплообміну  $\alpha$  та дифузії вологи  $a_m$ , теплоємність  $c$ , теплопровідність  $\gamma$ , товщина шару  $h_3$ .

Коефіцієнт дифузії вологи  $a_m$  визначає інтенсивність потоку вологи в шарі зерна і залежить як від температури зерна так і від вологості. Узагальнена залежність між коефіцієнтом дифузії вологи в зерні пшениці і його вологістю та температурою може бути представлена у вигляді формули [6]:

$$a_m = \begin{cases} \frac{1}{558Wc^2 - 382Wc + 67,8} \left(\frac{t_3}{T_0}\right)^k 10^{-9} & \text{при } W = 21 - 24\%, \\ \frac{1}{362Wc^2 + 2340Wc + 380,4} \left(\frac{t_3}{T_0}\right)^k 10^{-9} & \text{при } W = 24 - 26,7\%, \\ (0,147 + 0,055Wc) \left(\frac{t_3}{T_0}\right)^k 10^{-9} & \text{при } W = 26,7 - 32\%, \end{cases} \quad (3)$$

де  $T_0$  – абсолютна температура зерна,  $Wc$  – вологовміст зерна,  $k$  – параметр, що визначається за формулою:

$$k = \begin{cases} 179Wc - 41,5 & \text{при } W = 21 - 24\%, \\ 16,5Wc + 11,72 & \text{при } W = 24 - 32\%. \end{cases} \quad (4)$$

Залежність між вологовмістом і вологістю має вид:

$$W = \frac{Wc \cdot 100\%}{1 + Wc}. \quad (5)$$

Теплопровідністю  $\gamma$  називають здатність зернової маси передавати теплоту при безпосередньому зіткненні зерен, або в результаті конвекції, яка полягає в переміщенні нагрітих частинок повітря міжзернових просторів в верхні шари займаного об'єму. Для визначення залежності теплопровідності від вологості застосовують метод Єгорова:

$$\gamma = 0,06 + 0,002 \cdot W \quad \text{при } W = 10 - 20\%. \quad (6)$$

Теплоємність  $c$  характеризує витрати теплоти на нагрів зернового матеріалу. Використовуючи метод Діснея, можна знайти теплоємність зерна при різній вологості зерна як:

$$c = \begin{cases} 0,297 + 0,00591 \cdot W & \text{при } W = 1,8 - 7,7\%, \\ 0,263 + 0,01036 \cdot W & \text{при } W = 7,7 - 23,7\%, \\ 0,336 + 0,00731 \cdot W & \text{при } W = 23,7 - 33,6\%. \end{cases} \quad (7)$$

Коефіцієнт теплообміну  $\alpha$  характеризує швидкість зміни температури в зерновій масі та визначається за формулою:

$$\alpha = (2,5 + 0,05 \cdot W) 10^{-4} \quad \text{при } W = 10 - 20\%. \quad (8)$$

Графіки аналітичних залежностей кількісних характеристик теплофізичних і термодинамічних властивостей, обчислених за виразами (3) – (8), наведені на рис. 2.

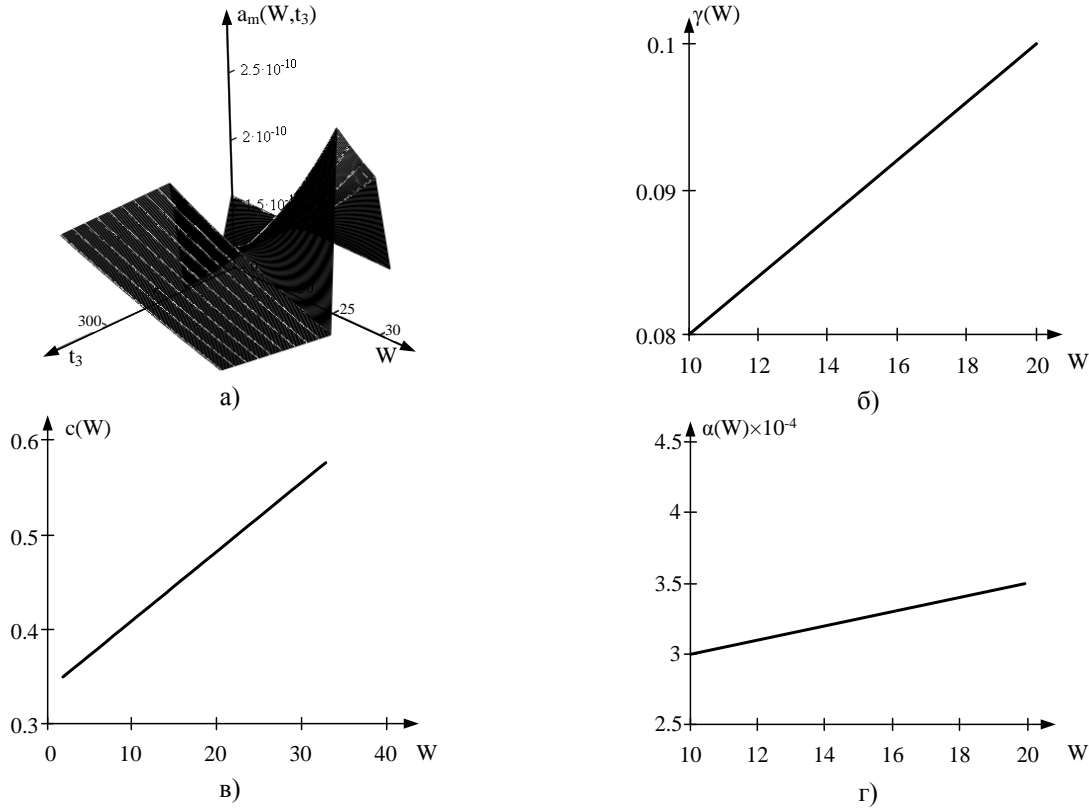


Рис. 2. Внутрішні параметри зернової маси: а) – коефіцієнт дифузії вологи; б) – теплопровідність; в) – теплоємність; г) – коефіцієнт теплообміну.

Для вирішення рівнянь (2), (3) можна використати метод скінченних різниць [7]. Розіб'ємо вісь  $x$  (висота шару зерна на стрічці сушарки  $l_3$ ) на  $N$  вузлових точок, а час циклу сушіння  $t_c$  на  $M$  точок. Передбачається, що в межах кожного елемента вологість змінюється лінійно, тобто похідні вологості та температури по глибині шару зерна і за часом в скінченних різницях для елемента  $(i, j)$  будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \tau} &= \frac{1}{K} \cdot [W(i, j+1) - W(i, j)], & \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} &= \frac{1}{h^2} \cdot [W(i+1, j) - 2W(i, j) + W(i-1, j)], \\ \frac{\partial t_3}{\partial \tau} &= \frac{1}{K} \cdot [t_3(i, j+1) - t_3(i, j)], & \frac{\partial^2 t_3}{\partial x^2} &= \frac{1}{h^2} \cdot [t_3(i+1, j) - 2t_3(i, j) + t_3(i-1, j)]. \end{aligned} \tag{9}$$

де  $i = 0, 1, \dots, N$ ;  $j = 0, 1, \dots, M$ ;  $K = t_c / M$ ;  $h = l_3 / N$ .

Підставляючи вирази (9) в рівняння (1), (2) і розв'язуючи їх відносно значень функцій вологості  $W(x, \tau)$  та температури зернової маси  $t_3(x, \tau)$  на верхньому часовому шарі, отримаємо:

$$\begin{aligned} W(i, j+1) &= a_m \frac{K}{h^2} [W(i+1, j) - 2W(i, j) + W(i-1, j)] + \\ &+ a_m \delta \frac{K}{h^2} [t_3(i+1, j) - 2t_3(i, j) + t_3(i-1, j)] + W(i, j), \end{aligned} \tag{10}$$

$$t_3(i, j + 1) = \frac{\gamma \cdot K}{c \cdot \rho_0 \cdot h^2} [t_3(i + 1, j) - 2t_3(i, j) + t_3(i - 1, j)] + \frac{\varepsilon \cdot r \cdot K}{c \cdot h^2} [W(i + 1, j) - 2W(i, j) + W(i - 1, j)] + t_3(i, j). \tag{11}$$

Формули (10), (11) дають можливість обчислювати вологість та температуру зерна в момент часу  $\tau_{j+1}$  через теплофізичні і термодинамічні характеристики у попередній момент часу  $\tau_j$ . Сітка вузлів та обчислювальний шаблон, що відповідає рівнянню (10) наведений на рис.3.

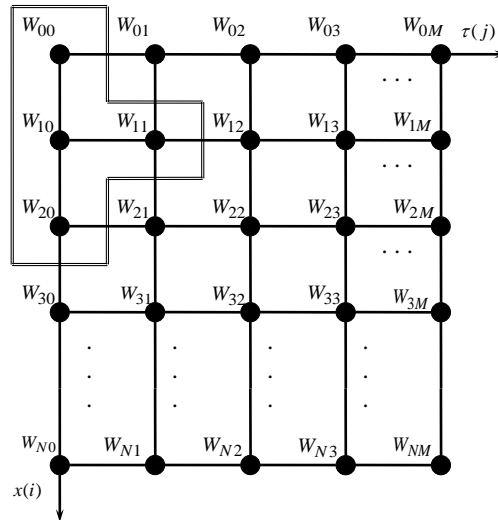


Рис. 3. Сітка вузлів для розв’язання рівняння динаміки вологості зернової маси методом скінченних різниць.

Вузли сітки визначаються за формулами:

$$\tau_j = j \cdot K; \quad i = 0, 1, \dots, N; \quad x_i = i \cdot h; \quad j = 0, 1, \dots, M. \tag{12}$$

За аналогічним принципом можна побудувати сітку вузлів та обчислювальний шаблон для розв’язання рівняння динаміки температури зернової маси.

Значення  $W_{i0}$  та  $t_{3i0}$  на лівій стороні сітки визначаються з початкових умов ( $W_{i0} = W(i, 0) = W_0$ ) та ( $t_{3i0} = t_3(i, 0) = t_{30}$ ) відповідно. Граничні значення  $W_{0j}$ ,  $W_{Nj}$ ,  $t_{30j}$ ,  $t_{3Nj}$  на верхній і нижній сторонах сітки отримують на основі аналізу конструктивних та технологічних особливостей зерносушильного обладнання.

### Висновки

Розроблено модель динаміки температури та вологості зерна на основі рівнянь тепло- і масопереносу з використанням методу скінченних різниць. Запропоновані моделі кількісних характеристик зерна, таких як коефіцієнт дифузії вологи зерна, теплопровідність, теплоємність та температуропровідність. Після вибору характерних параметрів для конкретного типу зерна і зерносушильного обладнання отримана модель може бути використана для рішення багатьох задач, таких як визначення статичних та динамічних характеристик зерносушильного обладнання, вибір та оптимізація режимних параметрів сушіння, рішення задач контролю та керування процесом.

### Список використаної літератури

1. Хосни Р.К. Зерно и зернопереработка / Р.К. Хосни; пер. с англ. под общ. ред. Н.П. Черняева. – СПб: Профессия, 2006. – 336 с.
2. Литвинчук Д.Г. Проблемы измерения влажности зерна в потоке / Д.Г. Литвинчук, О.В. Поливода // Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з автоматичного управління присвяченої дню космонавтики. – Херсон: ХНТУ, 2017. – С.150-153.
3. Поливода О.В. Математична модель оцінки вологості зерна у борошномельному виробництві із застосуванням нейронних мереж / О.В. Поливода, В.В. Поливода, Д.Г. Литвинчук // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон: ХНТУ, 2017. – Вип. 3(62). Т.1. – С. 328-332.

4. Остапчук Н.В. Математическое моделирование технологических процессов хранения и переработки зерна / Н.В. Остапчук. – М.: Колос, 1977. – 240 с.
5. Смирнов Г.Ф. О приближённой модели сушки зернового слоя [Текст] / Г.Ф. Смирнов, Е.В. Воскресенская // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2011. – Вип. 39, Т.2. – С. 69-76.
6. Гинзбургер А.С. Влага в зерне / А.С. Гинзбургер, В.П. Дубровский, Е.Д. Казаков. – М.: Колос, 1969. – 221 с.
7. Самарский А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1978. – 592 с.

УДК 517.9:519.6:621.98

В.П. ЛЯШЕНКО

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

О.П. ДЕМ'ЯНЧЕНКО

Азовський морський інститут Національного університету "Одеська морська академія"

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ВАЛКІВ ПІД ЧАС ПРОКАТКИ СТРІЧКИ

*Розглянуті у вигляді крайових задач для рівняння теплопровідності математичні моделі температурних розподілів під час прокатки металеві стрічки через двошарові валки двохвалкового прокатного стану. Побудована математична модель температурного поля одночасного процесу лиття – прокатування тонкої металеві стрічки за допомогою валкового кристалізатора, валки якого мають вигляд тришарового циліндра зі щільним контактом шарів з різними теплофізичними характеристиками. Розглянуто спрощену задачу, яку розв'язано чисельно-аналітичним методом. Запропоновано алгоритм та програму для знаходження температурного поля зони нагрівання дво- та тришарових валків. Проведено чисельні експерименти та побудовані графіки температурних розподілів циліндричних валків.*

*Ключові слова: математична модель, температурне поле, валковий кристалізатор, трикутні сітка, метод Делоне, температурні розподіли.*

В.П. ЛЯШЕНКО

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

О.П. ДЕМ'ЯНЧЕНКО

Азовский морской институт Национального университета "Одесская морская академия"

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ВАЛКОВ ВО ВРЕМЯ ПРОКАТКИ ЛЕНТЫ

*Рассмотрены в виде краевых задач для уравнения теплопроводности математические модели температурных распределений во время прокатки металлической ленты через двухслойные валки двухвалкового прокатного стана. Построена математическая модель температурного поля одновременного процесса литье – прокатка тонкой металлической ленты с помощью валкового кристаллизатора, валки которого имеют вид трехслойного цилиндра с идеальным контактом слоев с разными теплофизическими характеристиками. Рассмотрена упрощенная задача, решенная численно-аналитическим методом. Предложены алгоритм и программа для нахождения температурного поля зоны нагревания двух- и трехслойных валков. Проведены численные эксперименты и построены графики температурных распределений цилиндрических валков.*

*Ключевые слова: математическая модель, температурное поле, валковый кристаллизатор, треугольная сетка, метод Делоне, температурное распределение.*

V. LYASHENKO

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

O. DEMYANCHENKO

Azov Maritime Institute of National university "Odessa Maritime Academy"

### MATHEMATICAL SIMULATION OF TEMPERATURE FIELD OF ROLLS AT STRIP ROLLING

*Application of continuous roll casting of liquid metal in a roll crystallizer (RC) is a promising method of production of metal strip, allowing drastic reduction of power inputs on its manufacturing. The difficulty of the process of metal casting in RC lies in the fact that liquid metal has to be turned into a metal strip in the roll pass and it requires creation of certain thermal-dynamic equilibrium in the roll crystallizer. It is possible if at crystallizing an efficient thermal removal from the rolls is ensured with the objective of avoiding production losses. Much attention is paid to mathematical simulation of technological process, on the whole and simulation of thermal processes in roll passes of rolling mills at developing such energy-efficient technologies of strip manufacturing. Mathematical simulations of temperature distributions at metal strip rolling on two-layered rolls of two-roll mill were analyzed in the form of boundary problems for heat conductivity equation.*

*A mathematical simulation was compiled for the temperature field of simultaneous casting-rolling process, by means of roll crystallizer, its rolls possessing the shape of three-layered cylinder with ideal layer contacts and different thermal-physic characteristics. A simplified problem, solved by numerical-analytical method was also considered. An algorithm and a simulator were proposed for finding the temperature field of heating area of two*

and three layered rolls. The boundary problems were solved with the help of the systems of computer mathematic. On the basis of the algorithm a program was developed in MATLAB medium for solving a simplified boundary problem for the heat conductivity equation, making it possible to find temperature distributions in cylindrical rolls of a rolling mill and roll crystallizer, being heated by external acting sources and heat flow and periodically passing it into the surrounding medium.

An obtained simplified boundary problem was solved obtained for two-layer rolls, by means of Maple pdsolve function. In the mathematic simulation of the temperature field of three-layered roll of the roll crystallizer the boundary problem was solved by means of finite elements with application of the systems of computer mathematics, according to the algorithm and with the help of GUI-addendum MATLAB PDETool. Numerical experiments were carried out. The simplified boundary problem for two layer rolls was solved by means of Maple pdsolve funcrion. Numerical experiments were carried out and graphs of temperature distributions of cylindrical rolls were compiled.

Keywords: mathematical model, thermal field, rolling catalyst, triangular net, Delaunay method, thermal distribution.

**Постановка проблеми**

Виробництво металу має велике значення для розвитку народного господарства і зростання добробуту суспільства. Від успішного розвитку металургії у значній мірі залежить розвиток машинобудування, транспорту, сільського господарства та інших галузей народного господарства [1]. Технологічний процес отримання готового прокату у багатьох випадках є завершальною стадією металургійного виробництва. Через прокатні цехи проходить майже вся сталь, що виплавляється в сталеплавильних цехах, тому поряд зі збільшенням виробництва прокату існує проблема підвищення якості продукції, що випускається та ефективності прокатного виробництва. Цього вдається досягти за рахунок створення нових технологій та зниження енерговитрат на виробництво готової продукції [1]. Перспективним напрямом виробництва металеві стрічки, що дозволяє суттєво знизити енерговитрати на її виробництво є використання неперервної валкової розливки рідкого металу у валкові кристалізатори (ВК). Складність розливки металу у ВК полягає у тому, що рідкий метал у валковому калібрі потрібно перетворити у тверду металеву стрічку, а це вимагає створення певної термодинамічної рівноваги у валковому кристалізаторі. Це можливо, якщо під час кристалізації відбувається ефективне відведення тепла від валків з метою запобігання втрат готової продукції. При створенні таких енергоощадних технологій виробництва стрічки та прокату велике значення відводиться математичному моделюванні технологічного процесу в цілому та моделюванні теплових процесів у валкових калібрах прокатних станів, зокрема ВК засобами комп'ютерної математики.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Як показав аналіз робіт [2, 3], досить перспективним з точки зору зниження енергетичних витрат (в 8-10 разів) є використання валкових кристалізаторів (ВК), які дозволяють відливати сталеву стрічку, максимально наближену по товщині до готового виробу, що істотно скорочує виробничий цикл і кількість необхідного обладнання. Наприклад, в країнах ЄС розроблено технологію по проекту «Eurostrip», основану на застосуванні ВК і яка дозволяє виробляти сталеву стрічку у широкому діапазоні розмірів. При використанні ВК рідка сталь потрапляє у простір між рухомими валками і при контакті з ними кристалізується віддаючи своє тепло рухомим валкам і виходячи з валків у формі твердої стрічки (рис.1). При цьому товщина останньої визначається відстанню між валками кристалізатора, а ширина – бічними стінками ВК, які можуть змінюватися. Валки кристалізатора виготовляються із жаростійких матеріалів, наприклад, сплаву міді з хромом у вигляді порожнистих циліндрів, що обертаються і інтенсивно охолоджуються з середини рідиною [2].

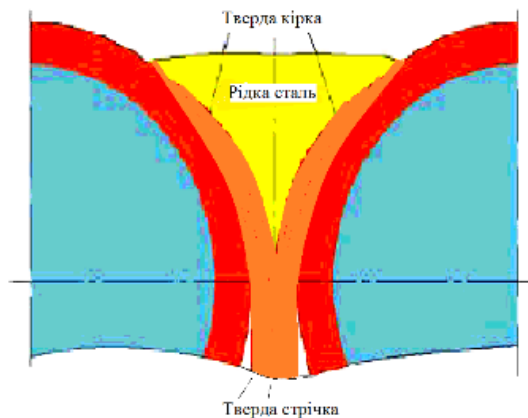


Рис. 1. Схема формування стрічки у ВК.



Розрахунок розподілу температури в валках ВК має важливе прикладне значення. Він дозволяє прогнозувати життєвий цикл ВК. При проектуванні ВК велике значення відводиться математичному моделюванню процесу теплообміну у системі розплавлений метал – прокатні валки, які мають складну конструкцію.

Найбільш розповсюдженим методом отримання стрічки є прокатка її через валки прокатного стану, що мають вигляд одно та двошарових циліндрів [3, 4].

Основним показником якості прокатої стрічки є її геометричні розміри.

Під час прокатки стрічки, в момент проходження її між валками прокатного стану виділяється тепло деформації, яке іде на підвищення температури стрічки та валків (рис. 2).

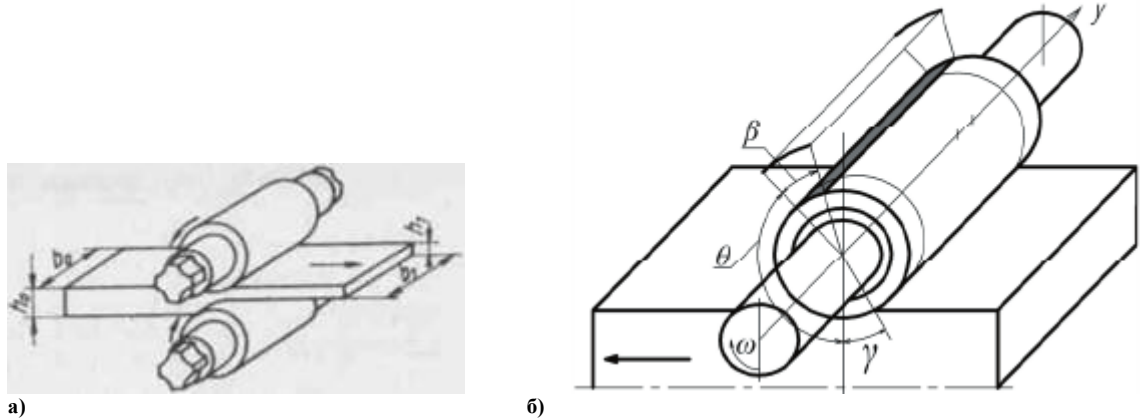


Рис. 2. а) схема робочого валка б) схема прокатки стрічки:  $\gamma$  – кут захвату металу;  $\theta$  – кут від виходу стрічки із зони деформації до зони примусового охолодження;  $\beta$  – кут зони примусового охолодження;  $\leftarrow$  – напрям прокатки.

За рахунок тепла деформації підвищується температура валків, що сприяє їх нерівномірному тепловому розширенню уздовж радіуса і за рахунок цього зменшується товщина стрічки, що приводить до порушення розмірів стрічки. Крім того під час роботи валки прокатного стану зношуються під дією температури та тертя деформації. Для подовження роботи валків на них наносять зносостійке та теплостійке покриття, а також примусово охолоджують.

У науковій літературі запропоновано цілий ряд математичних моделей процесу теплообміну під час прокатки стрічки на прокатному стані [4–12]. У роботі [4] розглядається математична модель теплового профіля валка прокатного стану під час прокатки металеві стрічки у вигляді початково-крайової задачі для рівняння теплопровідності.

У роботах [4, 5] розглядається математична модель теплового стану валка під час гарячої прокатки стрічки у вигляді нестационарної однорідної початково-крайової задачі для рівняння теплопровідності. Прокатний валок розглядається у вигляді двошарового циліндра. Між шарами має місце щільний тепловий контакт, який з математичної точки зору визначається рівністю температур та теплових потоків (умова теплообміну четвертого роду). На кінцях та поверхні циліндричного валка, не задіяного у зоні контакту з металеві стрічкою, має місце теплообмін з оточуючим середовищем за законом Ньютона. Недоліком математичних моделей запропонованих у роботах [3–5] є відсутність нелінійної складової - умови Стефана - Больцмана у граничних умовах. У роботі [7] запропонована математична модель двошарового циліндра зі щільним та не щільним тепловим контактом. Теплообмін зовнішньої поверхні циліндричного валка з оточуючим його середовищем сталий по усій поверхні. Математична модель що запропонована у цій роботі має вигляд початково-крайової задачі для неоднорідного рівняння теплопровідності.

Для визначення температурного розподілу  $T(r, z, t)$  у такому складеному циліндрі приходимо до наступної крайової задачі на спряження

$$\lambda_{1,2} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_{1,2} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - c_{1,2} \rho_{1,2} \frac{\partial T}{\partial t} = \begin{cases} -q, & \forall \quad r_0 - \Delta \leq r < r_0, \\ 0, & \forall \quad 0 < r < r_0 - \Delta \end{cases} \quad (1)$$

$$0 < z < l, \quad T > 0,$$

$$T(r, 0, t) = T(r, z, 0) = T_0, \quad T(r, z, l) = T_l \quad (2)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T(r_0 - \Delta - 0, z, t)}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T(r_0 - \Delta + 0, z, t)}{\partial r}, \quad (3)$$

$$T(r_0 - \Delta - 0, z, t) = T(r_0 - \Delta + 0, z, t), \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T(r_0, z, t)}{\partial r} = -\alpha(T - T_c) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_c^4), \quad \frac{\partial T(0, z, t)}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

де  $\lambda_{1,2}, c_{1,2}, \rho_{1,2}, \rho_0, \beta, \alpha, \varepsilon, \sigma, q$  – відповідні теплофізичні характеристики та параметри матеріалів шарів.

Для визначення температурного розподілу у внутрішньому циліндрі було проведено усереднення температури по радіусу зовнішнього циліндра і отримана умова спряження імпердансного типу. Розрахунок температурного поля внутрішнього циліндра отримані чисельно-аналітичним методом та побудовані температурні розподіли. Математична модель, у вигляді задачі (1–5) не дозволяє застосувати її до розрахунку температурних розподілів рухомих навколо своєї осі валків, так як теплообмін з оточуючим їх середовищем у різних частинах поверхні різний. Математична модель процесу теплообміну валка прокатного стану включає у себе три складові: 1) теплообмін частини валка з металом, що піддається деформації, під час якої виділяється тепло деформації; 2) теплообмін частини валка з примусово охолоджуючою його рідиною; 3) теплообмін частини валка з навколишнім повітрям за законами Ньютона та Стефана–Больцмана. У зоні першої частини моделі має місце щільний тепловий контакт, під час якого температура стрічки і поверхні валка вирівнюються, маємо граничну умову четвертого роду, умову спряження; у другій та третій частинах моделі має місце теплообмін за законами Ньютона та Стефана–Больцмана або за одним із них.

**Мета дослідження**

Метою є побудова математичних моделей температурного поля двошарових валків двох валкового прокатного стану та тришарових валків ВК під час виробництва металеві стрічки при щільному контакт шарів валка з різними теплофізичними характеристиками шарів.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Моделювання температурного розподілу одно та двошарових валків прокатного стану під час термічної обробки та прокатки стрічки відноситься до задач визначення температурного поля у циліндричній області, що обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю  $\omega$  [11, 12]. Для визначення температурного розподілу  $T(r, z, \varphi, t)$  у такому складеному циліндрі приходимо до наступної крайової задачі на спряження в області  $\Omega \times t = \{(r, z, \varphi, t) | 0 < r < r_0, 0 < z < l, 0 < \varphi < 2\pi, t > 0\}$ .

$$\lambda_{1,2} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_{1,2} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \lambda_{1,2} \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} - c_{1,2} \rho_{1,2} \frac{\partial T}{\partial t} = \begin{cases} -w, & \forall \quad r_0 - \Delta + 0 \leq r < r_0, \\ 0, & \forall \quad 0 < r < r_0 - \Delta - 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$T(r, 0, \varphi, t) = T(r, z, \varphi, 0) = T_0, \quad T(r, l, \varphi, t) = T_0, \quad (7)$$

$$\lambda_1 T_r(r_0 - \Delta - 0, z, \varphi, t) = \lambda_2 T_r(r_0 - \Delta + 0, z, \varphi, t), \quad (8)$$

$$T(r_0 - \Delta - 0, z, \varphi, t) = T(r_0 - \Delta + 0, z, \varphi, t)$$

$$\lambda_1 T_r(r_0, z, \varphi, t) = -\alpha(T - T_c) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_c^4), \quad (9)$$

$$T_r(0, z, \varphi, t) = 0,$$

$$T(r, \varphi + 2\pi, t) = T(r, \varphi, t), \quad (10)$$

де  $T_c$  – температура середовища, що оточує валки.

Розглянемо математичну модель температурного поля валка у валковому кристалізаторі (рис.1), що має вигляд тришарового циліндра, у якому одна частина зовнішнього шару контактує з розплавленим металом, що має температуру  $t_c$ , а інша частина зовнішнього шару приймає участь у теплообміні із оточуючим його середовищем з температурою  $T_c$ . До другого шару валка ВК, що має щільний тепловий контакт з першим тепло передається теплопровідністю і від нього до третього шару також теплопровідністю.

Визначення температурного розподілу  $T_i(r, z, \varphi, t)$  у тришаровому циліндрі ВК, де частина зовнішнього шару в умовах щільного теплового контакту сприймає тепловий потік від розплавленого металу та передає його до наступного, а внутрішній шар, що має сталу температуру меншу від температури зовнішніх шарів, приймає участь у теплообміні із зовнішніми шарами має вигляд крайової задачі для однорідного рівняння теплопровідності у циліндричній області з циклічно діючими умовами теплообміну  $\Omega \times t : \{0 < r < r_0, 0 < z < l, 0 < t < t_0\}$ :

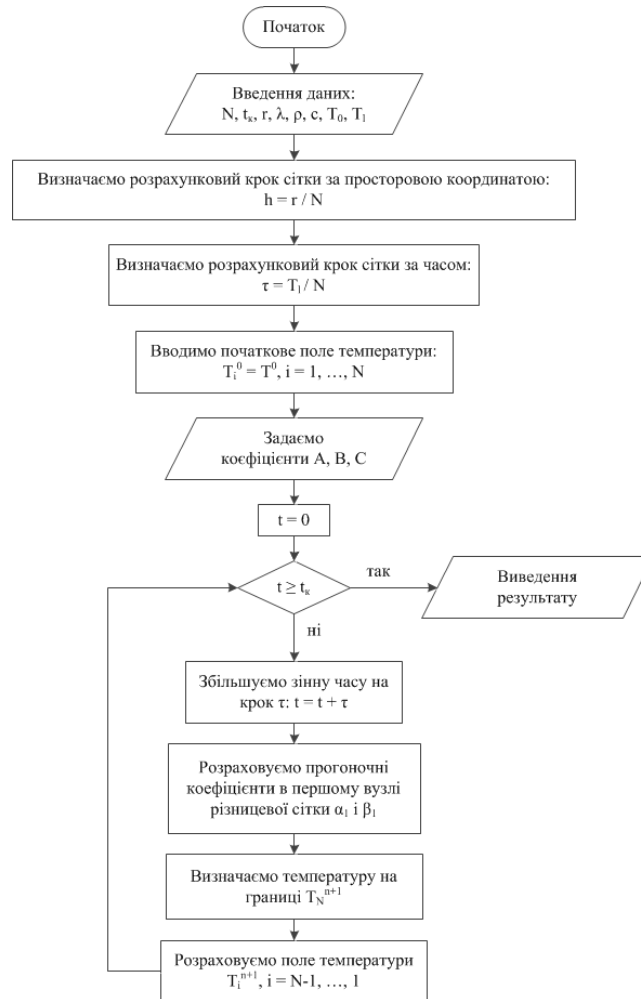


Рис. 3. Блок-схема алгоритму роботи програми.

$$\lambda_i \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} + \lambda_i \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial \varphi^2} - c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

$$T_i(r, z, \varphi, 0) = T_0, \quad (12)$$

$$T_i(r, 0, \varphi, t) = T_0, \quad T_i(r, l, \varphi, t) = T_0 \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{r=r_3} = F(r, z, \varphi, t, T) = \begin{cases} q, \forall \omega t < \varphi < \varphi_0 + \omega t, \\ \alpha_1 (T_c - T) + \varepsilon \sigma (T_c^4 - T^4) \end{cases} \quad (14)$$

$$T_i(r_{i-0}, z, t) = T_{i+1}(r_{i+1}, z, t), \quad i = 1 \dots 3, \quad (15)$$

$$\lambda_i \left. \frac{\partial T_i}{\partial r} \right|_{r=r_i-0} = \lambda_{i+1} \left. \frac{\partial T_{i+1}}{\partial r} \right|_{r=r_i+0}, \quad i = 1 \dots 3, \quad (16)$$

Задачу (11)–(16) можна спростити, розглянувши температурне поле радіального перерізу валка, вважаючи, що температура уздовж осі  $OZ$  залишається сталою, поклавши  $T_z = 0$ . Її розв’язуємо чисельно-аналітичним методом. Так як джерела і стоки тепла у ВК діють циклічно, то через деякий час настає температурна рівновага у системі розплавлений метал – валки – охолоджуюча рідина.

На основі алгоритму (рис. 3) створено програму у середовищі MATLAB для знаходження температурного поля зони нагрівання тришарового валка, що розігрівається від розплавленого металу у ВК. Задача розв’язується методом кінцевих елементів із застосуванням систем комп’ютерної математики згідно алгоритму (рис.3) за допомогою GUI-додатка MATLAB PDETool. Сформульовано триангулярну сітку з використанням методу Делоне. Криволінійна границя області апроксимується відрізками – ребрами

трикутних кінцевих елементів[13]: Для двошарових валків отриману спрощену крайову задачу розв'язано за допомогою функції Maple pdsolve.

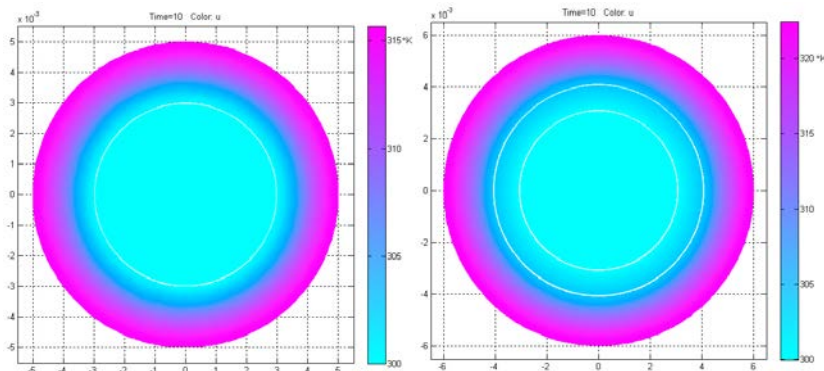


Рис. 4. Температурний розподіл у дво та тришаровому валку, побудованому згідно алгоритма (рис.3), за розв'язком спрощених задач (6)-(10) та (11)-(16).

### Висновки

Побудовані математичні моделі у вигляді крайових задач на спряження для визначення температурного розподілу під час прокатки металеві стрічки за допомогою прокатного стану та валкового кристалізатора, валки яких мають вигляд двошарового та тришарового циліндрів з різними теплофізичними характеристиками шарів. Побудовано алгоритм та на його основі створено програму для знаходження температурного поля зони нагрівання тришарового валка. Задачу розв'язано методом кінцевих елементів із застосуванням систем комп'ютерної математики згідно наданому алгоритму за допомогою GUI-додатка MATLAB PDETool.

### Список використаної літератури

1. Сталь на рубеже столетий / [Беляничков Л. Н., Бородин Д. И, Валавин В. С и др.]; под. ред. Ю.С. Карабасова. – М. МИСИС, 2001. – 664 с.
2. Бровман М. Совмещенные процессы непрерывного литья и прокатки. Перспективы развития металлургической промышленности / М. Бровман. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 627 с.
3. Чубенко В.А. Дослідження ефективності суспензійної розливки рідкої сталі у ливарно-прокатні кліті для виготовлення тонких смуг/ В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька, В.В. Чубенко // Гірничий вісник, .– 2016. – Вип. 101.- С. 183-187
4. Борисов А.А. Математическая модель теплового профиля валка прокатного стана, как объекта с распределенными параметрами и постановка задачи управления планшетностью проката / А.А. Борисов // Наукові праці ДонНТУ. – 2007. – Вип. 130. – С. 18-22.
5. Тришевський О.І. Розробка математичної моделі теплового стану валка при гарячій прокатці листа / О.І. Тришевський., М.В. Салтавец, О.А. Юрченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 5/4 (41). – С. 14-17.
6. Тришевский О.И. Разработка математической модели теплового состояния полосы при прокатке / О.И. Тришевский., М.В. Салтавец // Сталь. – 2009. – № 2. – С. 42-44.
7. Демьянченко О.П. Температурное поле неограниченного теплоизлучающего цилиндра / О.П. Демьянченко, О.Г. Нартова // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения. – К.: Ин-т математики НАН Украины. – 1999. – С. 80-84.
8. Демьянченко О.П. Усредненная задача теплопроводности для вращающегося полого цилиндра / О.П. Демьянченко // Доповіді НАН України. Математика. Природознавство. – 2002. – № 3. – С. 98-103.
9. Ляшенко В.П. Дослідження температурного поля двошарового циліндра з різними теплофізичними характеристиками / В. П. Ляшенко, Т. А. Григорова // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. – 2010. – № 890. – С. 47-52.
10. Ляшенко В.П. Математичні моделі теплообміну з умовами імпедансного типу у багатшарових областях / В.П. Ляшенко, О.Б. Кобильська, О.П. Дем'яненко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2017. – Вип. 6/2017 (106). – С. 37-43.
11. Березовская Л.М. Периодическая задача теплопроводности для цилиндра с термическим покрытием / Л.М. Березовская, О.П. Демьянченко // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения. – 1998. – С. 17-20.

12. Ляшенко В.П. К расчету температурного поля теплоизлучающего полого цилиндра / В.П. Ляшенко, О.П. Демьянченко // Вестник Херсонского государственного технического университета. – 2002. – № 2(15). – С. 154-159.
13. Савула Я.Г. Числовий аналіз задач математичної фізики варіаційними методами / Я.Г. Савула. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2004. – 222 с.

УДК 519.688

А.С. МАЗМАНИШВИЛИ

Национальный Научный Центр "ХФТИ" НАНУ

Д.В. ЛАПТЕВ

Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАНУ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДИССИПАТИВНЫХ КВАЗИБРИЗЕРОВ В ОБОБЩЁННОЙ МОДЕЛИ ОДНОМЕРНОЙ РЕШЁТКИ ХИРОТЫ

*Сильно возбужденные состояния в низкоразмерных кристаллах могут быть описаны в рамках теории солитонов, которым сопоставляются точные решения уравнений в частных производных. В то же время число интегрируемых нелинейных решеток крайне мало. Более 40 лет назад Р. Хиротой для самодуальных уравнений сети были найдены точные многосолитонные решения. Им также было показано, что эти нелинейные уравнения эквивалентны уравнениям колебаний одномерного кристалла, в котором сила взаимодействия между соседними атомами пропорциональна тангенсу разности их смещений. Для такой нелинейной решетки Хироты М.М. Богданом были получены точные решения для дискретных бризеров, представляющих собой связанные состояния солитон-антисолитонной пары, и рассчитаны физически важные интегралы движения – импульс, энергия и поток энергии солитонов. В данной работе численно моделируется динамика нелинейных локализованных колебаний – дискретных бризеров и квазibriзеров одноатомной и двухатомной ангармонической цепочки. Основываясь на методе Рунге-Кутты 4-го порядка, разработан алгоритм решения уравнения обобщенной решетки Хироты. Показана устойчивость дискретных квазibriзеров в обобщенной решетки Хироты при малых диссипациях. При этом происходят незначительные изменения со временем формы и физических характеристик, таких как амплитуда, частота и скорость огибающей квазibriзера. Характерные времена таких изменений намного больше периода осциллирующей квазibriзера. При больших коэффициентах диссипации наблюдается излучение квазibriзером линейных волн и резкое его затухание. Для системы двухатомной цепочки Хироты, состоящей из чередующихся легких и тяжелых атомов, получен дискретный квазibriзер, который представляет собой колеблющийся легкий атом, находящийся между двумя тяжелыми атомами, и совершающий колебания с примерно постоянной амплитудой и частотой. Массивные атомы при этом практически неподвижны. Частота колеблющегося легкого атома лежит выше оптической ветви фоннных колебаний двухатомной цепочки.*

*Ключевые слова:* уравнение решетки Хироты, атомная цепочка, дискретные бризеры, квазibriзеры.

О.С. МАЗМАНИШВИЛИ

Национальный Научный Центр "ХФТИ" НАНУ

Д.В. ЛАПТЕВ

Физико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАНУ

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ДИСПАТИВНИХ КВАЗІБРИЗЕРІВ В УЗАГАЛЬНЕНІЙ МОДЕЛІ ОДНОВИМІРНОЇ РЕШІТКИ ХІРОТИ

*Сильно збуджені стани в низьковимірних кристалах можуть бути описані в рамках теорії солітонів, яким зіставляються точні розв'язки рівнянь в частинних похідних. У той же час кількість інтегрованих нелінійних решіток вкрай мала. Понад 40 років тому Р. Хіртою для самодуальних рівнянь мережі були знайдені точні багатосолітонні розв'язки. Ним також було показано, що ці нелінійні рівняння еквівалентні рівнянням коливань одновимірного кристала, в якому сила взаємодії між сусідніми атомами пропорційна тангенсу різниці їх зсувів. Для такої нелінійної решітки Хіроты М.М. Богданом було отримано точні розв'язки для дискретних бризерів, що представляють собою зв'язані стани солітон-антисолітонних пар, і розраховано фізично важливі інтеграли руху – імпульс, енергія і потік енергії солітонів. У даній роботі чисельно моделюється динаміка нелінійних локалізованих коливань – дискретних бризерів і квазibriзерів одноатомного і двоатомного ангармонічного ланцюжка атомів. Ґрунтуючись на методі Рунге-Кутти 4-го порядку, розроблено алгоритм розв'язку рівняння узагальненої решітки Хіроты. Показана стійкість дискретних квазibriзерів в узагальненій решітці Хіроты при малій дисипації. При цьому відбуваються незначні зміни з часом форми і фізичних характеристик, таких як амплітуда, частота і швидкість огибаючої квазibriзера. Характерні часи таких змін набагато більші періоду осцилюючої квазibriзера. При великих коефіцієнтах дисипації спостерігається випромінювання квазibriзером лінійних хвиль і різке його загасання. Для системи двоатомного ланцюжка Хіроты, що складається з чергуючих легких і важких атомів, отриманий дискретний квазibriзер, який являє собою легкий атом, що знаходиться між двома важкими атомами, і здійснює коливання з приблизно постійною амплітудою і частотою. Массивні атоми при цьому практично не рухаються. Частота коливань легкого атома лежить вище оптичної гілки фонних коливань двоатомного ланцюжка.*

Ключові слова: рівняння решітки Хіроти, атомний ланцюг, дискретні бризери, квазібризери.

A. S. MAZMANISHVILI

National Science Center "Kharkov Institute of Physics & Technology" NASU

D. V. LAPTEV

B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering NASU

## MATHEMATICAL MODELING OF THE DYNAMICS OF DISSIPATIVE QUASIBRITHERS IN THE GENERALIZED MODEL OF THE ONE-DIMENSIONAL HIROTA LATTICE

*Strongly excited states in low-dimensional crystals can be described within the framework of the theory of solitons, as the exact solutions of integrable partial differential equations. At the same time, the number of integrable nonlinear lattices is extremely small. More than 40 years ago, R. Hirota has found the exact multi-soliton solutions for the system of self-dual network equations. He has also showed that these nonlinear equations are equivalent to the equations of a one-dimensional crystal oscillations, in which the interaction force between neighboring atoms is proportional to the tangent of the difference of their displacements. M.M. Bogdan has obtained the exact discrete breathers solutions for the nonlinear Hirota lattice equation, which are bound states of soliton-antisoliton pairs, and physically important integrals of motion – the momentum, energy, and energy flux of solitons were calculated. The explicit expressions for moving discrete breathers made possible to describe analytically the interaction of these excitations with each other and with other excitations of the system. It is known that in exactly integrable equations solitons in motion retain their individuality and their interaction reduces in the case of kinks and antikinks to additional shifts of the centers of mass, and in the case of breathers also to phase shifts of their oscillations in time. In this paper, the dynamics of nonlinear localized oscillations – discrete breathers and quasibreathers – is modeled numerically for a monatomic and diatomic anharmonic chain of atoms. Based on the fourth-order Runge-Kutta method, an algorithm for solving the Hirota generalized lattice equation is developed. The stability of discrete quasibreathers in the generalized Hirota lattice for small dissipations is shown. During the evolution there are minor changes in form and physical characteristics over time, such as the amplitude, frequency, and speed of the envelope of the quasibreather. The characteristic times for such changes are much larger than the quasibreather period of oscillations. At large dissipation coefficients, a quasibreather emits the linear waves and its damping is abrupt. For a system of a diatomic Hirota chain consisting of alternating light and heavy atoms, a discrete quasibreather is obtained, which is an oscillating light atom located between two heavy atoms, oscillating with approximately constant amplitude and frequency. Massive atoms are practically immobile in this case. The frequency of an oscillating light atom lies above the optical branch of the phonon spectrum of a diatomic chain.*

*Keywords: Hirota lattice equation, atomic chain, discrete breathers, quasibreathers.*

### Постановка задачи

В последние годы интенсивно изучаются нелинейные локализованные колебания – дискретные бризеры (или внутренние локализованные моды) в различных физических системах, таких как ангармонические цепочки атомов, оптические и оптоволоконные микрорезонаторы, системы джозефсоновских контактов, оптические и электрические линии передачи и другие [1]. В работах М.М. Богдана получены аналитические решения в виде дискретного бризера (ДБ) [2] для уравнения решётки Хироты [2-4], которые описывают динамику одномерного ангармонического кристалла с тангенциальной силой взаимодействия между ближайшими соседями. В настоящей работе численно исследуется эволюция дискретных квазibriзеров [5] в обобщённой модели одномерной решётки Хироты [2, 4], состоящей из чередующихся атомов с разными массами и учитывающей такой физически важный эффект, как диссипация и внешняя накачка. В отличие от дискретных бризеров, квазibriзеры являются не строго периодическими во времени динамическими объектами, хотя и локализованными в пространстве [5].

### Моделирование нелинейной динамики решётки Хироты

Наше рассмотрение начнём с точно решаемого уравнения, описывающего одномерный ангармонический кристалл с тангенциальным взаимодействием между ближайшими соседями, – уравнение решётки Хироты. Данное уравнение в безразмерных переменных имеет следующий вид [2, 3]:

$$\frac{\ddot{\varphi}_n}{1 + \dot{\varphi}_n^2} = \operatorname{tg}(\varphi_{n-1} - \varphi_n) - \operatorname{tg}(\varphi_n - \varphi_{n+1}). \quad (1)$$

Здесь обозначено:  $\varphi_n = \varphi_n(t)$  – смещения атомов из положений равновесия. Считаем, что пространственный индекс и временная переменная изменяются в следующих диапазонах:  $n=1, 2, \dots, N$ ,  $t=0, \dots, t_{\max}$ . Уравнение (1) описывает одномерную цепочку атомов, в которой учитывается взаимодействие только между ближайшими соседями, причём сила взаимодействия пропорциональна тангенсу от разности смещений. В данной модели кинетическая часть имеет нестандартный вид. В пределе малых смеще-

ний и скоростей атомов модель сводится к хорошо изученным моделям Ферми-Паста-Улама и модели одномерного кристалла с линейной силой взаимодействия между ближайшими соседями. В 2003 г. М.М. Богданом [2] было впервые получено точное решение уравнения (1) в виде движущегося дискретного бризера:

$$\varphi_n(t) = \arctg \left[ \frac{\text{sh}(\kappa/2) \cos(kn - \omega t + \alpha)}{\sin(k/2) \text{ch}\kappa(n - Vt - n_c)} \right], \quad \omega = 2\text{ch} \frac{\kappa}{2} \sin \frac{k}{2}, \quad V = \frac{\text{sh}(\kappa/2)}{\kappa/2} \cos \frac{k}{2}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – частота заполнения и  $V$  – скорость огибающей дискретного бризера, при этом параметр  $k$  играет роль квазиволнового числа, а параметр  $\kappa$  связан с амплитудой и эффективной шириной огибающей бризера,  $\alpha, n_c$  – начальная фаза колебаний и начальное положение центра масс бризера – произвольные вещественные константы. Решение (2) определяется двумя независимыми параметрами.

Точные решения уравнения (1) в виде солитон-солитонных, солитон-антисолитонных и бризерных сверхрешёток получены в [4].

Для моделирования рассматриваемых нелинейных цепочек атомов в данной работе был разработан алгоритм численного решения системы из  $2N$  дифференциальных уравнений второго порядка, основанный на методе Рунге-Кутты 4-го порядка. В работе везде используются периодические граничные условия:

$$\varphi_0 = \varphi_N, \quad \varphi_{N+1} = \varphi_1. \quad (3)$$

Для проверки метода было рассмотрено уравнение (1) и в качестве начального условия было взято точное решение (2) при  $t = 0$ .

На рис. 1 снизу приведены трёхмерные графики зависимостей смещений атомов в цепочке от времени и номера узла, а сверху – соответствующие этим случаям начальные условия.

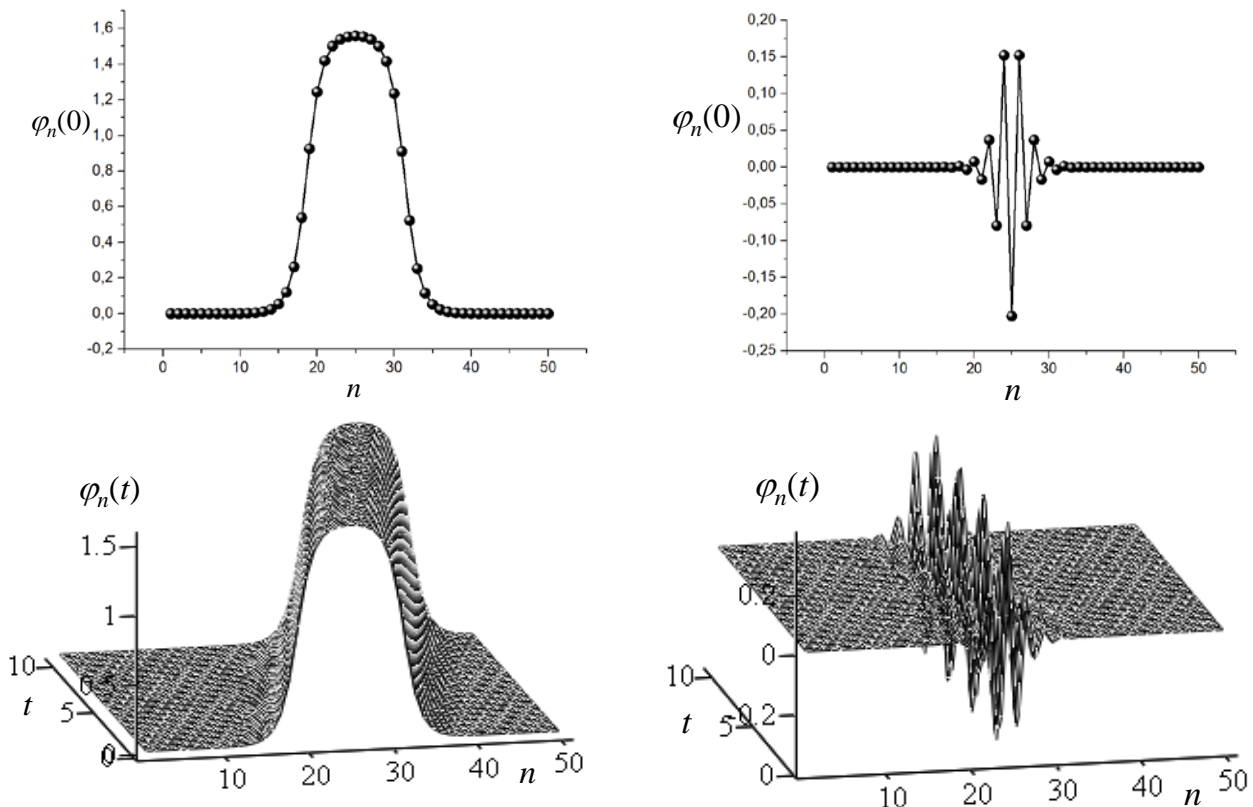


Рис. 1. Динамика ангармонической цепочки.

Параметры:  $n_c = 25, \kappa = 0.8$ ; слева:  $k = 0.01, \alpha = 0$ , справа:  $k = \pi, \alpha = \pi/3$

Были взяты следующие значения параметров: количество атомов  $N = 50$ , время счёта  $t_{\max} = 10$ ,  $\kappa = 0.8$  (близкие к единице значения этого параметра соответствуют сильной локализации бризера), координата центра бризера  $n_c = 25$ , квазиволновое число и начальная фаза  $k = 0.01, \alpha = 0$ , (слева) и  $k = \pi, \alpha = \pi/3$  (справа). Для таких бризеров периоды колебаний  $T = 2\pi/\omega = \pi \text{sech}(\kappa/2) \text{cosec}(k/2)$  соответственно равны 581.20 и 2.91.



Получившиеся возбуждения представляют собой дискретные бризеры. Слева – локализованный бризер, у которого скорость центра масс намного больше фазовой скорости внутреннего заполнения, справа – локализованный малоамплитудный бризер с нулевой скоростью центра масс. Итак, в течение времени дискретный бризер при различных значениях параметров сохраняет локализацию значения амплитуд и скорости.

Поскольку в данном случае одноатомной цепочки начальное условие является точным решением, оно не должно разрушаться с течением времени, что подтвердило численное моделирование. Таким образом, с помощью точного решения была проверена численная схема. Кроме того, правильность схемы подтверждена неизменностью значений следующих интегралов движения с течением времени:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \ln(1 + \dot{\varphi}_n^2) - \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \ln[\cos^2(\varphi_n - \varphi_{n-1})], \quad \Pi = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \arctan(\dot{\varphi}_n), \quad (4)$$

играющие роль соответственно энергии и топологического заряда возбуждения решётки [2].

На рис. 2а приведены зависимости смещений вдоль цепочки 26-го, 28-го и 30-го атома от времени. Из моделирования следует, что все атомы в бризере колеблются с одинаковой и постоянной частотой, амплитуда колебаний постоянна в пределах времени моделирования и уменьшается экспоненциально с удалением от центра бризера.

На рис. 2б приведена зависимость смещений атомов от номера узла спустя время равное 32 периодам колебаний после начала счёта. Видно, что бризер устойчив и сохраняет свою форму с течением времени.

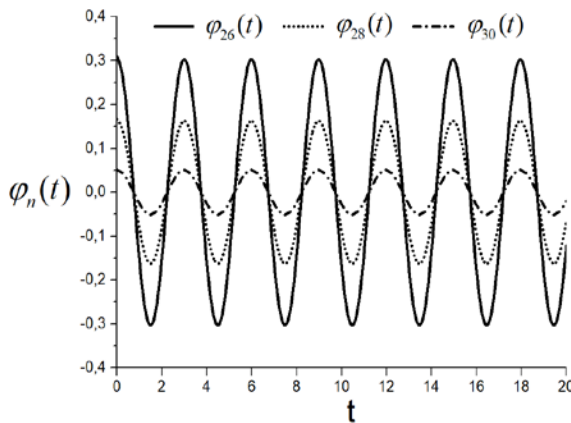


Рис. 2а. Зависимости смещений вдоль цепочки 26-го, 28-го и 30-го атома от времени

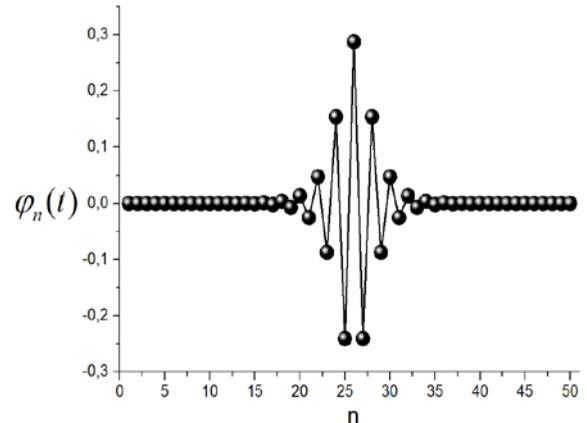


Рис 2б. Зависимость смещений атомов от номера узла спустя 32 периода колебаний после начала счёта

Параметры:  $n_c = 26$ ,  $\kappa = 0.8$ ;  $k = \pi$ ,  $\alpha = \pi/3$

### Моделирование нелинейной динамики обобщенной решётки Хироты

Далее перейдём к моделированию динамики обобщённой решётки Хироты, состоящей из атомов заданных масс и учитывающей такие физические эффекты, как диссипация и внешняя накачка. В безразмерных переменных система уравнений, описывающих обобщённую решётку Хироты, имеет следующий вид [4]:

$$\frac{M_n \ddot{\varphi}_n}{1 + M_n \dot{\varphi}_n^2} = \text{tg}(\varphi_{n-1} - \varphi_n) - \text{tg}(\varphi_n - \varphi_{n+1}) - \lambda_n \dot{\varphi}_n + f_n(\varphi_n, t). \quad (5)$$

Здесь обозначено:  $\varphi_n = \varphi_n(t)$  – смещение  $n$ -го атома массы  $M_n$  из положения равновесия;  $\lambda_n$  – коэффициенты диссипации атомов,  $f_n(\varphi_n, t)$  – внешняя переменная сила, действующая на  $n$ -й атом. Пространственный индекс и время изменяются в следующих диапазонах:  $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $t = 0, \dots, t_{\max}$ .

Будем считать, что цепочка состоит из атомов одного сорта, и положим  $M_n = 1, \forall n$ . Рассмотрим влияние диссипации на нелинейную динамику цепочки. Пусть  $\lambda_n = \lambda, \forall n$ . Внешние силы не учитываем  $f_n(\varphi_n, t) = 0$ . В качестве начального условия возьмём выражение (2), которое является точным решением уравнения (1).

На рис. 3а приведены зависимости смещений вдоль цепочки 16-го, 18-го и 20-го атома от времени. Из моделирования следует, что с течением времени частоты атомов в бризере начинают отличаться, появля-

ється сдвиг фаз колибаний атомов, амплітуда колибаний кожного атома убиваєт експоненціально из-за диссипации, а также убиваєт експоненціально с удалением от центра бризера.

На рис. 3б приведена зависимость смещений атомов от номера узла спустя время равное 4 периодам колибаний после начала счёта. Видно, что амплітуда бризера существенно уменьшилась, но при этом он сохраняет свою форму и локализацию с течением времени.

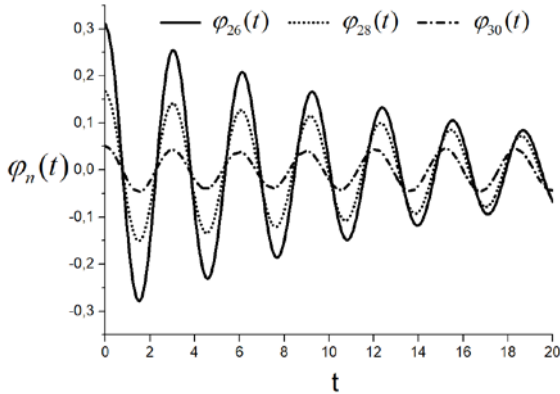


Рис. 3а. Зависимости смещений вдоль цепочки 26-го, 28-го и 30-го атома от времени,  $N = 50, n_c = 26$

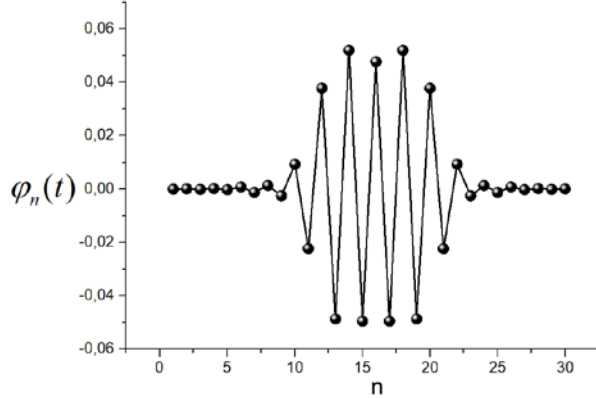


Рис 3б. Зависимость смещений атомов от номера узла спустя 4 периода колибаний после начала счёта,  $N = 30, n_c = 16$

Параметры:  $\kappa = 0.8, k = \pi, \alpha = \pi/3, \lambda = 0.01$

Таким образом, получившиеся нелинейные возбуждения представляют собой диссипативные квазибризеры. В дальнейшем будем считать, что цепочка состоит из чередующихся атомов разных масс:

$$M_n = \begin{cases} M_{\text{лёгкий}} \equiv 1, & n = 2m + 1, \\ M_{\text{тяжёлый}} \equiv M, & n = 2m. \end{cases} \quad (6)$$

При этом, как известно, зависимость частоты от квазиволнового числа для линейных волн имеет акустическую и оптическую ветви колибаний, разделённые щелью. Причём акустической ветви соответствуют частоты в интервале  $[0, \omega_1]$ , акустической щели соответствует интервал  $[\omega_1, \omega_2]$ , а оптической ветви – интервал  $[\omega_2, \omega_3]$ :

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{2}{M_{\text{тяжёлый}}}} = \sqrt{\frac{2}{M}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{2}{M_{\text{лёгкий}}}} = \sqrt{2}, \quad \omega_3 = \sqrt{\frac{2}{\mu}} = \sqrt{2\left(1 + \frac{1}{M}\right)}, \quad (7)$$

где  $\mu = M_{\text{лёгкий}} M_{\text{тяжёлый}} / (M_{\text{лёгкий}} + M_{\text{тяжёлый}}) = M / (1 + M)$  – приведенная масса лёгкого и тяжелого атомов.

Будем считать, что диссипация и внешние силы отсутствуют  $\lambda_n = 0, f_n(\varphi_n, t) = 0, \forall n$ . В качестве начального условия возьмём выражение (2). Выберем следующие значения для масс лёгкого и тяжелого атомов:  $M_{\text{лёгкий}} = 1, M_{\text{тяжёлый}} = 106$ , такие значения близки к массам водорода и палладия в гидриде палладия PdH. Тогда циклические частоты (7) будут равны:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{53}} \approx 0.137, \quad \omega_2 = \sqrt{2} \approx 1.414, \quad \omega_3 = \sqrt{\frac{107}{53}} \approx 1.421. \quad (8)$$

На рис. 4 приведены зависимости смещений вдоль цепочки 26-го (тяжёлого), 27-го (лёгкого) и 28-го (тяжёлого) атома от времени. Из моделирования следует, что лёгкий атом, находящийся между двумя тяжёлыми атомами совершает колебания с примерно постоянной амплитудой и частотой. Массивные атомы при этом практически неподвижны. Циклическая частота колеблющегося лёгкого атома примерно равна  $\Omega \approx 1.571$ . Таким образом, получившееся нелинейное возбуждение представляет собой высокочастотный квазибризер с частотой выше оптической ветви фоновых колибаний двухатомной цепочки.

Дискретные бризеры являются распространёнными объектами в нелинейных дискретных системах. Перспективным является переход от изучения дискретных бризеров в модельных системах, таких как одноатомная и двухатомная решётки Хироты, к исследованию динамики и свойств таких возбуждений в моделях реальных двумерных и трёхмерных кристаллов, а также квазикристаллов. При этом значительную роль играют экспериментальные, а также численные методы, использующие реалистичные межатомные потенциалы, соответствующие различным соединениям – металлам, сплавам, ионным кристаллам и др. Численное моделирование позволит в

дальнейшем понять роль дискретных бризеров в формировании свойств реальных кристаллов и даст фундамент для использования дискретных бризеров в новых технологиях. К слабо изученным вопросам, связанным с дискретными бризерами, можно отнести: разработка методов возбуждения ДБ и определение наиболее эффективных начальных условий для формирования долгоживущих локализованных колебаний, определение свойств ДБ таких как диапазон энергий, частот бризера, амплитуда, частота, степень локализации, время жизни и т.д. для кристаллов с различными типами связей, проведение квантовомеханических расчётов с целью уточнения данных, полученных методами молекулярной динамики, исследование термofлуктуационного зарождения ДБ, изучения свойств ДБ при конечных температурах, исследование влияния ДБ на кинетические процессы и явления переноса в твёрдых телах, оценка вклада ДБ в процессы переноса заряда, магнитного момента, теплопроводность, взаимодействие ДБ с дефектами в кристаллах.

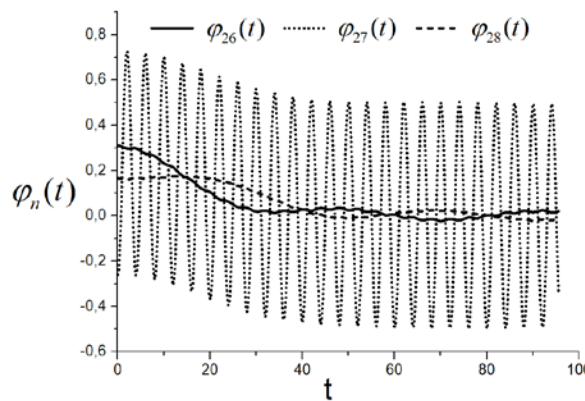


Рис. 4а. Зависимости смещений вдоль цепочки 26-го, 27-го и 28-го атома от времени

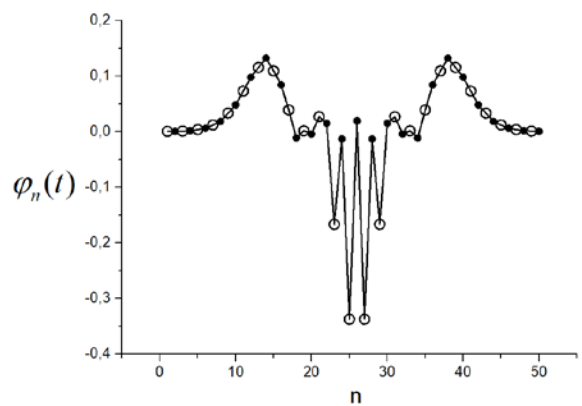


Рис. 4б. Зависимость смещений атомов от номера узла спустя 32 периодов колебаний после начала счёта

Параметры:  $n_c = 26$ ,  $\kappa = 0.8$ ,  $k = \pi$ ,  $\alpha = 0$ ,  $\lambda = 0$ ,  $M = 106$

### Выводы

В работе численно моделируется динамика нелинейных локализованных колебаний – дискретных бризеров и квазибризеров в одноатомной и двухатомной ангармонической цепочке атомов. Разработан алгоритм решения уравнения обобщённой решётки Хироты, основанный на методе Рунге-Кутты 4-го порядка. Показана устойчивость дискретных квазибризеров в обобщённой решётке Хироты при малых диссипациях. В этом случае происходят незначительные изменения со временем формы и физических характеристик, таких как амплитуда, частота и скорость огибающей квазибризера. Характерные времена таких изменений намного больше периода осцилляций квазибризера. При больших коэффициентах диссипации наблюдается излучение квазибризером линейных волн и резкое его затухание. Рассмотрен случай двухатомной цепочки Хироты, состоящей из чередующихся лёгких и тяжёлых атомов. Для такой системы получен дискретный квазибризер, который представляет собой колеблющийся лёгкий атом, находящийся между двумя тяжёлыми атомами, совершающий колебания с примерно постоянной амплитудой и частотой. Массивные атомы при этом практически неподвижны. Циклическая частота колеблющегося лёгкого атома лежит выше оптической ветви фононных колебаний двухатомной цепочки.

### Список использованной литературы

1. Flach S. Discrete breathers – Advances in theory and applications / S. Flach, A.V. Gorbach // Phys. Rep. – 2008. – V. 467, № 1. – P. 1–116.
2. Bogdan M.M. Exact discrete breather solutions and conservation laws of lattice equations / M.M. Bogdan, G.A. Maugin // Proc. Est. Acad. Sci. Phys. Math. – 2003. – V. 52, №1. – P. 76-84.
3. Hirota R. Exact N-soliton solution of nonlinear lumped self-dual network equations / R. Hirota // J. Phys. Soc. Jpn. – 1973. – V. 35, № 1. – P. 289-294.
4. Laptev D.V. Nonlinear periodic waves solutions of the nonlinear self-dual network equations / D.V. Laptev, M.M. Bogdan // J. Math. Phys. – 2014. – V.55, № 4. – 042903-1 – 042903-15.
5. Chechin G.M. Discrete breathers and nonlinear normal modes in monoatomic chains / G.M. Chechin, G.S. Dzhelauhova // Journal of Sound and Vibration (JSV). – 2009. – V. 322, №3. – P. 490–512.

UDC 535.33

O.V. MACHULIANSKYI, B.B. BABYCH, V.O. MACHULIANSKYI

National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**MODELING OF AN ELECTROMAGNETIC RESPONSE OF SINGLE-LAYER  
NANOCOMPOSITE COATINGS**

*The spectral characteristics of the electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings based on metal-dielectric structures in the optical range  $\lambda = 0.2 - 1.1 \mu\text{m}$  are calculated. Effective permittivity is determined based on the approximation of the effective environment. A comparative analysis of electromagnetic response of model nanocomposite structures calculated based on experimental values of optical parameters of nanosized nickel particles and values of nickel in a macroscopic volume with experimental results was carried out. It is shown that taking into account the experimental values of the electromagnetic parameters of nanosized metal particles increases the accuracy of prediction of the electromagnetic response of nanocomposite metal-dielectric structures.*

*Keywords: nanocomposite coatings, electromagnetic response, metal-dielectric structures, numerical modeling.*

O.V. МАЧУЛЯНСЬКИЙ, Б.Б. БАБИЧ, В.О. МАЧУЛЯНСЬКИЙ

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"**МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВІДГУКУ ОДНОШАРОВИХ НАНОКОМПОЗИТНИХ  
ПОКРИТТІВ**

*Розраховані спектральні характеристики електромагнітного відгуку нанокмпозитних одношарових покриттів на основі металодіелектричних структур в оптичному діапазоні  $\lambda = 0,2 - 1,1 \mu\text{м}$ . Визначена ефективна діелектрична проникність на основі наближення ефективного середовища. Проведено порівняльний аналіз електромагнітного відгуку модельних нанокмпозитних структур розрахованих на основі експериментальних значень оптичних параметрів нанорозмірних частинок нікелю та значень, які характерні нікелю в макроскопічному об'ємі з експериментальними результатами. Показано, що врахування експериментальних значень електромагнітних параметрів нанорозмірних частинок металів підвищує достовірність прогнозування електромагнітного відгуку нанокмпозитних металодіелектричних структур.*

*Ключові слова: нанокмпозитні покриття, електромагнітний відгук, металодіелектричні структури, чисельне моделювання.*

A.V. МАЧУЛЯНСКИЙ, Б.Б. БАБИЧ, В.А. МАЧУЛЯНСКИЙ

Национальный технический университет Украины  
"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского"**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОТЗЫВА ОДНОСЛОЙНЫХ  
НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Рассчитаны спектральные характеристики электромагнитного отклика нанокмпозитных однослойных покрытий на основе металлодиэлектрических структур в оптическом диапазоне  $\lambda = 0,2 - 1,1 \mu\text{м}$ . Определена эффективная диэлектрическая проницаемость на основе приближения эффективной среды. Проведен сравнительный анализ электромагнитного отклика модельных нанокмпозитных структур рассчитанных на основе экспериментальных значений оптических параметров наноразмерных частиц никеля и значений, характерных никелю в макроскопическом объеме с экспериментальными результатами. Показано, что учет экспериментальных значений электромагнитных параметров наноразмерных частиц металлов повышает достоверность прогнозирования электромагнитного отклика нанокмпозитных металлодиэлектрических структур.*

*Ключевые слова: нанокмпозитные покрытия, электромагнитный отклик, металлодиэлектрические структуры, численное моделирование.*

**Problem statement. Analysis of recent researches and publications**

The rapid development of modern science and technology necessitates the research and development of new materials with given electromagnetic properties [1-4].

Applied application of such materials is constantly expanding, covering such areas as electronics, information technologies, optoelectronics, power engineering and others. Of particular interest is paid to the development antireflection and selective coatings for renewable energy converters, multifunctional coatings [5-9]. For example, multifunctional coatings have the functions of shielding electromagnetic radiation in the microwave range and at the same time are transparent in the visible region of the spectrum [10].

Analysis of scientific and technical literature shows that for solving such problems, mainly used multilayer interference structures [8]. In particular, multilayered interference structures consist of alternately placed thin metal layers, and dielectrics that transparent in the visible and infrared electromagnetic radiation range. However, such structures have drawbacks, namely: the complexity of manufacturing technology and precision control of multilayer structures; insufficient mechanical strength; degradation of parameters, etc. [8, 11].

A promising option for solving these problems is the use of metal-dielectric composite materials containing nanoscale metal inclusions, which are distributed in the dielectric matrix. By varying the material and microstructure of the matrix and the filler, it is possible to change the electrophysical properties of the composite [6-8]. Multifunctional coatings based on nanocomposite materials have better characteristics than traditional multilayer structures.

However, many material and methodological issues related to the design and manufacture of such systems remain unresolved. Not received sufficient coverage of the influence of the properties of nanosized inclusions and the material of the dielectric matrix on the electromagnetic response of the entire structure as a whole [12, 13].

From the point of view of the properties of nanosized metal inclusions, it is important that the reduction of their size below a certain value, the electrophysical parameters (electric polarizability  $\alpha$ , permittivity  $\varepsilon$ , etc.) become dimensionally dependent and differ from the corresponding characteristics of the metals in the macroscopic volume [3, 14]. At the same time, the mechanisms of optical absorption in such metal-dielectric structures are insufficiently studied. In particular, the role of the dimensional dependences of the optical parameters of metal inclusions in the absorption of nanocomposite structures has not yet been clarified [9, 12]. It should be noted that the experimental data on the optical properties of nanoscale metal inclusions are extremely limited [14, 15]. Therefore, as a rule, applied and fundamental tasks for the development of nanocomposite structures and optimization of their characteristics are solved provided that the electrophysical parameters of the nanosized metal inclusions are identical to their values in macroscopic volume [3, 5, 9]. Between the calculated and experimental optical parameters of nanocomposite structures there are often significant differences [3, 15], which raises the question of the adequacy of their prediction.

These problems can be solved by modeling the electromagnetic response of nanocomposite structures using models that take into account the properties of nanosized components.

#### **Purpose of the study**

The purpose of this work is the numerical modeling of the spectral characteristics of the electromagnetic response of single-layer coatings on the basis of nanocomposite metal-dielectric structures using the proposed model that taking into account the electromagnetic parameters of its components.

#### **Presentation of the main research material**

##### **Modeling of spectral characteristics of electromagnetic response of single-layer coatings**

To modeling the electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings, an improved model based on the approximation of the effective environment [16] and the phenomenological theory of optical properties of thin films was used [17].

The approximation of the effective environment establishes the connection of the effective complex permittivity of the composite  $\varepsilon_{eff} = \varepsilon_{eff1} - i\varepsilon_{eff2}$  with the filling factor  $q$  and the permittivity of metal inclusions  $\varepsilon_m = \varepsilon_{m1} - i\varepsilon_{m2}$  that distributed in an isotropic matrix with permittivity  $\varepsilon_d$ .

Using an approximation of the effective environment for nanocomposite metal-dielectric structures involves a number of restrictions [16]:

- metal inclusions have the shape of the sphere;
- size of the metal inclusions is much smaller than the length of the electromagnetic wave  $\lambda$ ;
- nanosized metal component is randomly distributed in the material of the dielectric matrix.

In the case of nanosized metal inclusions that distributed on a dielectric substrate, the filling factor is determined by the microstructural parameters, namely, the average diameter  $D_0$  and the surface concentration  $N_s$  of nanosized metal inclusions. And it is defined by the expression [17]:

$$q = \pi \frac{D_0^2}{4} N_s \quad (1)$$

In the case of Bruggeman approximation, the expression of an effective complex permittivity of the composite has the form [16]:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_d + 2\varepsilon_m (q\varepsilon_m + (1-q)\varepsilon_d)}{2\varepsilon_m + q\varepsilon_d + (1-q)\varepsilon_m} \quad (2)$$

In the approximation of the effective environment, there is no connection with the response of the metal-dielectric structure to the external electromagnetic influence. Therefore, in the model that used in this paper, phenomenological theory of optical properties of thin films is applied, which connects the parameters of the structure with its response to the electromagnetic influence. This theory is applied with the following restrictions:

- normal fall of a plane electromagnetic wave to the surface of the film structure;
- surface dimensions of the film structure are much larger than the length  $\lambda$ ;
- thickness of the film structure is less than  $\lambda$ ;
- absorbing film with a complex index of refraction  $n^* = n - ik$  that deposited on substrate that transparent in the optical range of the spectrum.

Under these restrictions, the expressions for the transmission coefficients  $T$ , the reflection from the side of the film  $R$  and the substrate  $R'$ , absorption  $A$  can be written as follows [17]:

$$T = \frac{16n_1n_2(n^2 + k^2)}{\rho\tau e^{k\gamma} + \varkappa\sigma e^{-k\gamma} + 2s \cos n\gamma + 2t \sin n\gamma}, \quad (3)$$

$$R = \frac{\varkappa\tau e^{k\gamma} + \rho\sigma e^{-k\gamma} + 2q \cos n\gamma + 2r \sin n\gamma}{\rho\tau e^{k\gamma} + \varkappa\sigma e^{-k\gamma} + 2s \cos n\gamma + 2t \sin n\gamma}, \quad (4)$$

$$R' = \frac{\sigma\rho e^{k\gamma} + \varkappa\varepsilon e^{-k\gamma} + 2q \cos n\gamma - 2r \sin n\gamma}{\rho\tau e^{k\gamma} + \varkappa\sigma e^{-k\gamma} + 2s \cos n\gamma + 2t \sin n\gamma}, \quad (5)$$

$$A = 1 - T - R, \quad (6)$$

where

$$\begin{aligned} \varkappa &= (n - n_1)^2 + k^2; \quad \rho = (n + n_1)^2 + k^2; \\ s &= (n^2 + k^2)(n_1^2 + n_2^2) - (n^2 + k^2) - n_1^2 n_2^2 + 4n_1 n_2 k^2; \\ q &= (n^2 + k^2)(n_1^2 + n_2^2) - (n^2 + k^2) - n_1^2 n_2^2 - 4n_1 n_2 k^2; \\ \sigma &= (n - n_2)^2 + k^2; \\ r &= 2k(n_2 - n_1)(k^2 + n^2 + n_1 n_2); \\ \tau &= (n + n_2)^2 + k^2; \\ t &= 2k(n_2 + n_1)(k^2 + n^2 - n_1 n_2); \\ \gamma &= \frac{4\pi d}{\lambda}; \end{aligned}$$

$n$  – refractive index of the substrate;

$k$  – absorption index of the substrate;

$n_1$  і  $n_2$  – respectively, the refractive index of air and substrate.

In this case, the complex permittivity is related with  $n$  and  $k$  by expressions:  $\varepsilon_1 = n^2 - k^2$ ,  $\varepsilon_2 = 2nk$ .

Thus, the proposed model establishes the relationship between the electromagnetic response of a nanocomposite single-layer structure with electromagnetic and microstructural parameters of its components.

The object of the modeling is a single-layer nanocomposite coating in the form of monolayer nanosized metal inclusions that deposited on a dielectric substrate. As a dielectric substrate, fused quartz, which has a window of transparency from the near ultraviolet to the near-infrared region of the spectrum, is chosen. As a metal component, nickel is selected, since it is used to solve a number of tasks.

In the case of nanocomposite coatings in the form of monolayers of nanosized metal inclusions on a dielectric substrate, the value of the permittivity of the environment  $\varepsilon_a$ , which contains metal inclusions, is determined by the expression [18]:

$$\varepsilon_a = \frac{1 - n_2^2}{2} \tag{7}$$

Examples of the results of calculations of the spectral dependences of the real and imaginary part of the effective permittivity of the model composite coating based on expressions (1) - (2) are shown in Fig. 1.

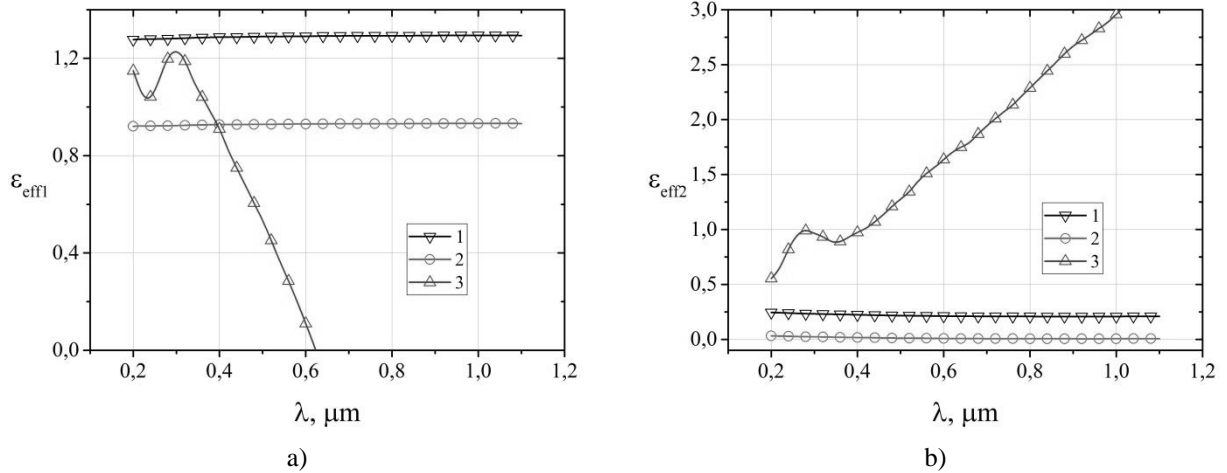


Fig. 1. Spectral dependences of the real (a) and imaginary (b) parts of the complex permittivity of the model composite coatings: 1 –  $\varepsilon_a \approx 1,63$ ; 2 –  $\varepsilon_a = 1$ ; 3 – values of  $\varepsilon$  are characteristic of Ni in macroscopic volume

Modeling was carried out under different conditions. In the first case, the value of the dielectric environment, which surrounds the nanoinclusion of nickel, was calculated by the formula (7), in the second – taken equal to one. Experimental values of electromagnetic parameters of nanosized nickel particles of  $D_0 = 5$  nm that present in [14] were used as values of the permittivity of metal inclusions. For comparison in Fig. 1 shows the spectral dependences of the real and imaginary parts of the complex permittivity of model composite coatings that calculated from the values of optical parameters characteristic of nickel in macroscopic volume [19].

The results of numerical modeling of the spectral characteristics of response of the nanocomposite coating on the example of its absorption coefficient  $A$  are shown in Fig. 2.

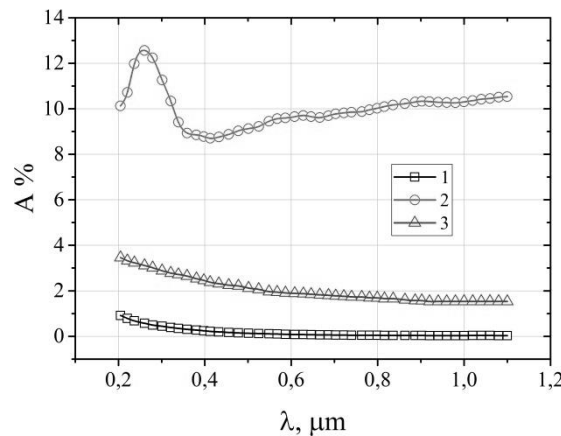


Fig. 2. Spectral Dependences of absorption coefficient: 1 – model composite coating calculated on the basis of experimental values of electromagnetic parameters of nanosized particles of Ni; 2 – model composite coating calculated on the basis of values of characteristic Ni in macroscopic volume; 3 – experimental curve for composite coatings in the form of nanosized film of Ni with a weight thickness of 0.9 nm that deposited on the dielectric substrate

It can be seen that the spectral dependence of the absorption coefficient of the model coating that calculated based on the experimental values of the electromagnetic parameters of the nanosized nickel inclusions correlates with the experimental curve. In turn, the spectral characteristic for a model nanocomposite coating that calculated on the condition that the optical parameters of the metal nanoinclusion have values are characteristic of macroscopic volumes of metal significantly differ from the experimental curve. This confirms the expediency of using experimental optical parameters of nanosized metal inclusions to predict the electromagnetic response of nanocomposite structures.

### Conclusions

The model of electromagnetic response of single-layer nanocomposite coatings is presented, taking into account electromagnetic and microstructural parameters of their components. Taking into account the reliable experimental values of the parameters of the metal nanoinclusions when calculating the response of nanocomposite metal-dielectric coatings to external electromagnetic influence increases the accuracy of the obtained results. Thus, the necessity of studying the electromagnetic properties of metals in the nanosized phase is shown in order to increase the accuracy of prediction of the electromagnetic response of nanocomposite metal-dielectric coatings. Research results are of interest for the development and optimization of single-layer composite coatings and functional devices based on them with given electromagnetic characteristics.

### References

1. E. Moulin, J. Sukmanowski, P. Luo et al. "Improved light absorption in thin-film silicon solar cells by integration of silver nanoparticles," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 354, pp. 2488–2491, 2008.
2. V.V. Pilinskiy, O.V. Telychikina, M.V. Rodionova et al. "Osnovni primeneniya nanostrukturnykh materialov dlya obespecheniya elektromagnitnoy sovmestimosti elektronnykh ustroystv [Basics of using nanostructured materials to ensure electromagnetic compatibility of electronic devices]," *Electronics and Communications*, vol. 3, pp. 9–15, 2010 (in Russian).
3. Y.I. Petrov, *Fizika mal'nykh chastits* [Physics of small particles], Moscow: Nauka, 1982, p. 359 (in Russian).
4. Elektrodinamicheskie harakteristiki nanokompozitov metall-dielektrik s ferromagnitnyimi vklucheniymi [Electrodynamics characteristics of metal-dielectric nanocomposites with ferromagnetic inclusions] / A.V. Borisova, V.P. Bovtun, Y.I. Yakimenko [et al.] // Proceedings of the 23rd International Conference "Microwave and Telecommunication Technology". – Sevastopol, 12–14 September 2013. – P. 855–856 (in Russian).
5. O. Gadomskiy, K. Altunin, N. Ushakov, et al. "Vysokoeffektivnyie prosvetlyayuschie nanostrukturnyie opticheskie pokryitiya dlya solnechnykh elementov [Highly effective antireflective nanostructured optical coatings for solar cells]," *ZhTF*, vol. 80, no. 6, pp. 83–89, 2010 (in Russian).
6. Tatarchuk D. Electrophysical properties of nanocomposite materials on the base of structures metal-dielectric: [text] / D. Tatarchuk, O. Telychikina, Y. Yakimenko [et al.] // Proceedings of the 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology. – Warsaw, 12–16 May 2010. – P. 249–250.
7. Savinov M. Broadband dielectric and conductivity spectra of dielectric-metal nanocomposites for microwave applications: [text] / M. Savinov, Y. Yakimenko, V. Bovtun [et al.] // Proceedings of the IEEE 33rd International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology". – Kyiv, 16–19 April 2013. – P. 21–25.
8. Rodionov M. Energy-efficient optically transparent coating based on a metal-dielectric composites: [text] / M. Rodionov, V. Verbitskiy, Y. Yakimenko [et al.] // Proceedings of the IEEE 35th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology". – Kyiv, 21–24 April 2015. – P. 93–96.
9. A. Kalenskiy, M. Ananeva and A. Nikitin, "Opticheskie harakteristiki nanochastits nikelya v prozrachnykh matritsah [Optical characteristics of nickel nanoparticles in transparent matrices]," *Modern scientific researches and innovations*, vol. 1, no. 43, pp. 5–13, 2014.
10. Machulyanskiy A.V. Matematicheskoe modelirovanie mnogofunktsionalnykh pokrytity [Mathematical modeling of the multifunction coatings] / A.V. Machulyanskiy, B.B. Babyich, V.A. Machulyanskiy // VISNYK of Kherson National Technical University. – Kherson, 2017. – vol. 1, no 3(62) – P. 192–196 (in Russian).
11. Borisova A. Properties of aluminum oxynitride films prepared by reactive magnetron sputtering: [text] / A. Borisova, M. Rodionov, Y. Yakimenko [et al.] // – Proceedings of the IEEE 34th International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnology". – Kyiv, 16–19 April 2014. – P. 188–190.
12. Machulyanskiy A.V. Analiz SVCh-svoystv nanodispersnykh kompozitnykh sistem [Analysis of the microwave properties of nanodispersed composite systems] / A.V. Machulyanskiy, D.D. Tatarchuk, V.A. Machulyanskiy // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2010. – vol. 1. – P. 303–304 (in Russian).
13. Rodionova M. Application of nanostructured materials ensuring the electromagnetic compatibility of power electronic: [text] / M. Rodionova, V. Pilinsky, O. Telychikina [et al.] // Proceedings of the International Symposium EMC Europe 2010. – Wroclaw, 13–17 September 2010. – P. 814–817.
14. Machulianskyi O.V. Optical properties of nickel nanoparticles in systems with a statistically inhomogeneous structure / O.V. Machulianskyi // *Microsystems, Electronics and Acoustics*. – 2018. – vol. 23. – no. 1. – P. 6–15
15. E.A. Bondar, "Razmernyye zavisimosti opticheskikh harakteristik mal'nykh chastits serebra v vyisokochastotnoy oblasti spektra [Size dependences of the optical characteristics of small silver particles in the high-frequency region of the spectrum]," *Opt. Spectrosc.*, vol. 77, no. 3, pp. 414–420, 1994 (in Russian).
16. A.P. Vinogradov, *Elektrodinamika kompozitnykh materialov* [Electrodynamics of composite materials], Moscow: Editorial, 2001, p. 208 (in Russian).
17. G.V. Rozenbepg, *Optika tonkosloynnykh pokrytity* [Optics of thin-layer coatings]. Moscow, USSR, 1958, p. 570 (in Russian).
18. E.A. Bondar, "The Anomalous optical absorption of discontinuous silver films and the polarizability of small particles," *Thin Solid Films*, vol. 81, no. 2, pp. 121–131, 1981.
19. P. Johnson and R. Christy, "Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd," *Phys. Rev. B*, vol. 9, no. 12, pp. 5056–5070, 1974.



УДК 004.942

В.Ф. МИРГОРОД

Военная академия (г. Одесса)

И.М. ГВОЗДЕВА, В.В. ДЕМИРОВ

Национальный университет "Одесская морская академия"

### ТРЕНДОВЫЕ СТАТИСТИКИ ПРИ НЕГАУССОВОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Предлагается и обосновывается подход к исследованию трендовых статистик кумулятивных сумм, Хальда-Аббе и Фишера ( $F$ -критерий) при негауссовом распределении исходных данных. Определена оценка смещения уровней значимости и значений доверительных вероятностей указанных статистик в зависимости от эксцесса априорного распределения исходных данных. Принятая при исследованиях априорная статистическая модель порождения данных выбрана в виде модели разложения распределения исходных данных в ряд Эджворта.

Ключевые слова: математическая модель порождения данных, плотность вероятности, ряд Эджворта, трендовые статистики, уровень значимости.

В.Ф. МИРГОРОД

Військова академія (м. Одеса)

І.М. ГВОЗДЕВА, В.В. ДЕМИРОВ

Національний університет "Одеська морська академія"

### ТРЕНДОВІ СТАТИСТИКИ ПРИ НЕГАУССОВОМУ РОЗПОДІЛІ ВИХІДНИХ ДАНИХ

Пропонується і обґрунтовується підхід до дослідження трендових статистик кумулятивних сум, Хальда-Аббе і Фишера ( $F$ -критерій) при негауссовому розподілі початкових даних. Визначена оцінка зміщення рівнів значущості і значень довірчої ймовірності вказаних статистик залежно від ексцесу априорного розподілу початкових даних. Прийнята при дослідженнях априорна статистична модель породження даних вибрана у вигляді моделі розкладання розподілу початкових даних в ряд Еджворта.

Ключові слова: математична модель породження даних, щільність ймовірності, ряд Еджворта, трендові статистики, рівень значущості.

V.F. MYRHOROD

Military Academy (Odessa city)

I.M. HVOZDEVA, V.V. DEMIROV

National University "Odessa Maritime Academy"

### TREND STATISTICS AT NON-GAUSSIAN DISTRIBUTION OF INITIAL DATA

The approach to the research of cumulative sums trend statistics, Hald-Abbe and Fisher ( $F$ -criterion) with a non-Gaussian distribution of the initial data is proposed and justified. An estimation of the shift in significance levels and confidence values of these statistics is determined depending on the excess of priori distribution of the initial data. The priori statistical model of data generation adopted in the researches was chosen as a model for expanding the distribution of the initial data into the Edgeworth series. To analyze the properties of the Hald-Abbe statistics, we used the known fact of its statistic equivalence to the  $r$ -criterion of uncorrelated random variables ( $RV$ ) and the known relationship of this criterion with Student's statistics. Statistics of  $F$ -criterion is reduces to the distribution of Fisher. The central issue is to determine the type of chi-square statistics for a priori distribution, since the Student and Fisher statistics are based on chi-square statistics. The determination of the form of chi-square statistic is carried out by obtaining the probability density of the square of a random variable distributed over a non-Gaussian law, followed by an  $N$ -dimensional sequential convolution. Chi-square-related statistics of Student and Fisher are obtained by corresponding nonlinear transformations. The shift of the quantiles of Student's statistics in the range (0.9 ... 0.95) is a fraction of a percent. Calculations of threshold levels for trend statistics of cumulative sums, Hald-Abbe, showed a high degree of stability of the researched statistics to the excess of the distribution in the range of confidence probabilities (0.9 ... 0.95) and the number of freedom degrees more than 20. Significant differences arise on levels (0.6 ... 0.8), but this area has no practical interest. Contrary, criteria based on Fisher statistics for non-Gaussian samples may be accompanied by loss of significance levels, which reach 5% or more, for example, for estimating the variance equality and the equality of the means.

Keywords: mathematical model of data generation, probability density, Edgeworth series, trend statistics, significance level.

**Постановка проблеми**

Проблема перевода судовых энергетических установок (СЭУ) на эксплуатацию по техническому состоянию в настоящее время решается путем создания интегрированных систем управления с полной ответственностью, необходимой составной частью которых являются автоматизированные системы контроля и диагностики (АСКД). Важная научно-прикладная задача состоит в повышении надежности статистических выводов о техническом состоянии СЭУ в реальных условиях эксплуатации, которые должны найти свое отражение в соответствующих статистических моделях порождения данных (СМПД).

**Анализ последних исследований и публикаций**

Характерной особенностью анализируемых в АСКД выборок данных о техническом состоянии СЭУ в виде временных рядов термогазодинамических и вибропараметров является тот факт, что они не удовлетворяют опорной гипотезе  $H_0$  о принадлежности к генеральной совокупности некоррелированных нормально распределенных случайных величин (СВ) [1, 2, 3, 11]:  $\bar{x}_k \in N(m, \sigma)$ , где  $\bar{x}_k$  – временной ряд,  $m, \sigma$  – моменты первого и второго порядков. В таких условиях применяемые в АСКД трендовые критерии [4, 6] могут потерять эффективность, что обычно сопровождается ростом потока ложных тревог. В [5, 10] изложены качественные результаты исследований ряда трендовых критериев ( $r$ -критерия и  $F$ -критерия отношения дисперсий [9]) для более сложной СМПД:  $\bar{x}_k \in N(m, \sigma, \gamma, \varepsilon)$ , где  $\gamma, \varepsilon$  – асимметрия и эксцесс выборки.

**Цель исследования**

**Целью** настоящей работы является численно-аналитическая оценка смещения уровней значимости и значений доверительных вероятностей трендовых статистик в зависимости от параметров априорного негауссового распределения выборок данных.

**Изложение основного материала исследования**

Характер распределения данных измерений полностью определяется функцией плотности вероятности (ПВ). В случае негауссового распределения исходных данных наиболее важно учитывать моменты третьего и четвертого порядка, так как асимметрия и эксцесс могут быть оценены по выборке данных измерений. Наибольший интерес представляет учет момента четвертого порядка, который характеризует редкие значительные отклонения в выборке. В виде функции ПВ это проявляется в так называемых "тяжелых хвостах" распределения. В дальнейшем в основном рассматривается вопрос о влиянии момента четвертого порядка при негауссовом распределении исходных данных на снижение доверительной вероятности принятия гипотезы об отсутствии тренда в выборке. Рассматривается диапазон  $P \geq 0,9$  как наиболее важный для практики.

Известно [7], что произвольная функция ПВ может быть представлена через ее моменты бесконечным рядом Эджворта (Грамма-Шарлье):

$$f_a(x) = f_n(x) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{b_n}{\sigma^n} H_n(x), \tag{1}$$

где  $f_n$  – функция ПВ нормального распределения,  $H_n(x)$  – одномерные полиномы Чебышева-Эрмита,  $b_n$  – квазимоменты распределения.

Для практических приложений удобно ограничиться отрезком ряда (1), в котором учитываются первые четыре момента (среднее, дисперсия, асимметрия и эксцесс). Для оценки моментов высших порядков необходимы выборки большого объема, что сложно осуществить на практике. Таким образом, далее предполагается, что негауссова функция ПВ (ФПВ) распределения исходных данных после центрирования и нормирования (статистическая модель порождения данных – СМПД) имеет следующий вид:

$$f_{na}(x) = f_n(x) \left( 1 + \frac{1}{3!} j_1 (x^3 - 3x) + \frac{1}{4!} j_2 (x^4 - 6x^2 + 3) \right), \tag{2}$$

где  $j_1 = \mu_3 / \sigma^3$   $j_2 = \mu_4 / \sigma^4 - 3$  – коэффициенты асимметрии и эксцесса соответственно,  $\mu_3, \mu_4$  – центральные моменты третьего и четвертого порядка соответственно. Рис. 1 и рис. 2 иллюстрируют вид ФПВ (2).

Центральним вопросом является определение вида ФПВ распределения, соответствующего распределению  $\chi^2$ , так как ФПВ распределений Стьюдента и Фишера связаны с ФПВ этого распределения. ФПВ распределения  $\chi^2$  имеет следующий известный вид:

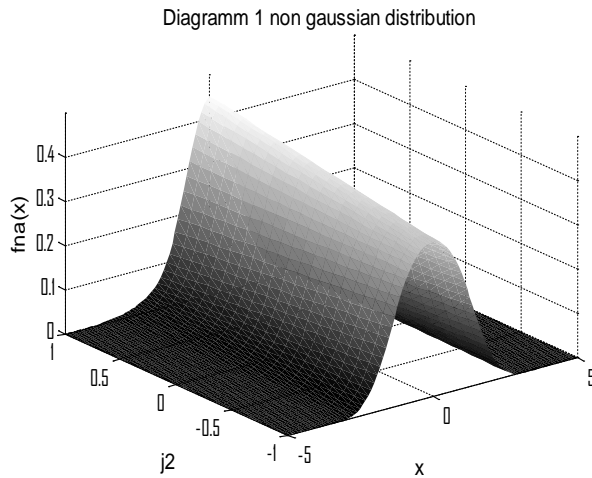


Рис. 1 ФПВ (2) при  $j_1 = 0$

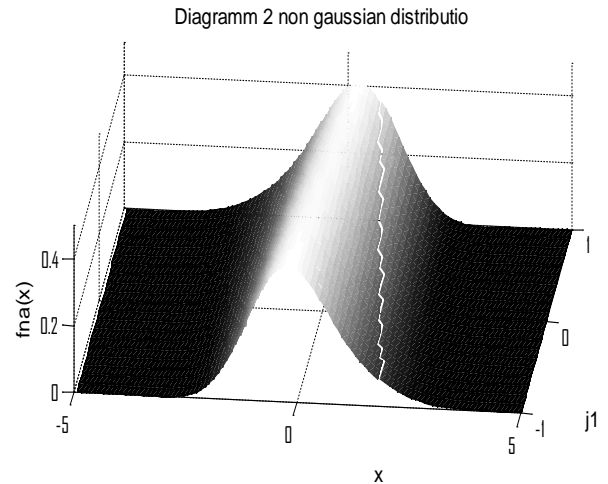


Рис. 2 ФПВ (2) при  $j_2 = 0$

$$f_{\chi^2}(y) = \begin{cases} 0, & y < 0, \\ \Gamma^{-1}(N/2) 2^{-N/2} y^{(N-2)/2} e^{-y/2}, & y \geq 0, \end{cases}$$

где  $\Gamma$  – гамма-функция,  $N$  – число степеней свободы

Типичная интерпретация распределения  $\chi^2$  следующая: если  $N$  взаимно независимых стандартизованных (нормированных) СВ  $u_k = (x_k - m_{xk}) / \sigma_{xk}$  имеют нормальное (гауссово) распределение, то сумма их квадратов  $y = \sum_{k=1}^N u_k^2$  имеет  $\chi^2$  – распределение с  $N$  степенями свободы.

Такая интерпретация указывает путь для определения ФПВ при априорной СМПД (2). Первоначально необходимо найти распределение квадрата СВ, распределенной по закону (2), а затем – распределение суммы случайных величин. Формулы для ФПВ квадрата СВ известны [7, 8]. Применение таких формул для СВ, распределенной по закону (2), дает следующий результат для случая отсутствия асимметрии:

$$f_1(z) = (2\pi z)^{-0,5} e^{-z/2} \left( j_2 \left( z^2 - 6z + 3 \right) / 24 + 1 \right).$$

ФПВ суммы одинаково распределенных СВ определяется N-мерной сверткой:  $f_{\Sigma}(x) = f(x) \otimes f(x) \otimes \dots \otimes f(x)$ . Для получения такой ФПВ необходимо перейти в область изображений  $f(x) \rightarrow U(w)$ , найти соответствующую степень и выполнить обратный переход к оригиналам:  $U^N(w) \rightarrow f_{\Sigma}(x)$ . Результат такого преобразования имеет следующий вид:

$$f_{n\chi^2}(y) = \begin{cases} 0, & y < 0 \\ f_{\chi^2}(y) \left( 1 + \sum_{k=1}^N j_2^k \sum_{r=0}^{2k} a_{kr} y^{2k-r} \right), & y \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $a_{kr} = const$ .

Вид ФПВ распределения (3) при негауссовом распределении исходных данных иллюстрируют рис. 3 и рис. 4.

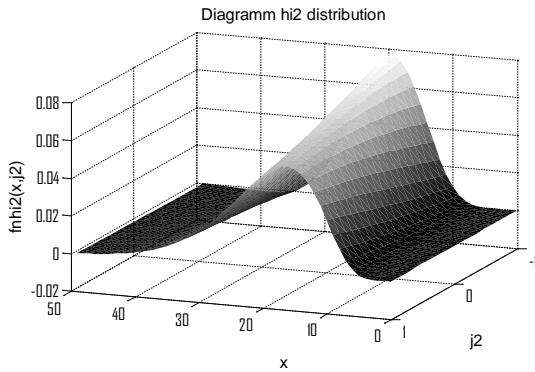


Рис. 3. ФПВ распределения (3) при N=20

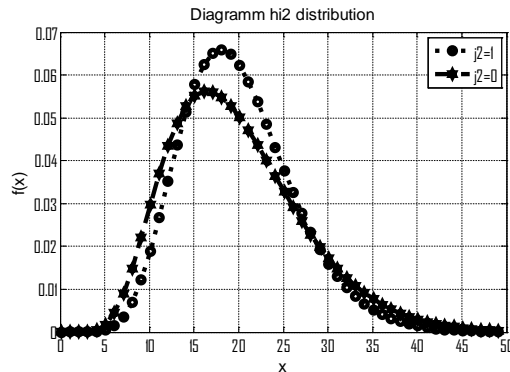


Рис. 4. ФПВ распределения (3) при j2=1

Для выполнения указанной процедуры в аналитическом виде использован пакет расширения Symbolic Toolbox системы MATLAB, содержащей ядро символьной математики MAPLE. Контроль корректности символьных преобразований осуществлялся одновременным выполнением указанной процедуры для нормального распределения. Как это следует из выполненного анализа, даже весьма умеренные отличия эксцесса от его значения для нормального распределения существенно смещают квантили распределения  $\chi^2$ . ФПВ распределения Стьюдента с  $N$  степенями свободы имеет следующий известный вид:

$$f_t(y) = \Gamma((N+1)/2)\Gamma^{-1}(N/2)(N\pi)^{-1} \left(1 + y^2/N\right)^{-(N+1)/2} \tag{4}$$

Типичная интерпретация распределения Стьюдента с  $N$  степенями свободы: этому распределению подчинено отношение

$$t = x_0 / \sqrt{\frac{1}{N} \left( \sum_{k=1}^N x_k^2 \right)}, \tag{5}$$

где  $x_0, x_1, \dots, x_N$  – взаимно независимые нормально распределенные СВ с центрами 0 и дисперсиями  $D_x = \sigma_x^2$ .

Такая интерпретация указывает путь для определения ФПВ при априорной СМПД (2). Первоначально необходимо найти распределение корня квадратного СВ, распределенной по закону (3), а затем распределение отношения двух СВ: распределенной по закону (2) и распределенной по закону корня квадратного СВ, распределенной по закону (3). Формулы для ФПВ указанных преобразований (функций СВ) известны [7]. Применение таких формул для СВ, распределенной по закону (2), дает возможность определить аналитический вид искомой ФПВ распределения Стьюдента, однако их сложность и громоздкость не позволяет привести их в рамках данной статьи. Вид указанной ФПВ при  $N=20$  представлен на рис. 5. Как это следует из результатов исследований и рис. 5, статистика Стьюдента остается симметричной, а смещение ее квантилей в диапазоне (0,9...0,95), представляющим интерес для практики, можно считать несущественным, так как уровни значимости изменяются на доли процента. Следовательно, в рамках ограничений СМПД (2), тесты, в которых используется статистика Стьюдента (оценка среднего, равенства средних в выборках и другие) не претерпевают существенных изменений

Выполнен анализ чувствительности к негауссовому распределению временных рядов алгоритмов коммулятивных сумм (АКС), статистики Хальда-Аббе и критерия Фишера. Симметричность исходного распределения обуславливает, как и следовало ожидать, высокую устойчивость АКС к эксцессу ПВ модели порождения данных (1). Для анализа свойств статистики Хальда-Аббе использован установленный в [2] факт ее статической эквивалентности критерию некоррелированности СВ и известная [7] связь указанного критерия со статистикой Стьюдента

$$t = \sqrt{N-2} \frac{r}{\sqrt{1-r^2}}, -1 < r < 1. \tag{6}$$

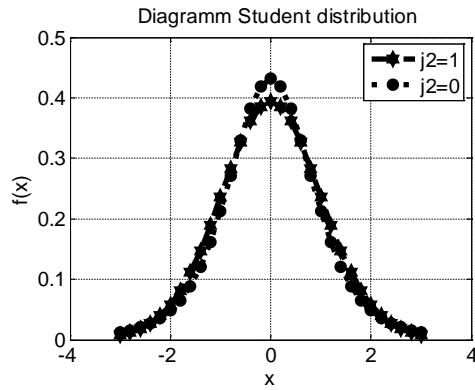


Рис. 5. ФПВ  $t$ -распределения

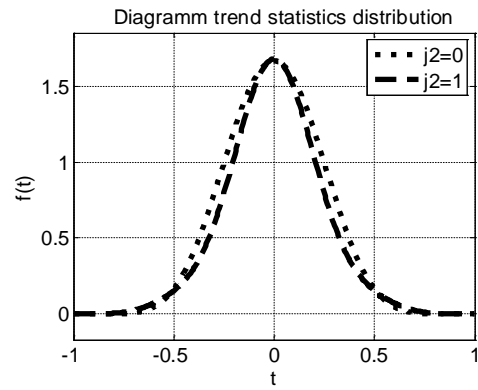


Рис. 6. ФПВ  $t$ -распределения (6)

Вычисления пороговых уровней для трендовой статистики Хальда-Аббе по полученным аналитическим выражениям согласно модели (2) показало высокую степень устойчивости исследуемой статистики к эксцессу распределения в области доверительных вероятностей 0,9...0,95 и числа степеней свободы (числа отсчетов ряда) более 20. Существенные различия возникают на уровнях 0,6...0,8 (Рис. 6), однако эта область не представляет практического интереса.

ФПВ распределения отношения дисперсий с  $N, M$  степенями свободы ( $v^2$ -распределение, связанное с ним распределение Фишера) имеет следующий вид:

$$f_z(z) = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ \left(\frac{N}{M}\right)^{N/2} \frac{\Gamma((N+M)/2)}{\Gamma(N/2)\Gamma(M/2)} z^{\frac{(N-2)}{2}} \left(1 + \frac{N}{M}z\right)^{-\frac{M+N}{2}}, & z \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Используя известные формулы для отношения двух СВ, распределенных по закону (3), удалось получить в аналитическом виде формулы для ФПВ при исходной модели (2). Сложность и громоздкость не позволяет привести их в рамках данной статьи. Вид указанной ФПВ при различном сочетании степеней свободы представлен на рис. 7 и рис. 8. Для распределения отношения дисперсий смещение квантилей является статистически значимым, особенно при значительном различии степеней свободы. Поэтому тесты, основанные на статистике Фишера и ее модификациях для выборок с моделью типа (2) могут сопровождаться потерей уровней значимости, достигающими 5% и более. В первую очередь это касается оценок равенства дисперсий и равенства средних при заданной дисперсии [7], а также трендового  $F$ -критерия [9].

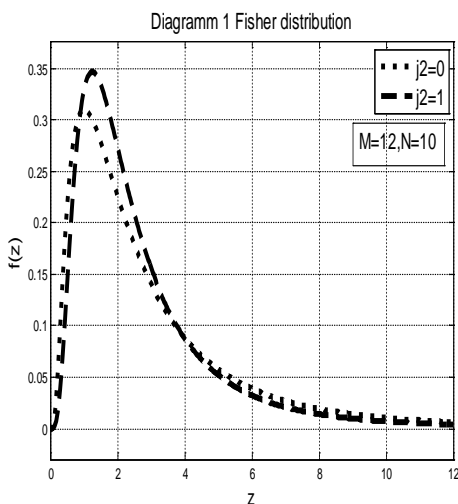


Рис. 7. ФПВ распределения отношения дисперсий

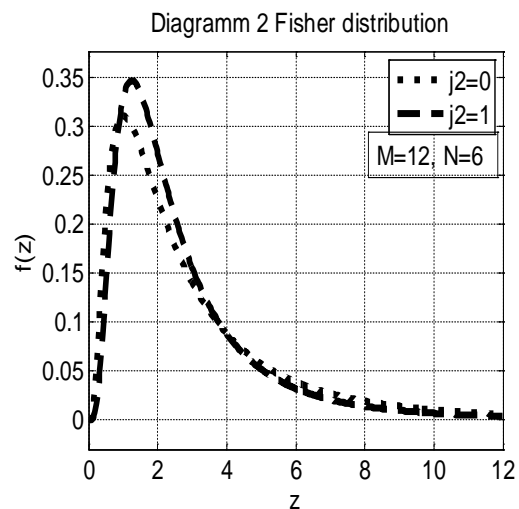


Рис. 8. ФПВ распределения отношения дисперсий

**Выводы**

Отличительной особенностью проведенного исследования является тот факт, что все интервальные и трендовые статистики для СМПД (2) получены с помощью пакета символьной математики в аналитическом виде, что позволяет выполнить их детальный анализ, необходимые расчеты и табулировать.

Отличие принятой априорной статистической модели порождения данных от фактически реализуемой приводит, в общем случае, к существенному смещению уровней значимости трендовых статистик и, как следствие, к снижению достоверности статистических выводов. Перспективы дальнейших исследований составляет усовершенствование СМПД в направлении приближения к условиям эксплуатации СЭУ.

**Список использованной литературы**

1. Куликов, Г.Г. Интеллектуальный контроль состояния авиационных ГТД / Г.Г. Куликов, П.С. Костенко, В.С. Фатиков, В.Ю. Арьков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2002. – Вып. 31. – С. 163-167.
2. Миргород, В.Ф. Особенности применения трендовых статистик при обработке данных в системах технической диагностики / В.Ф. Миргород, Г.С. Ранченко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – №4. – С. 25-27.
3. Новицкий, Л.В. Оценка погрешностей результатов измерений / Л.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л. Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
4. Епифанов, С.В. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.И. Богаенко. – К.: Техніка, 1998. – 312 с.
5. Миргород, В.Ф. Сравнительный анализ эффективности критериев тренда в задачах диагностирования ГТД / В.Ф. Миргород, Г.С. Ранченко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2005. – № 8/24 – С. 190-194.
6. Епифанов, С.В. Выбор эффективных критериев тренда для применения в алгоритмах параметрической диагностики / С.В. Епифанов, Б.А. Щербань, Ю.В. Черкасов // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2012. – № 8/95 – С.232-240.
7. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.
8. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 832 с.
9. Егоров И.В. Диагностирование технического состояния авиационных двигателей // Труды ЦИАМ "Научный вклад в создание авиационных двигателей". – М.: Машиностроение, 2000. – С. 651-688.
10. Hvozdeva, I. The Method of Trend Analysis of Parameters Time Series Gas-turbine Engine State / I. Hvozdeva, V. Myrhorod, Y. Derenh / 9th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences – AMiTaNS'17, AIP Conference Proceedings; 2017, 1895, pp. 030002-1-030002-9, DOI: 10.1063/1.5007361
11. Atamanyuk I. Method of polynomial predictive control of fail-safe operation of technical systems / I. Atamanyuk, Y. Kondratenko, V. Shebanin, V. Mirgorod // Proceedings of XIIIth The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics "CADSM 2015", 24-27 February 2015, Lviv–Poljana, pp. 248-251, DOI:10.1109/CADSM.2015.7230848

УДК 004.681.2.08

А.И. МИХАЛЕВ, А.Ю. ЗИМОГЛЯД, А.И. ГУДА, В.В. КОВТУН  
Национальная Металлургическая академия Украины**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
ПОКРЫТИЙ С УЧЕТОМ СКОРОСТИ НАПЫЛЕНИЯ**

*В настоящей работе исследуется новый способ формирования неоднородных структур, обладающих фрактальными свойствами на поверхности твердого тела, а также приводятся результаты исследования зависимости фрактальной размерности структуры от скорости нанесения.*

*Современный уровень развития технологий характеризуется использованием функциональных покрытий, обладающих заданным поверхностными свойствами. Важным свойством, определяющим множество параметров покрытия, является структура поверхности. При этом фрактальные структуры позволяют достигать значений параметров, недостижимых для структур с регулярным рельефом. На сегодняшний день фрактальные структуры широко применяются в электронике, оптике, медицине. Для образования фрактальных структур на поверхности твердого тела, применяются различные способы, например, поверхностная модификация материалов сильноточными электронными и ионными пучками, охлаждение подложки при нанесении, специально сконструированные магнетронные системы и т.п. В ходе эксперимента, было выявлено, что при низкой скорости испарения железа в вакууме, возможно получение неоднородной поверхности, проявляющей фрактальные свойства. Были приведены микрофотографии структур, а так же измерены их фрактальные размерности.*

*Исходя из этого, для получения функциональных покрытий, в основе которых лежат фрактальные структуры, имеет смысл применять данный метод получения этих структур. Управление скоростью нанесения возможно как путём регулирования температуры, так и заданием геометрических параметров установки для нанесения. При этом уменьшение скорости испарения приводит к образованию функциональных фрактальных покрытий.*

*Ключевые слова: тонкопленочные покрытия, фрактальные структуры, напыление пленок в вакууме.*

О.І. МИХАЛЬОВ, А.Ю. ЗИМОГЛЯД, А.І. ГУДА, В.В. КОВТУН  
Національна Металургійна академія України**МОДЕЛЮВАННЯ ФРАКТАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ З  
УРАХУВАННЯМ ШВИДКОСТІ НАПИЛЕННЯ**

*У даній роботі досліджується новий спосіб формування неоднорідних структур, які володіють фрактальними властивостями на поверхні твердого тіла, а також наводяться результати дослідження залежності фрактальної розмірності структури від швидкості нанесення.*

*Сучасний рівень розвитку технологій характеризується використанням функціональних покриттів, що володіють заданим поверхневими властивостями. Важливою властивістю, що визначає безліч параметрів покриття, є структура поверхні. При цьому фрактальні структури дозволяють досягати значень параметрів, недосяжних для структур з регулярним рельєфом. На сьогоднішній день фрактальні структури широко застосовуються в електроніці, оптиці, медицині. Для створення фрактальних структур на поверхні твердого тіла, застосовуються різні способи, наприклад, поверхнева модифікація матеріалів Потужноструміві електронними та іонними пучками, охолодження підкладки при нанесенні, спеціально сконструйовані магнетронні системи і т.п. В ході експерименту, було виявлено, що при низькій швидкості випаровування заліза в вакуумі, можливо отримання неоднорідної поверхні, яка проявляє фрактальні властивості. Були наведені мікрофотографії структур, а так само виміряні їх фрактальні розмірності.*

*Виходячи з цього, для отримання функціональних покриттів, в основі яких лежать фрактальні структури, має сенс застосовувати даний метод отримання цих структур. Управління швидкістю нанесення можливо як шляхом регулювання температури, так і завданням геометричних параметрів установки для нанесення. При цьому зменшення швидкості випаровування призводить до утворення функціональних фрактальних покриттів.*

*Ключові слова: тонкоплівкові покриття, фрактальні структури, напилення плівок в вакуумі.*

A.I. MIKHALYOV, A.Y. ZIMOGLYAD, A.I. GUDA, V.V. KOVTUN  
National Metallurgical Academy of Ukraine

**SIMULATION FRACTAL STRUCTURES OF FUNCTIONAL COATINGS WITH REGARD TO SPEED OF EVAPORATION**

*In this paper, we investigate a new method formation of heterogeneous structures with fractal properties on the surface of a solid, as well as the results of an investigation of the dependence of the fractal dimension of the structure on the deposition rate.*

*The modern level of technology development is characterized by the use of functional coatings that have specified surface properties. An important property that determines a set of parameters of a coating is the surface structure. At the same time, fractal structures allow one to achieve values of parameters that are unachievable for structures with a regular relief. To date, fractal structures are widely used in electronics, optics, medicine. For the formation of fractal structures on the surface of a solid, various methods are used, for example, surface modification of materials by high-current electron and ion beams, substrate cooling during deposition, specially designed magnetron systems, and like that. To assess the effect of the application parameters on the surface properties, a physical experiment was performed. In the course of the experiment, a thin layer of iron was deposited on the glass substrate. The method of application was thermal deposition in a vacuum. In the course of the experiment, it was found that at a low evaporation rate of iron in a vacuum, it is possible to obtain an inhomogeneous surface exhibiting fractal properties. The microphotographs of the structures were given, and their fractal dimensions were also measured.*

*Proceeding from this, to obtain functional coatings based on fractal structures, it makes sense to apply this method of obtaining these structures. The control of the application speed is possible both by controlling the temperature and by setting the geometric parameters of the application unit. In this case, a decrease in the evaporation rate leads to the formation of functional fractal coatings.*

*Keywords: thin film coatings, fractal structures, film spraying in a vacuum.*

**Постановка проблеми**

Современный уровень развития технологий характеризуется использованием функциональных покрытий, обладающих заданным поверхностными свойствами [6, 7]. Важным свойством, определяющим множество параметров покрытия, является структура поверхности. При этом фрактальные структуры позволяют достигать значений параметров, недостижимых для структур с регулярным рельефом. На сегодняшний день фрактальные структуры широко применяются в электронике, оптике, медицине.

Для образования фрактальных структур на поверхности твердого тела, применяются различные способы [1, 3], например, поверхностная модификация материалов высокоэнергетическими электронными и ионными пучками, охлаждение подложки при нанесении, специально сконструированные магнетронные системы и т.п.

**Цель исследования**

В настоящей работе исследуется новый способ формирования неоднородных структур, обладающих фрактальными свойствами на поверхности твердого тела, а также приводятся результаты исследования зависимости фрактальной размерности структуры от скорости нанесения.

**Изложение основного материала исследования**

Для оценки влияния параметров нанесения на свойства поверхности был поставлен физический эксперимент. В ходе эксперимента на стеклянную подложку наносился тонкий слой железа. Способом нанесения было выбрано термическое нанесение в вакууме. Нанесение производилось в вакуумном универсальном poste (ВУП-4) с использованием созданного приспособления для термического напыления в вакууме (рис. 1).

Целью проведения эксперимента было исследование влияния скорости нанесения материала на свойства получаемой структуры на подложке. Для регулировки скорости испарения металла в вакууме производилось управление током через нагреватель, что позволяло плавно регулировать температуру. Скорость испарения металла можно оценить, используя формулу Герца–Кнудсена (1):

$$V_{evap.} = 5.84 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{M}{T}} \cdot P. \tag{1}$$

Испарение железа производилось при максимально возможном вакууме для данной установки – 0.0133 Па. Воспользовавшись формулой средней длины свободного пробега молекул (2), оценим условия при нанесении покрытия:

$$\lambda = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot p} \tag{2}$$



Обеспечивались условия, при которых длина свободного пробега составила 80 см, а расстояние от тигля до подложки – 7 см. Подставив эти значения в уравнение Кнудсена (3), получим число большее 1, следовательно, можно не учитывать столкновение атомов между собой, а лишь соударения атомов металлов о поверхность стенок сосуда [8, 10]:

$$K_n = \frac{\lambda}{a}. \quad (3)$$

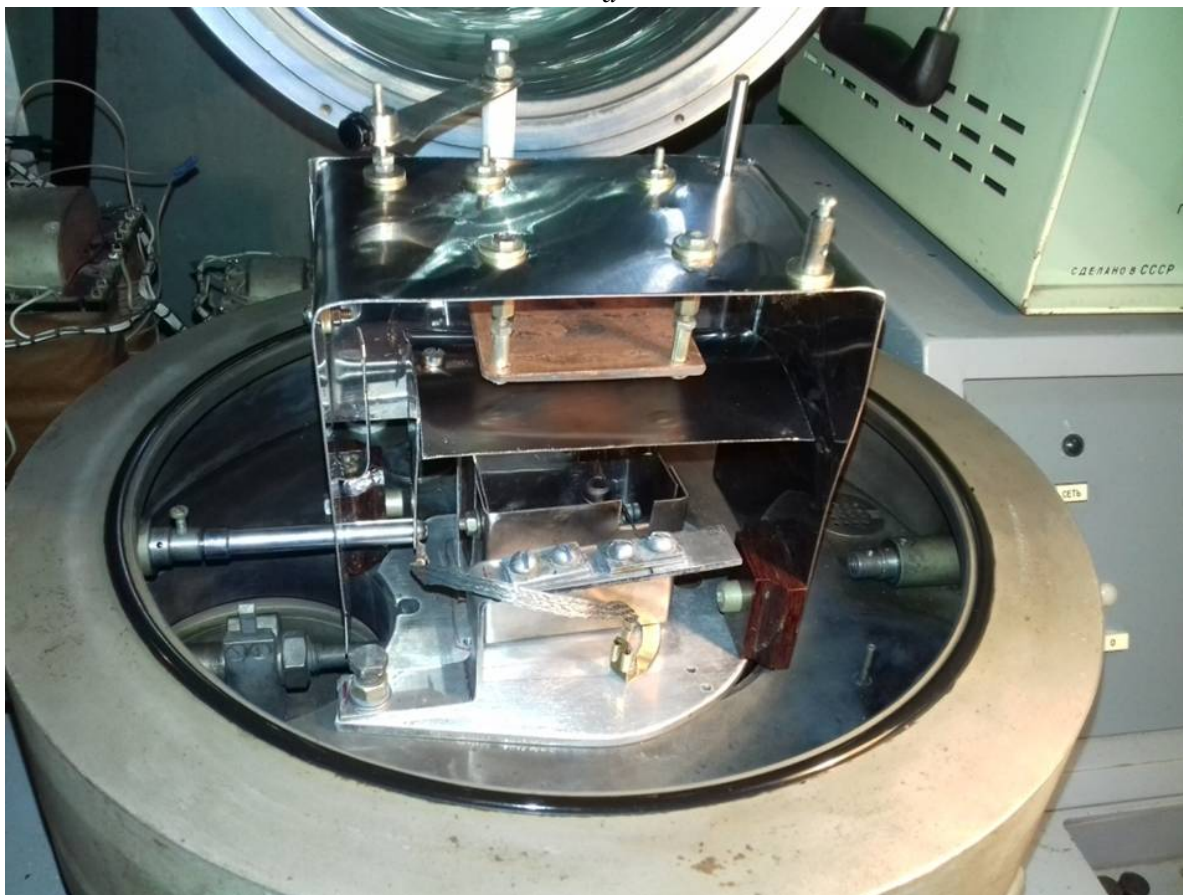


Рис. 1. Приспособление для термического напыления металла в вакууме

В ходе эксперимента ток через нагреватель сопротивлением 0.12 Ома изменялся от 8 до 20 А. Процесс нанесения для каждого образца занимал одинаковое время – 10 минут. Было исследовано 5 образцов. Скорость испарения железа из тигля изменялась от  $2.98 \cdot 10^{-6}$  до  $4.98 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ . Было выявлено, что при минимальной скорости испарения железа, с последующим нанесением на стеклянную подложку, проявляется матовая, неоднородная структура (рис. 2).

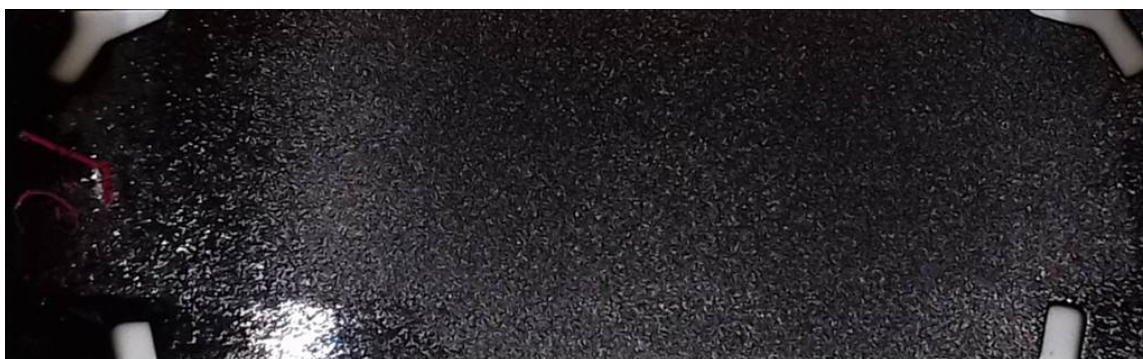


Рис. 2. Пленка железа, нанесенная на стеклянную подложку при минимальной скорости испарения

При большем же нагреве тигля, а следовательно, и большей скорости испарения, железо наносилось более однородно, в результате поверхность получалась зеркальной. При рассмотрении пленки, полученной

при минимальной скорости испарения в металлографическом иммерсионном микроскопе МИМ – 8М, была получена структура пленки (рис. 3).

Для фрактального анализа структуры пленки была применена ранее написанная программа Imghead, использующая алгоритм box-counting (рис. 4). Процедура обработки изображений на микрофотографиях состояла в следующем. Все растры, полученные с помощью специальной камеры с разрешением 2 Мп, для микроскопа, приводились к черно-белой шкале (проходили бинаризацию), а затем по уже полученному бинарному изображению проводилось измерение фрактальной размерности [6, 7].

Для проверки работоспособности программы и определения погрешности измерения были проведены измерения размерностей тестовых объектов: квадрата (=2), кривой Коха (=1.26), треугольника Серпинского (=1.58). Относительная погрешность измерений не превышает 0.1%.

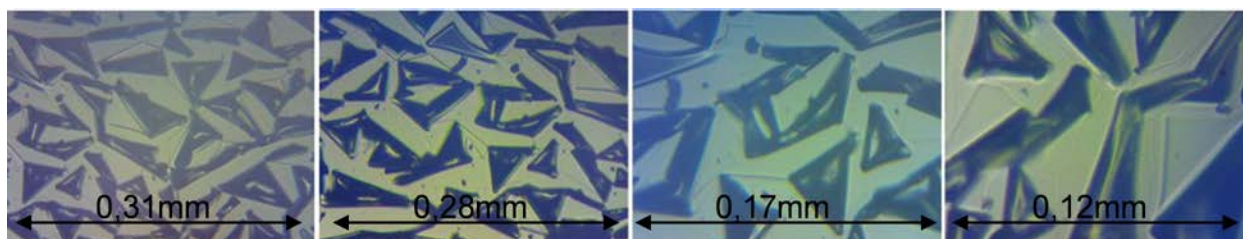


Рис. 3. Структура пленки в одной точке, с разным увеличением слева на право (5040 Pix/mm; 5690 Pix/mm; 9500 Pix/mm; 12860 Pix/mm)

Для каждой фотографии, с использованием разных масштабов проводилось измерение фрактальной размерности.

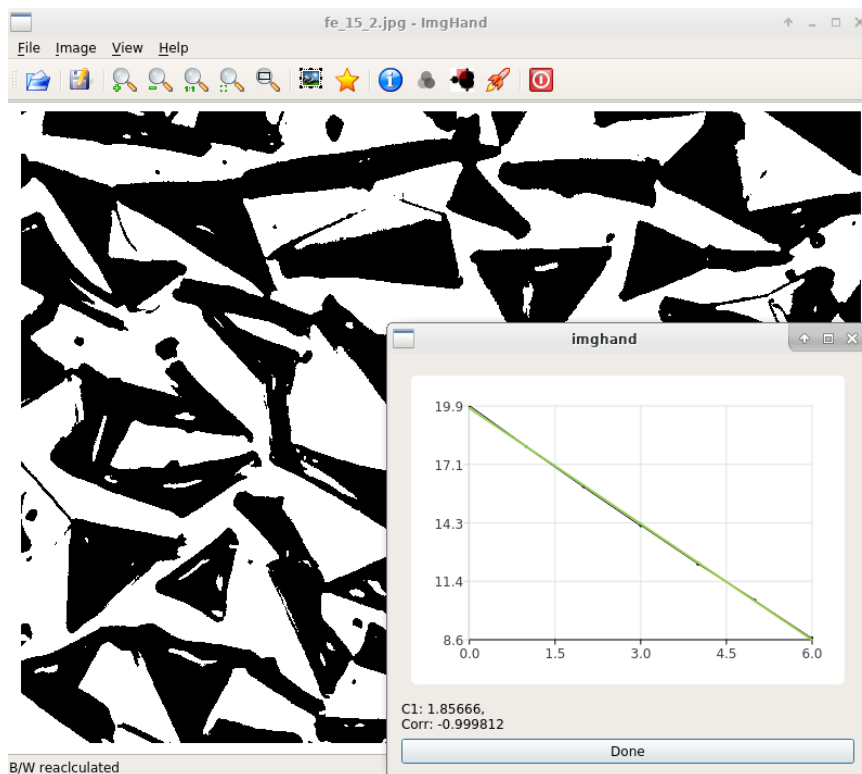


Рис. 4. Измерение фрактальной размерности изображения в программе Imghead

В результате обработки изображений были получены следующие величины фрактальной размерности: 1.86 при 5040 Pix/mm; 1.8659 при 5690 Pix/mm; 1.89886 при 9500 Pix/mm и 1.92682 при 12860 Pix/mm. Полученные значения размерностей весьма близки, и лишь на максимальном увеличении наблюдается существенное отклонение. Скорее всего, это вызвано меньшей глубиной резкости при применении объектива микроскопа с большим увеличением.

Поскольку структура поверхности пленки состояла преимущественно из треугольников, возник естественный вопрос о распределении значений их углов. Углы треугольных элементов на полученных структурах были измерены, и по измеренным значениям была построена гистограмма (рис. 5).

Анализ данной гистограммы позволяет сделать вывод, что, несмотря на ограниченность количества исходных данных, существуют значения углов, которые наиболее часто представлены в данной структуре, а

именно 32, 45, 50, 55, 72, 90, 108. Следует отметить, что значения, равные 32, 72, 108 градусов, имеют особое значение, так как эти углы являются золотыми, характеризующими золотое сечение (мозаика Пенроуза).

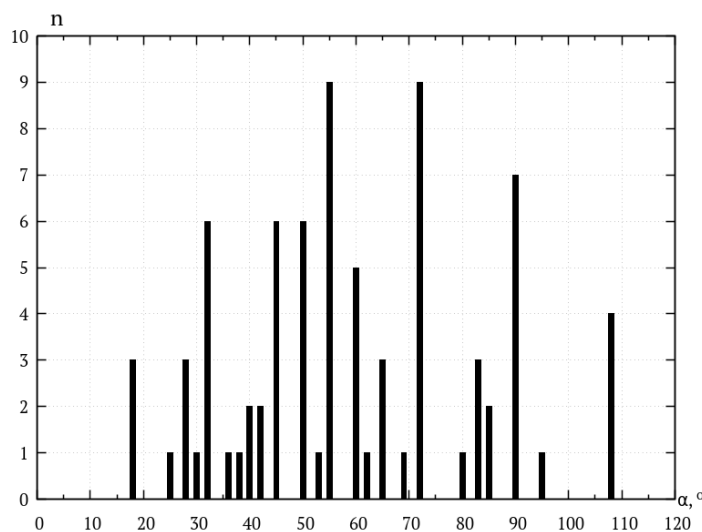


Рис. 5. Гистограмма распределения значений углов

#### Выводы

В ходе эксперимента, было выявлено, что при низкой скорости испарения железа в вакууме, возможно получение неоднородной поверхности, проявляющей фрактальные свойства. Были приведены микрофотографии структур, а так же измерены их фрактальные размерности.

Исходя из этого, для получения функциональных покрытий, в основе которых лежат фрактальные структуры, имеет смысл применять данный метод получения этих структур. Управление скоростью нанесения возможно как путём регулирования температуры, так и заданием геометрических параметров установки для нанесения. При этом уменьшение скорости испарения приводит к образованию функциональных фрактальных покрытий.

#### Список использованной литературы

1. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок / Б.С. Данилин. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 328 с.
2. Попов В.Ф. Процессы и установки электронно-ионной технологии/ В.Ф. Попов, Ю.Н. Горин — М.: Высш. шк., 1988. — 255 с.
3. Виноградов М.И. Вакуумные процессы и оборудование ионно- и электронно-лучевой технологии / М.И. Виноградов, Ю.П. Маишев. — М.: Машиностроение, 1989. — 56 с.
4. Mattox M. Donald. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control / M. Donald Mattox. — Westwood, N.J.: Noyes Publications, 1998. — 944 p.
5. Powell Vapor Deposition. The Electrochemical Society series / F. Carroll, H. Joseph, Oxley, J. M. Blocher. — New York: Wiley, 1966 — 158 p.
6. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. — М.: Наука, 1994. — 382 с.
7. Бунин И.Ж. Концепция фрактала в материаловедении / И.Ж. Бунин, А.Г. Колмаков, В.Г. Встовский, В.Ф. Тереньтєв // *Материаловедение*. — 1999. — № 2. — С. 19-26.
8. Антоненко С.В. Технология тонких пленок / С.В. Антоненко. — М.: МИФИ, 2008. — 104 с.
9. Шешин Е.П. Вакуумные технологии / Е.П. Шешин. — М.: Интеллект, 2009 — 504 с.
10. Миначев В.Е. Нанесение пленок в вакууме. Серия Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники, книга 6/ В.Е. Миначев. — М.: Высшая школа, 1989. — 110 с.
11. Розанов Л.Н. Вакуумная техника / Л.Н. Розанов. — М.: Высшая школа, 1990. — 320 с.

УДК 539.3

Р.П. МОСКАЛЕНКО

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

О.Л. ЗАЙДЕНВАРГ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"

О.В.ТИШКОВЕЦ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

О.О. СТРЕЛЬНИКОВА

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

### КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДОЛГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ГІДРОТУРБІННОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА НАЯВНІСТЮ ДЕФЕКТІВ ТИПУ ТРИЩИН

*Вивчено довговічність елементів проточної частини гідротурбін при наявності дефектів у вигляді ланцюжка тріщин під дією циклічного навантаження. Визначено кількість циклів навантаження, при якому тріщини підрастають до критичних розмірів, і відбувається руйнування. Для визначення критичної кількості циклів використана модифікована залежність Періса. Для елементів конструкції, ослаблених періодичною системою колінеарних тріщин, береги яких навантажені довільним навантаженням, що розтягує, отримано гіперсингулярне інтегральне рівняння щодо переміщень берегів тріщини. За розв'язанням цього рівняння обчислюється коефіцієнт інтенсивності напружень. Дана оцінка часу до руйнування для елементів конструкцій з тріщинами різної початкової довжини.*

*Ключові слова: тріщина, гіперсингулярне інтегральне рівняння, коефіцієнти інтенсивності напружень, довговічність.*

Р.П. МОСКАЛЕНКО

Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина

О.Л. ЗАЙДЕНВАРГ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский Авиационный Институт"

Е.В. ТЫШКОВЕЦ

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Е.А. СТРЕЛЬНИКОВА

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОТУРБИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ ТИПА ТРЕЩИН

*Изучена долговечность элементов проточной части гидротурбин при наличии дефектов в виде цепочки трещин под действием циклической нагрузки. Определено количество циклов нагружения, при котором трещины подрастают до критических размеров, и происходит разрушение. Для определения критического количества циклов использована модифицированная зависимость Периса. Для элементов конструкций, ослабленных периодической системой коллинеарных трещин, берега которых нагружены произвольной растягивающей нагрузкой, получено гиперсингулярное интегральное уравнение относительно перемещений берегов трещины. По решению этого уравнения вычисляется коэффициент интенсивности напряжений. Дана оценка времени до разрушения для элементов конструкций с трещинами различной начальной длины.*

*Ключевые слова: трещина, гиперсингулярное интегральное уравнение, коэффициенты интенсивности напряжений, долговечность.*

R. MOSKALENKO

V. N. Karazin Kharkov National University

O. ZAYDENVARG

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

E. TYSHKOVETS

The National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

E. STRELNIKOVA

A.N. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems

COMPUTER MODELING THE DURABILITY OF HYDROTURBINE EQUIPMENTS IN PRESENCE OF  
CRACK-LIKE DEFECTS

*The longevity of the turbines flow element in the presence of defects in crack chains under cyclic loadings is studied. Estimation of durability for flowing part elements of hydroturbines in presence of defects like a chain of cracks under cyclic loadings is accomplished. The fatigue life estimation consists of the number of cycles before the crack appearance and the number of cycles of crack propagation. The time of the crack to be of the critical size depends on the level of stress in the crack zone, its orientation relatively to stress direction, mechanical properties of the base metal, as well as the crack initial size (length and depth). This time is used to determine the durability of the structure and the terms of inter-repair periods. Taking into account that during operation the elements of hydroturbines are influenced by a number of factors associated with their work (corrosion, cavitation, erosion), note that the loading as well as stresses and deformations can not be determined by using simple analytic dependencies. With the developing advanced computational technologies and computers of new generation it became possible to elaborate reliable methods for evaluating the probability of defective elements destruction. The main purpose of this study is to develop a method for assessing the durability of structural elements in the presence of cracks under cyclically variable loads, which allows us to find out how many cycles are necessary for defects in the chain grow to the unacceptable sizes, as well as determining the critical size of initial defects. The number of load cycles is determined when the cracks grow to their critical sizes and destruction occurs. To determine that critical number of cycles, the modified Peric's dependence is used. A hypersingular integral equation for the crack displacements is obtained. The analytical solution of this equation is received. Using this solution the stress intensity factor included in the Peris criterion is calculated. The estimation of time before fracture for elements of structures with cracks of different initial length is given. Various cases have been studied: when cracks in the chain merge, and when cracks propagation does not occur.*

*Keywords: crack hypersingular integral equation, stress intensity factor, durability*

**Постановка проблеми**

Ще не так давно конструктори та інженери вважали, що наявність тріщин є неприпустимою в будь-якому відповідальному елементі конструкції. Проте, реальні матеріали завжди мають різні мікродфекти, які виникли або при виготовленні, або при експлуатації конструктивного елемента. Нові теоретичні дослідження в області розвитку втомних тріщин привели до зміни погляду на можливість роботи конструкції при наявності дефектів. Мова тепер йде про оцінку довговічності, працездатності, залишкового ресурсу елементів конструкцій з тріщинами. В даний час, коли велика частина енергетичного обладнання України практично вичерпала свій нормативний ресурс, проблеми оцінки залишкового ресурсу є особливо актуальними. В останні роки прийшло також розуміння того, що розвиток втомних тріщин є основною причиною катастрофічних руйнувань, серед яких зазначають аварії на залізничному транспорті, руйнування турбо- і гідрогенераторів, аварії літаків і вертольотів та ін. В гідротурбінах втомні тріщини мають тенденцію розташовуватися поблизу несучих поверхонь. Виникають вони внаслідок корозії, інтенсивних температурних і силових навантажень. Новоутворена тріщина починає повільно рости, навіть якщо додані навантаження не перевищують номінальних значень. Далі, якщо досягається критична довжина тріщини, несучий елемент раптово отримує величезну кількість кінетичної енергії, що призводить до катастрофічного руйнування всієї конструкції. Цим пояснюється великий інтерес до вивчення втомних тріщин в останнє десятиліття. Основна мета таких досліджень полягає в ретельному аналізі поведінки конструкції з тріщинами для запобігання їх небезпечного зростання і розробленні ефективної методики для раннього діагностування дефектів. Встановлення послідовності заміни застарілого гідротурбінного обладнання, визначення термінів міжремонтних періодів також вимагають ретельного вивчення поведінки конструкцій при наявності втомних тріщин. Беручи до уваги те, що в процесі експлуатації елементи гідротурбін підпадають під вплив ряду факторів, пов'язаних з їх роботою (корозія, кавітація, ерозія) відзначимо, що навантаження на елементи енергетичного обладнання, а також напруження і деформації в них не можуть бути визначені шляхом використання простих аналітичних залежностей. Іншими словами, поведінка енергетичного обладнання не може бути описана за допомогою якоїсь однієї математичної моделі. З розвитком сучасних обчислювальних методів і появою комп'ютерів нового покоління стало можливим розробити достовірні методики оцінки ймовірності руйнування конструкцій з дефектами. Стало можливим і дослідження тріщин різної конфігурації, ланцюжків тріщин, дефектів в околиці конструктивних вирізів, зовнішніх і внутрішніх несучих поверхонь конструктивних елементів. Втомна довговічність, що обумовлена числом циклів до руйнування при змінних напругах, складається з числа циклів до зародження тріщини і числа циклів її поширення. Час досягнення тріщиною критичних розмірів залежить від рівня напружень в зоні виникнення тріщини, її орієнтації по відношенню до діючих змінних напружень, механічних властивостей основного металу, а також від її розмірів (довжини і глибини). Цей час і служить для визначення довговічності конструкції і термінів міжремонтного періоду.



Задача полягає у визначенні часу (числа циклів  $N = N^*$ ), після закінчення якого тріщина підростає до критичного розміру, і відбувається руйнування елемента конструкції. Після проведення ремонтних робіт тріщини заварюють згідно відповідним нормативам [1]. За нормами приймання зварних швів гідротурбінного обладнання [1] дефекти з діаметром 3 мм і менше не враховуються. Фіксації підлягають дефекти з діаметром 4 мм і більше. Допускаються окремі дефекти з діаметром до 6мм включно, в кількості 20 дефектів на один зварний шов, а також ланцюжки дефектів з діаметром до 4 мм загальною протяжністю 300 мм на один зварний шов. Таким чином, виникла необхідність розв'язання такої задачі. Треба дослідити напружено-деформований стан (НДС) елемента проточної частини гідротурбіни і визначити зони найбільшої концентрації напружень. Далі слід розглянути задачу про зростання внутрішньої тріщини, яка спочатку мала розмір, відповідний нормам контролю, або практично нульовий, під дією навантаження, отриманого в результаті розрахунку НДС. Необхідно з'ясувати, за яку кількість циклів тріщина підросте до розміру, що перевищує допустимий за нормами контролю. Вважаються допустимими такі ланцюжки мікротріщин, в яких відстань між дефектами становить не менше 7 см [1]. Доцільно розглянути задачу про зменшення відстані між тріщинами в різних ланцюжках в процесі циклічного навантаження, тобто з'ясувати за яку кількість циклів дефекти в ланцюжку підростуть до неприпустимих розмірів. Необхідність дослідження таких ефектів диктується наявністю зварених тріщин. В роботі вивчено довговічність елементів проточної частини гідротурбіни, в яких проводилось зварювання. Вважаємо, що є ланцюжок мікротріщин, відстань між якими дорівнює 7 см. Як мікротріщини розглядаємо дефекти довжиною  $10^{-3}$ см.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

До теперішнього часу накопичений значний обсяг експериментальних і теоретичних досліджень щодо закономірностей росту тріщин під дією циклічно змінних навантажень [2–6]. Швидкість розвитку втомних тріщин зображають у вигляді залежності від силових або деформаційних факторів, довжини тріщини, механічних властивостей матеріалу. В даний час налічується більш 80 таких залежностей, що відрізняються числом використовуваних незалежних параметрів і констант, а також формою їх подання. Перші дослідники брали в якості основних параметрів, відповідальних за поширення втомної тріщини, номінальне значення прикладеного напруження і довжину тріщини. Залежності такого роду не могли претендувати на універсальність, оскільки в них ігнорувалося відмінність між номінальним і дійсним напруженнями, відповідальними за зростання тріщини. Довговічність елементів конструкцій з тріщинами вивчалась в роботах [5, 7–9]. В роботі [7] довговічність валу гідротурбіни з дефектами типу тріщин досліджено з використанням статистичних методів. Але залишаються нез'ясованими питання щодо навантажень та початкових розмірів дефектів, що призводять до швидкого розвинення втомних поодиноких тріщин та їх скупчень, й крихкого руйнування конструктивних елементів.

**Мета дослідження**

Головною метою цього дослідження є розроблення методу оцінки довговічності елементів конструкцій за наявності ланцюжків тріщин в умовах дії циклічно змінних навантажень, що дозволяє з'ясувати, за яку кількість циклів дефекти в ланцюжку підростуть до неприпустимих розмірів, а також визначити критичні розміри початкових дефектів.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Для визначення кількості циклів до руйнування використана модифікована залежність Періса [8], в якій застосовані різні співвідношення для різних діапазонів зміни коефіцієнта інтенсивності напружень. Ця залежність подана формулою

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} 10^{-20} & \Delta K < \Delta K_{th} \\ C(\Delta K - \Delta K_{th})^m & \Delta K_{th} < \Delta K < K_{1C} \\ 10^3 & \Delta K > K_{1C} \end{cases}$$

Тут  $a$  – характерний розмір дефекту, наприклад довжина або радіус ( $da$  – зміна довжини);  $N$  – кількість циклів до руйнування;  $\Delta K_{th}$  – поріг втоми;  $K_{1C}$  – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень;  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ ,  $K_{max}$ ,  $K_{min}$  – максимальний і мінімальний коефіцієнти інтенсивності напружень за один цикл навантаження;  $m$  – показник ступеня кривої втоми;  $C$  – характерна константа кривої втоми.

У подальших розрахунках прийнято, що між максимальним та мінімальним навантаженнями в циклі має місце таке співвідношення  $\sigma_{max} = \sigma_{min}$ . Тому внаслідок пропорційності коефіцієнтів інтенсивності напружень діючому навантаженню отримаємо такий вираз для перепаду коефіцієнта інтенсивності напружень:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = 2K_{max}$$

Сформулюємо задачу визначення числа циклів до руйнування елемента конструкції, ослабленого ланцюжком тріщин (рис. 1). Саме такі дефекти вважаються найбільш небезпечними [1, 7].

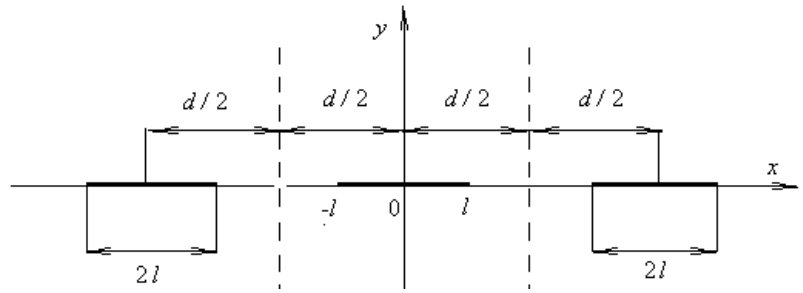


Рис.1. Періодична система тріщин в елементі конструкції

Досліджено елемент конструкції з періодичною системою колінеарних тріщин, береги яких навантажені довільним несамоврівноваженим розтягуючим навантаженням  $p$ . В цьому випадку отримано гіперсингулярне інтегральне рівняння, що описує поведінку системи тріщин [9, 10]

$$\int_{-l}^l \Gamma(x) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{(x-x_0-kd)^2} dx = p(x_0); p(x_0) = \frac{1}{2}(\sigma_y^+ + \sigma_y^-) / M; M = -\frac{\mu(\lambda + \mu)}{\pi(\lambda + 2\mu)}. \quad (1)$$

Тут  $\lambda, \mu$  – коефіцієнти Ламе,

$$p = p(x_0) = \frac{1}{2}(\sigma_y^+ + \sigma_y^-) / M.$$

Ядро цього гіперсингулярного рівняння можна подати у вигляді [9]:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{(x-x_0-kd)^2} = \frac{\pi^2}{d^2 \sin^2 \pi((x-x_0)/d)}.$$

Тоді (1) приймає форму:

$$\frac{1}{4\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} \Gamma(\varphi) \frac{d\varphi}{\sin^2 \frac{\varphi - \varphi_0}{2}} = p_1(\varphi_0),$$

де  $\alpha = \frac{2\pi l}{d}$ ;  $p_1(\varphi_0) = 2dp(x_0)$ ;  $\frac{l}{d} < \frac{1}{2}$ , і містить особливість типу Адамара [10].

Рівняння (2) перетворимо таким чином

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} \Gamma'(\varphi) \operatorname{ctg} \left( \frac{\varphi - \varphi_0}{2} \right) d\varphi = p_1(\varphi_0).$$

Зробивши заміну змінних:

$$\eta = \operatorname{tg}(\varphi/2); \quad y = \operatorname{tg}(\varphi_0/2); \quad a = \operatorname{tg} \frac{\pi d}{d}; \quad p_2(y) = p_1(\varphi_0),$$

отримуємо

$$\Gamma'(y) = -\frac{1}{\sqrt{a^2 - y^2}} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{a^2 - \eta^2} p_2(\eta)}{(1 + \eta^2)(\eta - y)} d\eta.$$

Після інтегрування отримуємо, що розв'язок рівняння (1) має вигляд:

$$\Gamma(\varphi) = p \ln \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\pi d/d)} - \sqrt{\operatorname{tg}^2(\pi d/d) - \operatorname{tg}^2(\varphi/2)}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\pi d/d)} + \sqrt{\operatorname{tg}^2(\pi d/d) - \operatorname{tg}^2(\varphi/2)}}. \quad (2)$$

Для коефіцієнта інтенсивності напружень з використанням формули (2) в [9] отримано такий вираз:

$$k_1 = p \sqrt{\frac{d}{\pi} \operatorname{tg} \frac{\pi d}{d}}.$$

Тут  $d, l$  – це відстань між центрами тріщин в ланцюжку і напівдовжина тріщини (рис. 1). Число циклів до руйнування визначено інтеграцією співвідношення Періса:

$$dN = \frac{1}{C} (\Delta K - \Delta K_{th})^{-m} da; \quad \Delta K_{th} < \Delta K < K_{1C}.$$

Відзначимо, що при  $\Delta K < \Delta K_{th}$  тріщини не розвиваються, а при  $\Delta K_{th} > K_{1C}$  відбувається лавиноподібний розвиток тріщин, що призводить до руйнування досліджуваного елемента конструкції.

Нехай напівдовжина тріщини змінюється в межах  $(l + 0.99d/2)$ . Такі межі інтегрування за змінною  $a$  відповідають випадку, коли тріщини в ланцюжку практично злилися, і конструкція зруйнувалася. Маємо формулу для числа циклів до руйнування:

$$N = \frac{1}{C} \int_l^{0.99 \cdot d/2} (\Delta K - \Delta K_{th})^{-m} dl, \quad \Delta K = 2k_1 = 2p \sqrt{\frac{d}{\pi} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{d}}.$$

Вважалось, що елемент конструкції піддано дії циклічного навантаження з амплітудним значенням  $p$  і частотою  $\omega$ .

Прийняті такі сталі матеріалу  $C=3.2 \cdot 10^{-11}$ ;  $m = 3.09$ ;  $K_{1C} = 31$  МПа  $\sqrt{m}$ ;  $\Delta K_{th} = 7.4$  МПа  $\sqrt{m}$ . Виконано два розрахунки для різних геометричних параметрів ланцюжків.

Для першого розрахунку  $d = 0.07$  м; частота обертання дорівнює  $\omega = 3.42$  Гц;  $p = 4.28$  МПа. У цих умовах:

$$\Delta K = 2k_1 \approx 1.3 < \Delta K_{th} = 7.4,$$

і тріщини не розвиваються. Цей висновок повністю відповідає технічним вимогам [1].

Для другого розрахунку приймаємо, що  $l = 0.03$  м;  $d = 0.07$  м;  $p = 42.8$  МПа. Доведено, що в цих умовах  $l > 0.0085$ , і починається розвиток тріщин, при цьому

$$\int_l^{0.99 \cdot d/2} (\Delta K - \Delta K_{th})^{-m} dl \approx 0.011,$$

що відповідає кількості циклів  $3.37 \cdot 10^8$ , а це означає, що довговічність конструкції з вказаною ланцюжком тріщин складає  $\approx 3.2$  роки. Такий розрахунок служить обґрунтуванням термінів міжремонтних періодів.

#### Висновки

Розроблено метод оцінки довговічності елементів конструкцій за наявності ланцюжків тріщин в умовах дії циклічно змінних навантажень. Метод засновано на використанні гіперсингулярних інтегральних рівнянь для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень. Методика дозволила з'ясувати, за яку кількість циклів дефекти в ланцюжку підростуть до неприпустимих розмірів за нормами технічного контролю. Такі розрахунки необхідно проводити для визначення тривалості міжремонтних і міжоглядових періодів. Отримані дані свідчать про обґрунтованість рекомендацій та технічних вимог до зварних швів в гідравлічних турбінах

#### Список використаної літератури

1. Веремеєнко И.С. Комплексный экспериментально-теоретический анализ ресурса закладных частей гидротурбины / И.С. Веремеєнко, Б.Я. Кантор, Т.Ф. Медведовская, Е.А. Стрельникова, О.Н. Зеленская, С.В. Гладышев // Проблемы машиностроения. – 2000. – № 1. – С. 16-28.
2. Панасюк В.В. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, С.Е. Ковчик. – К.: Наукова думка, 1971. – 278 с.
3. Андрейкив А.Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций / А.Е. Андрейкив, А.И. Дарчук. – К.: Наукова думка, 1987. – 404 с.
4. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1993. – 364 с.
5. Lessenden S.J. Torsion response of cracked steel shaft / S.J. Lessenden, S.P. Pissot, M.V. Tretheway, K.P. Naynaed. // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2006. – Vol. 30. – P. 734-747.
6. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на усталостную прочность / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
7. Стрельникова Е.А. Вероятностная оценка долговечности вала гидротурбины при наличии трещин / Е.А. Стрельникова, И.Г. Сирота, А.В. Линник, Л.А. Калембет, В.Н. Зархина, О.Л. Зайденварг // Проблемы машиностроения. – 2017. – Т. 20. – № 1. – С. 28-35.
8. Zaydenvarg O. Boundary Hypersingular Integral Equations in Heat Transfer Problem of 2D Cracked Body / Olga Zaydenvarg, Elena Strelnikova // Advances in Boundary Element Technique (Athens, Greece, April 30-May 4, 2012). – Athens, 2012. – P. 289-294.
9. Зайденварг О.Л. Гиперсингулярные уравнения в задачах прочности элементов конструкций с трещинами при температурном нагружении / О.Л. Зайденварг, Е.А. Стрельникова // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2009. – № 11. – С. 191-196.
10. Стрельникова Е.А. Гиперсингулярные интегральные уравнения в двумерных краевых задачах для уравнения Лапласа и уравнений Ламе / Е.А. Стрельникова // Доп. НАН України. – 2001. – № 3. – С. 27-31.



УДК 532.3

Т.М. НИКУЛИНА, А.М. НИКУЛИНА, О.Г. ГОМАН  
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара**УДАР КРУГЛОГО ТЕЛА О ПОВЕРХНОСТЬ ИДЕАЛЬНОЙ  
НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ**

*В работе рассматривается задача в плоской постановке об ударе круглого тела о поверхность идеальной несжимаемой жидкости, не имеющей границ. Тело частично погружено в жидкость, а его погруженная часть имеет форму кругового сегмента. В некоторый момент времени происходит удар, после чего тело мгновенно получает поступательную скорость и вращательную скорость вокруг оси, перпендикулярной плоскости, в которой рассматривается течение. С помощью конформного отображения, переводящего область полуплоскости с вырезанным сегментом в полуплоскость, данная задача сводится к смешанной задаче Кельдыша-Седова для верхней полуплоскости, решение которой известно в квадратурах. Таким образом, была решена ударная краевая задача со смешанными граничными условиями. Был найден комплексный потенциал жидкости после удара, а также потенциал скорости жидкости на участке соприкосновения тела с жидкостью. Полученные результаты проанализированы в случаях влияния на жидкость со стороны тела только одной компоненты скорости, либо всех трех компонент. Также результаты были проиллюстрированы для различных углов погруженного сегмента и проведено сравнение с результатами для плавающей пластинки. Показано, что после удара жидкость может начать двигаться безотрывно, однако, при некоторых значениях скорости тела может возникать отрыв жидкости от поверхности тела. Об этом свидетельствует тот факт, что значение потенциала на некоторой части поверхности тела становится больше нуля. На этом участке как раз и будет находиться точка отрыва. В таком случае полученные решения уже использовать нельзя и следует рассматривать задачу с учетом возникновения зоны отрыва. В случае воздействия со стороны тела только вертикальной компоненты скорости при углах сегмента меньше  $90^\circ$  отрыв жидкости от поверхности тела возникать не будет.*

*Ключевые слова:* несжимаемая жидкость, ударная задача, задача Кельдыша-Седова, конформное отображение, комплексный потенциал.

Т.М. НИКУЛИНА, А.М. НИКУЛИНА, О.Г. ГОМАН  
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара**УДАР КРУГЛОГО ТІЛА О ПОВЕРХНЮ ІДЕАЛЬНОЇ НЕСТИСЛИВОЇ РІДИНИ**

*У роботі розглядається задача в плоскій постановці про удар круглого тіла об поверхню ідеальної нестисливої рідини, яка не має границь. Тіло частково занурене в рідину, а його занурена частина має форму кругового сегмента. В певний момент часу відбувається удар, після чого тіло миттєво отримує поступальну швидкість і обертальну швидкість навколо осі, перпендикулярної площині, в якій розглядається течія. За допомогою конформного відображення, що переводить область півплощини з вирізаним сегментом в півплощину, дана задача зводиться до змішаної задачі Кельдиша-Седова для верхньої півплощини, розв'язок якої відомо в квадратурах. Таким чином, була розв'язана ударна крайова задача зі змішаними граничними умовами. Був знайдений комплексний потенціал рідини у мить, що слідує безпосередньо після удару, а також потенціал швидкості рідини на ділянці дотику тіла з рідиною. Отримані результати проаналізовані у випадках впливу на рідину з боку тіла тільки однієї компоненти швидкості, або всіх трьох компонент. Також результати були проілюстровані для різних кутів зануреного сегмента і проведено порівняння з результатами для плаваючої пластинки. Показано, що після удару рідину може почати рухатися безвідривно, однак, при деяких значеннях швидкості тіла, може виникати відрив рідини від поверхні тіла. Про це свідчить той факт, що значення потенціалу на деякій частині поверхні тіла стає більше нуля. На цій ділянці якраз і буде знаходитися точка відриву. В такому випадку отримані розв'язки вже не можуть бути використані і слід розглядати задачу з урахуванням утворення зони відриву. У разі впливу з боку тіла тільки вертикальної компоненти швидкості при кутах сегмента менше  $90^\circ$  відрив рідини від поверхні тіла виникати не буде.*

*Ключові слова:* нестислива рідину, ударна задача, задача Кельдиша-Седова, конформне відображення, комплексний потенціал.

T.M. NIKULINA, A.M. NIKULINA, O.H. HOMAN  
 Dnipro national university named Oles Honchar

**ROUND BODY IMPACT ON THE SURFACE OF THE IDEAL INCOMPRESSIBLE LIQUID**

In this article the problem about the impact of a circular body on the surface of an ideal incompressible fluid that does not have boundaries is considered in a plane statement. The body is partially submerged in the liquid, and its submerged part has the shape of a circular segment. At some point in time a shock occurs, after which the body instantaneously receives translational velocity and rotational velocity about an axis that is perpendicular to the plane of flow. Using a conformal mapping that maps a half-plane domain with a cut segment into a half-plane, this problem reduces to a mixed Keldysh-Sedov problem for the upper half-plane, the solution of which is known in quadratures. In this way, the shock boundary value problem with mixed boundary conditions has been solved. The complex potential of the liquid flow after the impact has been found, as well as the potential of velocity of the liquid at the site of contact between the body and the liquid. The results obtained has been analyzed in cases of influence on the liquid from the body side of only one velocity component, or all three components. In addition, the results has been illustrated for different angles of the submerged segment and compared with the results for a floating plate. It is shown that the fluid flow can move around the body without interruption after the impact. However, at certain values of the velocity of the body, liquid can detach from the body. This is evidenced by the fact that the value of the potential on some part of the surface of the body becomes greater than zero. On this site just would be the point of separation. In this case, the obtained solutions can not already be used and the problem should be considered taking into account the occurrence of the separation zone. In the case of the impact on the part of the body only the vertical component of the velocity at segment angles of less than 90°, separation of the liquid from the surface of the body will not occur.

Keywords: incompressible fluid, shock problem, Keldysh-Sedov problem, conformal mapping, complex potential.

**Постановка задачи**

В задаче рассматривается ударное взаимодействие тела, плавающего на поверхности неограниченной идеальной несжимаемой жидкости. Задача рассматривается в плоской постановке, а часть тела, погруженная в жидкость, имеет форму сектора. Тело частично погружено в жидкость, ширина погруженной части равна  $2a$ , угол между поверхностью жидкости и касательной к сектору в точке  $A$  равен  $\alpha$  (рис. 1). Пусть в некоторый момент времени происходит удар, после чего тело мгновенно получает вертикальную скорость  $V$ , горизонтальную скорость  $U$  и вращательную скорость  $\omega$  вокруг оси, перпендикулярной плоскости, в которой рассматривается течение. Требуется найти поле скоростей жидкости непосредственно после удара.

В рассматриваемой задаче удобно расположить систему координат так, чтобы жидкость находилась в верхней полуплоскости (рис.1).

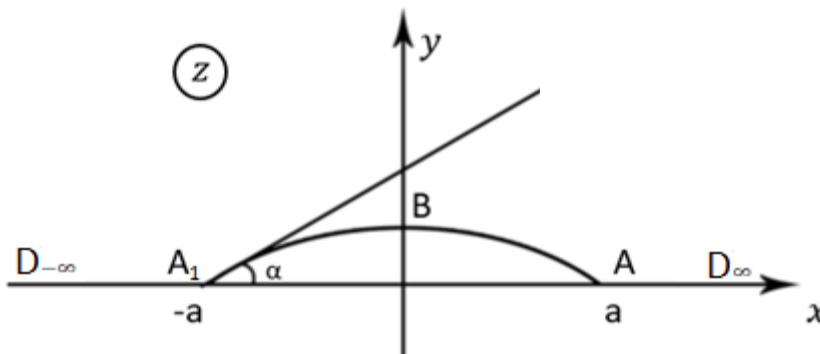


Рис.1. Схема к постановке задачи

**Анализ последних исследований и публикаций**

Теория гидродинамического удара относится к классическим задач механики жидкости. Исследования ударных задач в общей постановке были проведены в работах [1, 3, 4, 7]. Более подробно ударная задача была рассмотрена в [5] для случая взаимодействия множества плоских пластин с поверхностью жидкости. В работе [2] рассмотрено взаимодействие наклонной плоской пластины, частично погруженной в жидкость. В работе [6] также приведено рассмотрение гидродинамических ударных задач, в частности, краевых задач со смешанными граничными условиями.

**Формулировка цели исследования**

Задачи удара тела о жидкость часто встречаются на практике: именно к такому типу сводятся проблемы определения силового взаимодействия воды с поверхностями гидросамолетов, космических летательных аппаратов при их посадке на воду, взаимодействия воды с днищами судов. Также ударные задачи взаимодействия жидкости и скоростного проникающего тела возникают в различных технологиях при термической обработке, охлаждении и тому подобное.

Однако, до настоящего времени теоретические методы решения задач указанного типа продолжают совершенствоваться по причине того, что удар может происходить с отрывом жидкости от поверхности тела в одной или нескольких зонах, или без отрыва. С возникновением указанных зон, положение которых заранее неизвестно, задача становится нелинейной и существенно усложняется – именно с преодолением этих трудностей связано развитие современных аналитических и численных методов. Определение местоположения зоны или зон отрыва принципиально важно для корректного определения присоединенных масс жидкости к телу при ударе.

**Изложение основного материала исследования**

Как известно, решение ударной краевой задачи описывается комплексным потенциалом  $w$  или характеристической функцией

$$\chi = -iw = \psi - i\varphi,$$

для определения которой имеем следующие граничные условия: на участках свободной границы  $D_{-\infty}A$  и  $AD_{\infty}$  задана функция  $\varphi = 0$ ; а на поверхности тела  $A_1BA$  задана функция  $\psi(z) = Uy - Vx - \frac{\omega}{2}(x^2 + y^2)$ . Таким образом, имеем смешанную задачу Келдыша-Седова.

Для задачи Келдыша-Седова имеется решение в виде квадратур для верхней полуплоскости. Чтобы им воспользоваться, нужно совершить такое конформное отображение, чтобы верхняя полуплоскость с лункой в физической области  $z = x + iy$  отобразилась на верхнюю полуплоскость области  $\zeta = \xi + i\eta$ . При чем должно соблюдаться соответствие такое, что точка  $z = a$  переходит в точку  $\zeta = 1$ , точка  $z = -a$  переходит в  $\zeta = -1$ , точка  $z = B$  переходит в  $\zeta = 0$ , а точка  $z = \infty$  переходит в  $z = \infty$  (рис. 2).

Указанное конформное отображение будет иметь вид:

$$\zeta(z) = \frac{(z + a)^{\frac{\pi}{\pi-\alpha}} + (z - a)^{\frac{\pi}{\pi-\alpha}}}{(z + a)^{\frac{\pi}{\pi-\alpha}} - (z - a)^{\frac{\pi}{\pi-\alpha}}}.$$

Для обратного преобразования имеем формулу:

$$z(\zeta) = a \frac{(\zeta + 1)^{\frac{\pi-\alpha}{\pi}} + (\zeta - 1)^{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}}{(\zeta + 1)^{\frac{\pi-\alpha}{\pi}} - (\zeta - 1)^{\frac{\pi-\alpha}{\pi}}}.$$

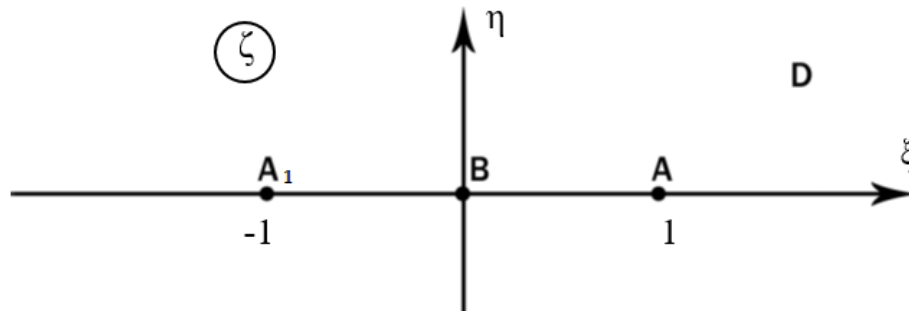


Рис. 2. Область параметрического переменного

Переформулированная задача Келдыша-Седова для верхней полуплоскости имеет следующую постановку. Определить функцию  $\chi(z(\zeta))$  при  $Im \zeta > 0$  с такими граничными условиями: на образе свободной поверхности  $\varphi = 0$  при  $-\infty < \xi < -1$  и  $1 < \xi < \infty$ ,  $\eta = 0$ ; а на образе поверхности тела  $\psi(z(\zeta)) = \psi(\zeta)$  при  $-1 < \xi < 1$ ,  $\eta = 0$ .

Применяя формулу конформного отображения, окончательно получим:

$$\psi(\xi) = \frac{a}{F^2 + 2F\cos\alpha + 1} (-V(F^2 - 1) + 2F\sin\alpha(U + a\omega ctg\alpha)) - \frac{a^2\omega}{2};$$

при  $\xi \in (-1; 1)$ ;  $\eta = 0$ ;

где

$$F = \left( \frac{1 + \xi}{1 - \xi} \right)^{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}.$$

Решение задачи Келдыша-Седова для плоскости  $\zeta$  имеет вид:

$$\chi(\zeta) = -iw = \psi - i\varphi = \frac{-1}{\pi} \sqrt{\zeta^2 - 1} \int_{-1}^1 \frac{\psi(t)}{\sqrt{1 - t^2} t - \zeta} dt.$$

По формуле Сохоцкого [1] найдем, чему равен интеграл на верхней стороне отрезка  $-1 < \xi < 1$ :

$$\chi^+ = \psi(\xi) - \frac{i}{\pi} \sqrt{1 - \xi^2} \int_{-1}^1 \frac{\psi(t)}{\sqrt{1 - t^2} t - \xi} dt.$$

В этой области функция  $\psi$  задана граничными условиями, следовательно, остальная часть формулы есть функция  $-i\varphi$ , откуда для значения потенциала на поверхности тела в переменных  $\zeta$  имеем выражение:

$$\varphi(\xi) = \frac{1}{\pi} \sqrt{1 - \xi^2} \int_{-1}^1 \frac{\psi(t)}{\sqrt{1 - t^2} t - \xi} dt.$$

Данный интеграл является интегралом типа Коши, который следует понимать в смысле его главного значения. Для определения потенциала скорости  $\varphi$  воспользуемся следующим алгоритмом вычисления интеграла Коши в смысле главного значения [1].

$$\varphi(\xi) = \frac{1}{\pi} \sqrt{1 - \xi^2} \left( \int_{-1}^1 \left( \frac{\psi(t)}{\sqrt{1 - t^2}} - \frac{\psi(\xi)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right) \frac{dt}{t - \xi} + \frac{\psi(\xi)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \ln \frac{1 - \xi}{1 + \xi} \right).$$

Согласно общим положениям теории присоединенных масс [7], имеем следующие формулы для  $\varphi(\xi)$ :

$$\varphi(\xi) = \varphi_1 U + \varphi_2 V + \varphi_6 \omega,$$

где

$$\varphi_1 = 2a\overline{\varphi_1}, \quad \varphi_2 = 2a\overline{\varphi_2}, \quad \varphi_6 = (2a)^2\overline{\varphi_6};$$

$$\overline{\varphi_1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1 - \xi^2} \int_{-1}^1 \frac{2F(t) \sin \alpha}{F(t)^2 + 2F(t) \cos \alpha + 1} \frac{1}{\sqrt{1 - t^2} t - \xi} dt;$$

$$\overline{\varphi_2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1 - \xi^2} \int_{-1}^1 \frac{F^2 - 1}{F(t)^2 + 2F(t) \cos \alpha + 1} \frac{1}{\sqrt{1 - t^2} t - \xi} dt;$$

$$\overline{\varphi_6} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{1 - \xi^2} \int_{-1}^1 \left( \frac{2F(t) \cos \alpha}{F(t)^2 + 2F(t) \cos \alpha + 1} - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{\sqrt{1 - t^2} t - \xi} dt;$$

$$F(\xi) = \left( \frac{1 + \xi}{1 - \xi} \right)^{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}.$$

#### Анализ результатов

Таким образом, найдено значение потенциала течения на теле, откуда можно найти импульсное давление, действующее на элементы поверхности тела со стороны жидкости. Импульсное давление с точностью до произвольной постоянной равно:

$$P_t = -\rho\varphi.$$

На рис. 3, 4, 5, 6 представлені результати значень безрозмірних функцій  $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_6$  для сегментів тела с різними кутами  $\alpha$  в залежності від безрозмірної координати  $\bar{x} = x/a$ , где  $x$  – абсцисса точки на поверхні сектора.

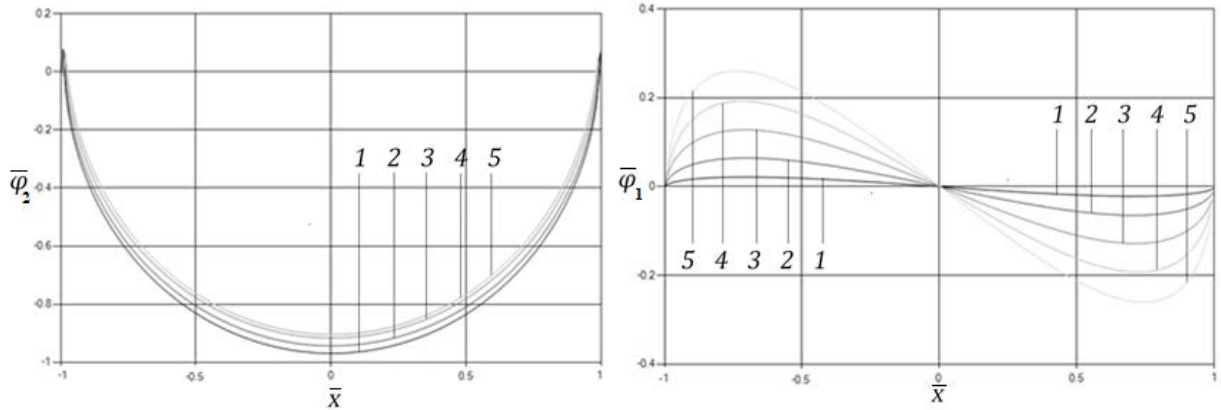


Рис. 3. Влияние вертикальной компоненты скорости  $V$ :  
1 –  $\alpha=5^\circ$ ; 2 –  $\alpha=15^\circ$ ; 3 –  $\alpha=30^\circ$ ; 4 –  $\alpha=45^\circ$ ; 5 –  $\alpha=60^\circ$

Рис. 4. Влияние горизонтальной компоненты скорости  $U$ :  
1 –  $\alpha=5^\circ$ ; 2 –  $\alpha=15^\circ$ ; 3 –  $\alpha=30^\circ$ ; 4 –  $\alpha=45^\circ$ ; 5 –  $\alpha=60^\circ$

На рис. 3 изображены графики  $\bar{\varphi}_2(\bar{x})$ . Здесь присутствует только влияние вертикальной компоненты скорости  $V$  со стороны тела. Горизонтальная и вращательная при этом равны нулю. Полученные результаты при  $\alpha \rightarrow 0$  согласуются с данными для плоской пластины, ударяющейся о свободную поверхность [4].

На рис. 4 изображены графики  $\bar{\varphi}_1(\bar{x})$ . Здесь присутствует только влияние горизонтальной компоненты скорости  $U$  со стороны тела.

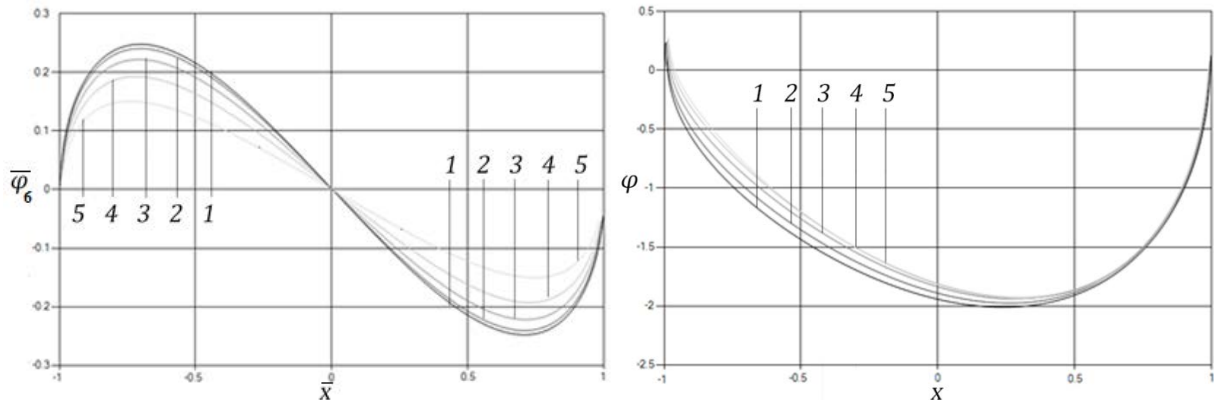


Рис. 5. Влияние вращательной компоненты скорости  $\omega$ :  
1 –  $\alpha=5^\circ$ ; 2 –  $\alpha=15^\circ$ ; 3 –  $\alpha=30^\circ$ ; 4 –  $\alpha=45^\circ$ ; 5 –  $\alpha=60^\circ$

Рис. 6. Влияние трех компонент скоростей  $U, V, \omega$ :  
1 –  $\alpha=5^\circ$ ; 2 –  $\alpha=15^\circ$ ; 3 –  $\alpha=30^\circ$ ; 4 –  $\alpha=45^\circ$ ; 5 –  $\alpha=60^\circ$

На рис. 5 изображены графики  $\bar{\varphi}_6(\bar{x})$ . Здесь присутствует только влияние вращательной компоненты скорости  $\omega$  со стороны тела. Результаты для значений функции  $\bar{\varphi}_6$  при  $\alpha \rightarrow 0$  согласуются с данными для плоской пластины, подверженной мгновенной угловой скорости.

На рис. 6 в качестве примера изображены графики  $\bar{\varphi}(\bar{x})$  для различных углов  $\alpha$ ;  $\bar{\varphi} = \frac{\bar{\varphi}}{2aV} = \bar{\varphi}_1 \frac{U}{V} + \bar{\varphi}_2 + \bar{\varphi}_6 \frac{\omega 2a}{V}$ . Здесь со стороны тела влияют все три компоненты скорости:  $V = 1$ ;  $\frac{U}{V} = \frac{1}{3}$ ;  $\frac{2a\omega}{V} = \frac{2}{3}$ .

### Выводы

В задаче рассматривались случаи, когда реализуется безотрывное обтекание тела. Однако, как видно из рис. 4, 5, при наличии только одного скоростного фактора  $U$  (или  $\omega$ ) на части поверхности тела значение потенциала  $\varphi > 0$ , что свидетельствует о том, что на этих участках поверхности должен возникнуть отрыв. В случае возникновения отрыва задача об ударе должна рассматриваться в другой постановке с учетом наличия точки отрыва.

Список использованной литературы

1. Гахов Ф.Д. Краевые задачи / Ф.Д. Гахов. – М.: Наука, 1977. – 640 с.
2. Гоман О.Г. Ударное взаимодействие несжимаемой жидкости и вертикальной пластины, плавающей на ее поверхности, в условиях образования одной зоны отрыва и наличии вращения / О.Г. Гоман, В.А. Катан. // Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Механіка», 2013, Вип. 17, т. 1. – С. 191-205.
3. Кочин Н.Е. Теоретическая гидромеханика в 2-х частях / Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе – М.: Гостехиздат, ч. 1. – 1948. – 536 с.
4. Лаврентьев М.А. Методы теории функций комплексного переменного / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 736 с.
5. Мусхелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения / Н.И. Мусхелишвили – М.:Наука, 1968. – 512 с.
6. Норкин М.В. Смешанные задачи гидродинамического удара / М.В. Норкин – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2007. – 136 с.
7. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1966. – 448 с.

УДК 519.6

М.Р. ПЕТРИК, Д.М. МИХАЛИК, О.Ю. ПЕТРИК, І.В. КОРДЯК  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя**ЗАДАЧА РЕТРОСПЕКТИВНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ПРОЦЕСУ ВІДТИСКУ "ТВЕРДЕ ТІЛО–РІДИНА" ДЛЯ КОНСОЛІДОВАНИХ  
СЕРЕДОВИЩ ЧАСТИНОК МІКРОПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ**

Для моделей фільтрації-консолідації біологічних середовищ частинок мікропористої структури сформульовано задачу ретроспективної ідентифікації початкових тисків в міжчастинковому та внутрішньочастинковому просторах і тиску в рідкій фазі. Отримано аналітичний зв'язок між визначальними і лімітуючими параметрами процесу вологопереносу з урахуванням взаємовпливів мікро- і макропотоків. Розроблено високопродуктивні методи ідентифікації на основі аналітичних розв'язків прямих задач та виразів компонентів градієнтів функціоналів-нев'язки. Проведено числове моделювання з аналізу та ідентифікації параметрів початкових умов процесу консолидації та витиснення вологи.

Ключові слова: математичне моделювання, ідентифікація, кінетичні параметри, мікропористі частинки.

М.Р. ПЕТРИК, Д.М. МИХАЛИК, О.Ю. ПЕТРИК, І.В. КОРДЯК  
Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя**ЗАДАЧА РЕТРОСПЕКТИВНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ КІНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРІВ  
ПРОЦЕСА ОТТИСКА "ТВЕРДОЕ ТІЛО–ЖИДКОСТЬ" ДЛЯ КОНСОЛІДОВАНИХ СРЕД  
ЧАСТИЦ МІКРОПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ**

Для моделей фильтрации-консолидации биологических сред частиц микропористой структуры сформулирована задача ретроспективной идентификации начальных давлений в межчастичном и внутривчастичном пространствах и давления в жидкой фазе. Получена аналитическая связь между определяющими и лимитирующими параметрами процесса влагопереноса с учетом взаимодействия микро- и макропотоків. Разработаны высокопроизводительные методы идентификации на основе аналитических решений прямых задач и выражений компонентів градиентов функционалов-невязки. Проведено численное моделирование для анализа и идентификации параметров начальных условий процесса консолидации и вытеснения влаги.

Ключевые слова: математическое моделирование, идентификация, кинетические параметры, микропористые частицы.

М. PЕТРЫК, D. МЫКХАЛЫК, O. PЕТРЫК, I. KORDIAK  
Ternopil National Ivan Pul'uj Technical University**THE PROBLEM OF RETROSPECTIVE IDENTIFICATION OF THE KINETIC PARAMETERS OF  
SOLID-LIQUID EXPRESSION FROM CONSOLIDATED MEDIUM OF MICRO-POROUS PARTICLES**

The inverse time boundary identification problem in integral form for mass transfer systems in compressible biological media of moist saturated microporous particles is considered, which allows obtain explicit analytical expressions of components for residual functional gradients through the influence functions of initial and boundary conditions of direct problem.

The direct problem is formulated on the basis of differential equations system in partial derivatives of consolidation model taking into account the flow of fluid from the space of the micropore (intraparticle space) into the macroparticle space with the appropriate initial and boundary conditions. Conditions taking into account changes in the external pressure at initial moment in these spaces and in the output pressure of liquid phase. The analytical solution of direct problem was achieved with finite Fourier and Laplace integral transformations.

High-performance methods for the implementation of boundary identification problem based on analytical solutions of direct problems and expressions of components of functional-residual gradients was developed. Regularization expressions are formulated using gradient error minimization method to identify initial and boundary conditions functions for the n-th step of identification routine.

The proposed approach allowed to obtain an explicit analytical connection between the defining and limiting transfer parameters (pressures in the liquid phase in the space of micro and macropores and parameters and functions of the initial and boundary conditions) and gave a more complete view of internal mechanism of moisture transfer, taking into account the interactions of micro- and macro flows. These analytical dependencies were future used for numerical identification and analysis of some parameters of the model. In particular, the convergence process of distribution curves for dimensionless liquid flow at the exit from compressed layer of moisture-containing particles on observation surface are shown in routine of stepwise parameters identification of initial conditions - initial values for interparticle and intraparticle spaces using regularization expressions.

Keywords: mathematical modeling, identification, kinetic parameters, micro porous particles.

**Постановка проблеми**

Моделювання технологічних систем зневоднення матеріалів біологічної природи, що містять вологонасичені мікропористі частинки, вимагає визначення ряду причинних характеристик, що визначають фізичні властивості так параметри початкові і граничні умови [1-2].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Механізми фільтрації-консолідації в різнопористих біологічних середовищах, що складаються з розгалужених мереж мікро- і макропор, утворених просторами частинок, клітин, міжчастинкових і межклітинкових просторів детально нами розглянуті в [3, 4]. В [5, 6] розглядалася задача коефіцієнтної ідентифікації, щодо визначення розподілу внутрішніх кінетичних параметрів (коефіцієнтний дифузії, коефіцієнтів консолидації в міжчастинковому і внутрішньочастинковому просторах і ін.) з отриманням явних градієнтів функціоналів-нев'язки на основі маловитратних аналітичних розв'язків прямої і спряженої задач та градієнтних методів мінімізації функціонала-нев'язки. Подібні задачі ідентифікації були розглянуті в [7] з використанням чисельних методів дискретизації.

Разом з тим, з огляду на зміни напружено-деформованого стану волого-пористого середовища під дією зовнішніх градієнтів тиску, актуальними є граничні і особливо, звернені назад в часі зворотні задачі вологомасопереносу, що полягають у знаходженні функцій і параметрів, що входять в початкові і граничні умови, які визначають основні стадії консолидації та витіснення вологи. У більшості досліджень для подібних задач ідентифікації використовується підхід, який базується на обчисленні градієнта функціонала-нев'язки при розв'язанні відповідних спряжених задач. Однак, як показано в [8], для випадків, коли є можливість побудувати аналітичний розв'язок прямої задачі, зокрема і виражений через функції впливу Коші або Гріна, можна обійтися без розв'язання спряжених задач, істотно зменшивши таким чином час і обчислювальні ресурси на процедури регуляризації.

**Мета дослідження**

В роботі розглядаються обернена в часі гранична задача ідентифікації в інтегральній формі для систем масопереносу в стискуваних біологічних середовищах вологонасичених мікропористих частинок, яка дозволяє отримувати явні аналітичні вирази компонентів градієнтів функціоналів-нев'язок через функції впливу початкових і крайових умов прямої задачі.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

**Пряма задача.** Формулюється на підставі системи диференціальних рівнянь в частинних похідних моделі консолидації, що враховують перетоки рідини з простору мікропор (intraparticle space) в простір макропор скелета (macroparticle space) [4] з початковими та крайовими умовами, що враховують зміни зовнішнього тиску в початковий момент в цих просторах і вихідного тиску в рідкій фазі на фільтрувальній перегородці. В областях  $\Omega_T = (0, T) \times (0, h)$  і  $\Omega_T \times (0, R)$  розподілу тисків в рідкій фазі і відповідно задовольняють системі рівнянь консолидації в приватних похідних:

$$\frac{\partial P_1(t, z)}{\partial t} = b_1 \frac{\partial^2 P_1}{\partial z^2} - \beta \frac{\partial \bar{P}_2(t, z)}{\partial t}, \quad z \in (0, h), \tag{1}$$

$$\frac{\partial P_2(t, x, z)}{\partial t} = b_2 \frac{\partial^2 P_2}{\partial x^2}, \quad x \in (0, R), \quad z \in (0, h), \quad t \in (0, T), \tag{2}$$

Початкові і крайові умови:

$$P_1(t, z)|_{t=0} = P_{e_1}(z), \quad P_2|_{t=0} = P_{e_2}(R/2, z) \tag{3}$$

Крайові умови:

$$P_1(t, z)|_{z=0} = g_0(t), \quad \frac{\partial P_1}{\partial z}|_{z=h} = 0; \tag{4}$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial x}|_{x=0} = 0, \quad P_2(t, x, z)|_{x=R} = P_1(t, z), \tag{5}$$

де  $b_1, b_2$  – коефіцієнти консолидації в міжчастинковому і внутрішньочастинковому просторах відповідно,  $\beta$  – фактор еластичності матеріалу,  $h$  – товщина шару,  $R$  – напівтовщина частинки,

$$P_1(t, z) = \frac{1}{R} \int_0^R P_2(t, x, z) dz.$$



Функціонал-нев'язка, що мінімізує відхилення модельного розв'язку від експериментального сліду, для реалізації процедури ідентифікації невідомих кінетичних параметрів переносу в міжчастинковому і внутрішньочастинковому просторах (функцій і параметрів початкових умов  $P_{e_1}, P_{e_2}$  і нульової крайової умови  $g_0$ ) запишеться у вигляді [9]:

$$J(P_{e_1}, P_{e_2}, g_0) = \frac{1}{2} \int_0^T \int_0^h [E_{err}(P_{e_1}, P_{e_2}, g_0, t, z, \gamma)]^2 dz dt. \quad (7)$$

Тут  $E_{err}(P_{e_1}, P_{e_2}, g_0, t, z, \gamma)$  – вираз невідповідності між модельними і експериментальними значеннями шуканих параметрів:

$$E_{err}(P_{e_1}, P_{e_2}, g_0, t, z, \gamma) = \left[ - \left( \frac{1}{\mu r_1} \frac{\partial}{\partial z} P_1(t, z; P_{e_1}, P_{e_2}, g_0) + \frac{1}{\mu r_2} \frac{\partial}{\partial z} \overline{P}_2(t, z; P_{e_1}, P_{e_2}, g_0) \right) - M_{exp.}(t, z) \right]_{z=\gamma} \quad (8)$$

$M_{exp.}(t, z)$  – вектор експериментальних даних на поверхні вимірів.

**Побудова розв'язку моделі.** Застосовуючи до рівняння (2) з умовами (3), (5) скінченне інтегральне перетворення Фур'є (Cos-Фур'є), визначене інтегральними операторами [9], отримуємо єдиний розв'язок задачі у вигляді функції:

$$P_2(t, x, z) = \frac{2}{R} \sum_{m=0}^{\infty} \left[ P_{e_2}(R/2, z) e^{-b_2 \eta_m^2 t} + b_2 \eta_m^2 \int_0^t e^{-b_2 \eta_m^2 (t-\tau)} P_1(\tau, z) dz \right] \frac{(-1)^m \cos \eta_m x}{\eta_m} \quad (9)$$

тут  $\vartheta(x, \eta_m) = \cos \eta_m x$ ,  $\eta_m = \frac{2m+1}{2R} \pi$ ,  $m = \overline{0, \infty}$  – спектральні функції і спектральні значення інтегрального перетворення Фур'є.

Після підстановки у інтегральне рівняння консолідації виразу для усередненого по радіусу тиску в частинці та застосування інтегрального перетворення Лапласа по змінній  $t$ , в припущенні, що всі задані і шукані функції є оригіналами по Лапласа, після ряду перетворень отримуємо задачу Коші [10]:

$$\frac{d^2 P_0^*}{dz^2} - \frac{s}{b_1} \left( 1 - \beta \frac{2}{R^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{\frac{s}{b_2} + \eta_m^2} \right) P_1^*(s, z) + \frac{1}{b_1} \left[ P_{e_1}(z) - \beta \left[ 1 - \frac{2}{R^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{\eta_m^2 \left( \frac{s}{b_2} + \eta_m^2 \right)} \right] P_{e_2}(R/2, z) \right] = 0 \quad (10)$$

$$P_1^*|_{z=0} = g_0(t); \quad \frac{dP_1^*}{dz}|_{z=h} = 0. \quad (11)$$

Застосуємо до отриманої задачі скінченне інтегральне перетворення Фур'є (Sin-Фур'є), визначене інтегральними операторами [11], отримає вираз:

$$P_{1,n}^*(s) = \frac{1}{s + b_1 \lambda_n^2 - \beta \sqrt{s} \frac{\sqrt{b_2}}{R} th \sqrt{\frac{s}{b_2}} R} \left[ b_1 \lambda_n g_0^*(s) + P_{e_{1n}} - \beta \frac{sh \sqrt{\frac{s}{b_2}} R}{R \sqrt{\frac{s}{b_2}} ch \sqrt{\frac{s}{b_2}} R} P_{e_{2n}} \right]. \quad (12)$$

Який після повернення до оригіналу для функції  $P_1^*(s)$  та застосування теореми про розкладання Хевісайда [10], набуде вигляду:

$$P_1(t, z) = \frac{2}{h} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{1 - \beta \frac{\sqrt{b_2}}{2R} \left( \frac{1}{v_{jn}} \operatorname{tg} \frac{v_{jn} R}{\sqrt{b_2}} + \frac{1}{\cos^2 \frac{v_{jn} R}{\sqrt{b_2}}} \frac{R}{\sqrt{b_2}} \right)}^* \tag{13}$$

$$* \left[ \int_0^t e^{-v_{jn}^2(t-\tau)} b_1 \lambda_n \sin(\lambda_n z) g_0(\tau) d\tau + \int_0^h e^{-v_{jn}^2 t} \sin(\lambda_n \xi) \sin(\lambda_n z) P_{e_1 n}(\xi) d\xi - \right.$$

$$\left. - \beta \int_0^t \int_0^h e^{-v_{jn}^2(t-\tau)} \left( 1 + \frac{2}{R^2} \sum_{k=0}^{\infty} b_2 e^{-b_2 \eta_k^2 \tau} \right) \sin(\lambda_n \xi) \sin(\lambda_n z) P_{e_2 n}(R/2, \xi) d\xi d\tau \right]$$

Тут  $\eta_k = \frac{2k+1}{2R} \pi$ ,  $k = \overline{0, \infty}$  – ненульові корені рівняння  $\cos \eta_k R = 0$ ,  $v_{jn}, n = \overline{1, \infty}$  – корені трансцендентного рівняння:

$$v^2 - b_1 \lambda_n^2 - \beta v \frac{\sqrt{b_2}}{R} \operatorname{tg} \frac{vR}{\sqrt{b_2}} = 0. \tag{14}$$

**Регуляризаційні вирази.** Використовуючи градієнтний метод мінімізації похибки для ідентифікації функцій початкових умов  $P_{e_1}$ ,  $P_{e_2}$  і граничної умови, регуляризаційні вирази для  $n$ -ого кроку ідентифікації мають вигляд [12, 13]:

$$P_{e_1}^{n+1}(z) = P_{e_1}^n(z) - \nabla J_{P_{e_1}}^n(z) \frac{E_{err}(P_{e_1}^n, P_{e_2}^n, g_0; 0, z, \gamma)^2}{\|\nabla J_{P_{e_1}}^n(z)\|^2 + \|\nabla J_{P_{e_2}}^n(z)\|^2},$$

$$P_{e_2}^{n+1}(z) = P_{e_2}^n(z) - \nabla J_{P_{e_2}}^n(z) \frac{E_{err}(P_{e_1}^n, P_{e_2}^n, g_0; 0, z, \gamma)^2}{\|\nabla J_{P_{e_1}}^n(z)\|^2 + \|\nabla J_{P_{e_2}}^n(z)\|^2}, \quad z \in \Omega,$$

$$g_0^{n+1}(t) = g_0^n(t) - \nabla J_{g_0}^n(t) \frac{E_{err}(P_{e_1}^n, P_{e_2}^n, g_0^n; t, 0, \gamma)^2}{\|\nabla J_{g_0}^n(t)\|^2}, \quad t \in (0, T),$$

$$\|\nabla J_{P_{e_1}}^n(z)\|^2 = \int_0^h [\nabla J_{P_{e_1}}^n(z)]^2 dz, i = \overline{1, 2}; \|\nabla J_{g_0}^n(t)\|^2 = \int_0^T [\nabla J_{g_0}^n(t)]^2 dt$$

– квадрати норм відповідних компонентів градієнта функціонала нев'язки  $J(P_{e_1}, P_{e_2}, g_0)$  по шуканих функціях  $P_{e_1} \in \Omega_T$ ,  $P_{e_2} \in \Omega_T$ ,  $g_0 \in \Omega_T$ .

**Числовий аналіз.** Нижче наведено отримані результати числового аналізу та ідентифікації параметрів початкових умов процесу консолідації і витиснення вологи. На рис.1 показано процес збіжності кривих розподілу безрозмірного потоку рідини на виході з стисненого шару вологомістких частинок на поверхні спостереження  $z = 0$  до кривої спостереження (номер 6) при реалізації процедури покрокової ідентифікації параметрів функцій початкових умов – початкових значень в міжчастинковому і внутрішньочастинковому просторах з використанням регуляризаційних виразів. Значення коефіцієнтів консолідації в просторах макро- і мікропор прийняті відповідно  $1.8 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с і  $1.0 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, отриманих в ході попередніх досліджень параметрів легко руйнуючихся тканин (better disrupted tissue). Значення інших параметрів, властивостей частинок і дані спостереження взяті з робіт [3, 4].

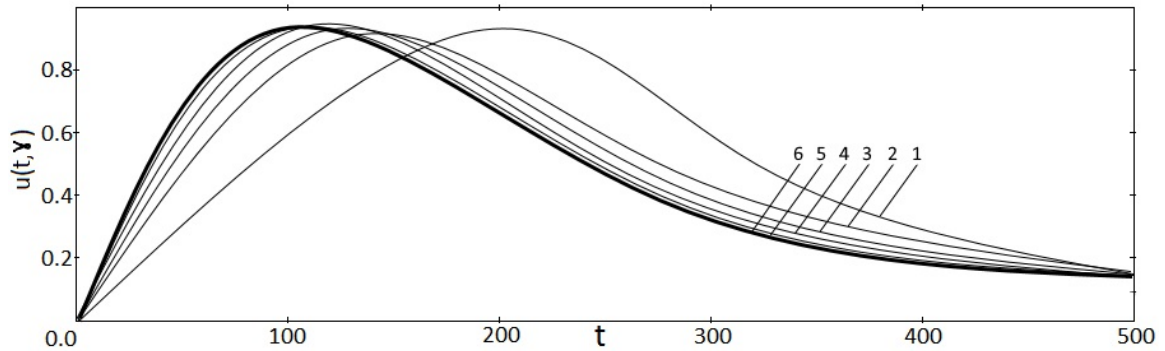


Рис. 1. Процес збіжності кривих розподілу безрозмірного потоку рідини на виході з стисненого шару вологомістких частинок на поверхні спостереження

Рис. 2 (а, б) ілюструє еволюції зміни початкових умов – значень тисків в рідкій фазі для міжчастинкового простору та простору мікропор вологомістких частинок, відновлюваних згідно приведених регуляризаційних залежностей. Як видно з рис. 2, для двох останніх блоків ітерацій спостерігається стабілізація наведених профілів початкових умов консолідації. Отримані початкові значення тисків тут реально відповідають не підготовчій стадії встановлення необхідного тиску в системі, а другий – основній стадії консолідації і витиснення вологи з вологомістких частинок, що викликає градієнт тиску в мікропорах і відповідно макропорах міжчастинкового простору, за рахунок зниження тиску (зменшення вологи) в останньому.

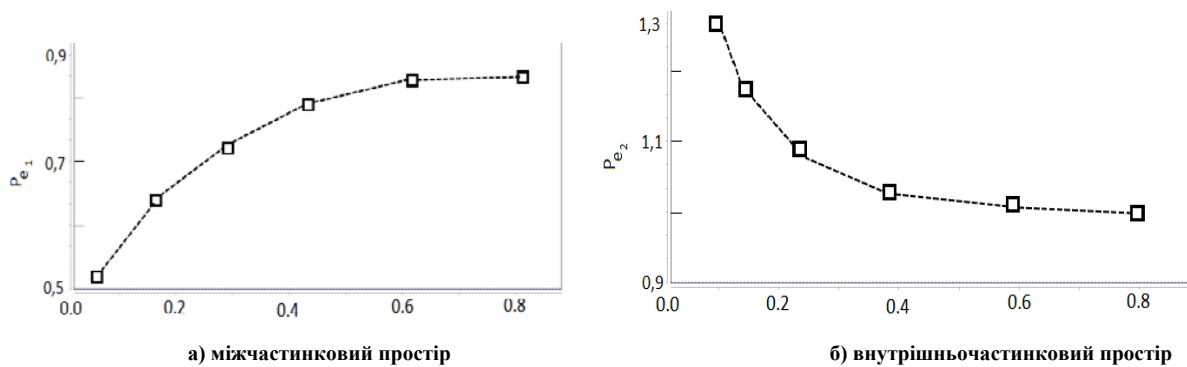


Рис. 2. Еволюція початкових значень тисків в рідкій фазі відновлюваних згідно регуляризаційних залежностей

### Висновки

У дослідженні сформульовано задачу ретроспективної ідентифікації початкових тисків в міжчастинковому та внутрішньочастинковому просторах і тиску в рідкій фазі на фільтрувальній перегородці для моделей фільтрації-консолідації біологічних середовищ частинок мікропористої структури, що стискаються, з використанням функціоналів-нев'язки та врахуванням зміни сумарного потоку рідини на поверхні спостереження. Розроблено високопродуктивні методи реалізації задачі граничної ідентифікації на основі аналітичних розв'язків прямих задач та виразів компонентів градієнтів функціоналів-нев'язки. Такий підхід дозволив отримати явний аналітичний зв'язок між визначальними і лімітують параметрами переносу (тисками в рідкій фазі в просторі мікро- і макропор і параметрів та функцій початкових і граничних умов) та надає більш повний опис внутрішнього механізму вологопереносу з урахуванням взаємовпливів мікро- і макропотоків. Отримані аналітичні залежності використано для проведення чисельної ідентифікації та аналізу деяких параметрів моделі.

### Список використаної літератури

1. Barenblatt G.I. Theory of fluid flows through natural rocks / G.I. Barenblatt, V.M. Entov, V.M. Ryzhik. Dordrecht: Kluwer, 1990. – 303 p.

2. Shirato M. The Terzaghi-Voigt combined model for constant pressure consolidation of filter cakes and homogeneous semi-solid materials / M. Shirato, T. Murase, M. Iwata, S. Nakatsuka // *Chemical Engineering Science*. – 1986. – № 41. – P. 3213-3218.
3. Petryk M. Numerical and Analytical Modelling of Solid-Liquid Expression from Soft Plant Materials / M. Petryk, E. Vorobiev // *AIChE Journal*. Wiley USA. –2013. – № 59(12). – P. 4762–4771.
4. Petryk M. Liquid Flowing from Porous particles During the Pressing of Biological Materials / M. Petryk, E. Vorobiev // *Computer & Chem. Eng.* – 2007. – № 31(10). – P. 1336-1345.
5. Petryk M. Competitive Diffusion of Gases in a Zeolite Bed: NMR and Slice Selection Procedure, Modelling and Parameter Identification / M. Petryk, S. Leclerc, D. Canet, I. Sergienko, V. Deineka, J. Fraissard // *The Journal of Physical Chemistry C*. ACS (USA). – 2015. – Vol. 119. – Issue 47. – P. 26519–26525.
6. Petryk M. High Velocity Identification Methods of the Model Parameters of Filtration-Consolidation of Compressible Media of Moisture-Saturated Micro-Porous Particles / M. Petryk // *Journal of Automation and Information Sciences*. Begell House (USA). – 2016. – Vol. 48. – Issue 1. – P. 69-83.
7. Сергиенко И.В. Идентификация параметров некоторых задач фильтрации-консолидации влагонасыщенных микропористых сред / И.В. Сергиенко, В.С. Дейнека // *Кибернетика и системный анализ*. – 2015. – № 2. – С. 89-107.
8. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена / О.М. Алифанов. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
9. Сергиенко І.В. Математичне моделювання масопереносу в середовищах частинок нанопористої структури / І.В. Сергиенко, М.Р. Петрик, О.М. Химич, Д. Кане, Д.М. Михалик, С. Леклерк, Ж. Фресар. – К.: Національна академія наук України. Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова, 2014. – 210 с.
10. Лаврентьев М.А. Методы теории функций комплексного переменного / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 736 с.
11. Ленюк М.П. Інтегральні перетворення Фур'є, Бесселя із спектральним параметром в задачах математичного моделювання масопереносу в неоднорідних середовищах / М.П. Ленюк. – К: Наукова думка, 2000. – 372 с.
12. Petryk M. Retrospective Identification Problem in Integrated Form for Systems of Filtration– Consolidation of Compressible Media of Liquid Contained Microporous Particles / M. Petryk // *Journal of Automation and Information Sciences*, Begell House USA. – 2016. – Vol. 48. – Issue 8. – P. 1-14.
13. Сергиенко И.В. Системный анализ многокомпонентных распределенных систем / И.В. Сергиенко, В.С. Дейнека. –К.: Наукова думка, 2009. – 639 с.

УДК 629.439

В.А. ПОЛЯКОВ, Н.М. ХАЧАПУРИДЗЕ

Институт транспортных систем и технологий  
Национальной академии наук Украины

### ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОЕЗДА

Объектом исследования являются переходные режимы движения магнитолевитирующего поезда. Цель исследования – оценить его динамические качества и нагруженность в таких режимах. Работа выполнена путём экспериментов с компьютерной моделью движения поезда, в которую преобразована созданная модель математическая. Компьютерная модель программно фиксировалась на входном языке системы компьютерной математика Mathematica. Результаты исследования приведены в графической форме и отражают движение поезда в режимах разгона, прохождения тоннеля, а также служебного и экстренного торможения. Анализ этих результатов позволил оценить динамические качества поезда в рассмотренных переходных режимах движения и его нагруженность в их процессе.

Ключевые слова: магнитолевитирующий поезд, переходные режимы движения, динамические качества, динамическая нагруженность, компьютерный эксперимент.

В.О. ПОЛЯКОВ, М.М. ХАЧАПУРИДЗЕ

Институт транспортных систем та технологій  
Національної академії наук України

### ПЕРЕХІДНІ РЕЖИМИ ПОЗДОВЖНЬОГО РУХУ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧОГО ПОЇЗДА

Об'єктом дослідження є перехідні режими руху магнітолевітуючого поїзда. Метою дослідження є оцінка його динамічних якостей і навантаженості в таких режимах. Робота виконана шляхом експериментів з комп'ютерною моделлю руху поїзда, в яку перетворена створена модель математична. Комп'ютерна модель програмно фіксувалася входною мовою системи комп'ютерної математика Mathematica. Результати дослідження наведені в графічній формі і відображають рух поїзда в режимах розгону, проходження тунелю, а також службового та екстреного гальмування. Аналіз цих результатів дозволив оцінити динамічні якостей поїзда в розглянутих перехідних режимах руху та його навантаженість в їх процесі.

Ключові слова: магнітолевітуючий поїзд, перехідні режими руху, динамічні якості, динамічна навантаженість, комп'ютерний експеримент.

V.A. POLYAKOV, N.M. KHACHAPURIDZE

Institute of Transport Systems and Technologies  
of Ukraine's National Academy of Sciences

### TRANSITION MODES OF A MAGNETICALLY LEVITATED TRAIN'S LONGITUDINAL MOTION

The magnetically levitated trains (MLT) have a number of significant advantages. Due to this, they are being intensively introduced into the world transport system. MLT is a very expensive, unique artifact. Its purpose is to transport passengers and cargo. The quality of such transportation is a key criterion for assessing the consumer properties of a train. The decisive influence on this quality is provided by the dynamics of the electromechanical subsystem. Particularly critical are the non-stationary modes of its motion. They are limiters and should be investigated first. The full-scale experiment on MLT is expensive, dangerous, and often not possible at all. General-theoretical methods for studying its dynamic processes are also ineffective. The main and most universal tool for analysis and synthesis of processes in it is their mathematical and, in particular, computer modeling, which has many advantages of theoretical and experimental methods. Radical advantages of this tool make even more important the precision of choosing a specific methodology for conducting the research. For this reason, the work pays special attention to the reasoned choice of the selective features of the research paradigm. In its capacity, experiments with a computer model of train's motion, into which the created mathematical model was transformed, were selected. The computer model was programmed in the input language of computer mathematic system Mathematica. The longitudinal motion of a train, subjected to natural disturbances and controlled by a linear synchronous motor in the modes of acceleration, passage of the tunnel, as well as service and emergency braking, is studied. The results of the study are shown graphically. Their analysis made it possible to evaluate the dynamic qualities of the train in the considered non-stationary modes of motion, as well as its load in their process.

Keywords: magnetically levitated train, transient modes of motion, dynamic qualities, dynamic loading, computer experiment.

**Изучаемая проблема. Уровень её исследованности**

Магнитолевитирующий поезд (МЛП) – большая, сложная система, элементы которой весьма разнотипны [1]. Благодаря своим несомненным достоинствам [2], такие поезда, несмотря на значительные инженерные трудности, а также весьма немалые ресурсные затраты натурной реализации и текущей эксплуатации, интенсивно внедряются в мировую транспортную систему. Однако до настоящего времени, исследования их динамики, как правило, велись экспериментальными методами [3].

**Задача исследования**

МЛП – весьма дорогостоящие, уникальные артефакты. Натурный эксперимент над ними дорог, долог, опасен, а часто и вовсе невозможен. Общетеоретические методы исследования их динамических процессов также малоэффективны. Поэтому возможно большая часть таких исследований должна быть компьютерным моделированием, имеющим многие достоинства теоретических и экспериментальных методов.

Предназначение МЛП – транспортирование пассажиров и грузов, качество которого – ключевой критерий оценки потребительских свойств поезда. На указанное качество определяюще влияет динамика электромеханической подсистемы. Особо критичны нестационарные режимы её движения. Они являются лимитирующими и подлежат первоочередному исследованию. Его проведение – основная задача работы.

**Материал и результаты исследования**

Рассмотрено одномерное продольное движение МЛП. В качестве расчётной схемы его механической подсистемы (МП) принято твёрдое тело массой  $m$ . Движение рассматривается относительно инерциального неподвижного декартового триэдра  $OXYZ$ . С упомянутым телом связывается декартов триэдр  $Cxyz$ , оси которого являются его главными центральными. Изменение положения тела во времени  $t$  определяется координатой  $x(t)$  центра масс. На тело не наложены аналитические связи. Конфигурация МП МЛП описуема с помощью одной обобщённой координаты:

$$\eta^1 = x. \tag{1}$$

Движение рассматривается в состоянии электродинамической левитации. В процессе движения считаются отсутствующими отклонения центра масс тела  $m$  от стационарной траектории, параллельной кривой оси пути и симметрично расположенной относительно его конструкций. На тело действуют следующие силы [1]:  $F_{Tx}$  – продольная составляющая тягового усилия – со стороны линейного синхронного двигателя (ЛСД);  $F_{ADx}$  – продольная составляющая аэродинамического усилия – со стороны воздушной среды;  $F_{EDx}$  – продольная составляющая электродинамического усилия – со стороны путевых контуров подвешивания;  $F_{Wx}$  – продольная составляющая веса поезда – вследствие наличия продольного уклона пути.

Продольное поступательное движение МП МЛП описуемо уравнением второго закона Ньютона:

$$m \cdot \ddot{x} = F_{Tx} + F_{ADx} + F_{EDx} + F_{Wx}, \tag{2}$$

где  $\ddot{x}$  – продольная составляющая ускорения точки  $C$ .

Значения  $F_{Tx}$  в рассматриваемом случае определимы [4] соотношениями:

$$F_{Tx} = f_{x\lambda\chi} \cdot e^\lambda \cdot e^\chi; \quad e^\lambda = e^\chi = 1; \\ f_{\lambda\chi} = l_{\lambda\chi} \cdot i^\lambda \cdot B_{\lambda\chi} \quad \forall \lambda \in [1, N], \chi \in [1, 2], \tag{3}$$

где  $f_{\lambda\chi}$  – сила взаимодействия полей токов цепей  $\chi$ -го прямолинейного элемента  $\lambda$ -го контура индуктора двигателя и его якоря;  $l_{\lambda\chi}, i^\lambda, B_{\lambda\chi}$  – длина такого элемента, ток в нём, а также индукция (условно однородного – в пределах элемента) магнитного поля, в котором элемент находится.

Значения величин  $F_{ADx}$  оценочно описуемы [5] соотношениями:

$$F_{ADx} = -C_x \cdot q \cdot S; \quad q = 0,5 \cdot \rho \cdot \dot{x}^{(2)}, \tag{4}$$

где  $C_x$  – безразмерный аэродинамический коэффициент в направлении  $Cx$ ;  $S$  – характерная площадь сечения поезда в том же направлении;  $\rho$  – плотность окружающего его воздуха.

Значения величин  $F_{EDx}$  аппроксимируемы [6] полиномом вида:

$$F_{EDx} = k_\rho \cdot \dot{x}^\rho \cdot e^\rho; \quad e^\rho = 1 \quad \forall \rho \in [1, n_r], \tag{5}$$

в котором  $k_\rho \forall \rho \in [1, n_r]$  получаютя регрессией экспериментальных зависимостей  $F_{EDx}(t)$  с избранной степенью аппроксимационного полинома  $n_r$ .

Наконец, изменение значений усилия  $F_{Wx}$  описывается выражением:

$$F_{Wx} = m \cdot g \cdot \sin \varphi_\kappa, \tag{6}$$

где  $g$  – гравитационная постоянная;  $\varphi_\kappa$  – угол уклона профиля  $\kappa$ -го участка пути движения поезда.

Модель (2) описывает продольное движение МП МЛП под действием учитываемых возмущений, и управления ею ЛСД. Эта модель явилась алгоритмической основой компьютерной модели того же процесса – инструмента его исследования. Последняя модель программно фиксируется на входном языке системы Mathematica и состоит из расчётной и графической частей. Первая из них решает прямую задачу динамики поезда, а вторая – преобразует результаты в графическую форму. Исследование выполнено путём экспериментов с компьютерной моделью. Их результат – графики зависимостей от времени порождающих и характеризующих движение величин. Исследовано движение в режимах: набор скорости, проход тоннеля, а также служебного и экстренного торможения.

Частота напряжения якоря ЛСД автоматически поддерживается [1] пропорциональной скорости движения МЛП. Совместно с частотным возможно иное управление этим напряжением, обеспечивающее плавность электромагнитных процессов в ЛСД и механических – в МП. Таковым может быть амплитудное, либо фазовое управление. В первом случае, ЛСД дополнительно регулируется изменением амплитуды напряжения его якоря, например, по закону

$$U_a(t) = U_a^* \cdot th(t \cdot k_{vd}), \tag{7}$$

где  $U_a^*$  – предельное значение  $U_a$ ;  $k_{vd}$  – коэффициент интенсивности её изменения.

При фазовом регулировании начальная фаза этого напряжения может меняться, например, по закону

$$\theta_u(t) = \alpha_u \cdot [th(t \cdot k_{fd}) - 1], \tag{8}$$

где  $\alpha_u$  – его текущая фаза;  $k_{fd}$  – коэффициент, определяющий темп изменения начальной фазы.

Иллюстративные примеры результатов исследования движения МЛП в режиме набора скорости приведены на рис. 1 – 6. Рис. 1 и 2 соответствуют управлению только частотой напряжения, рис. 3 и 4 – амплитудно-частотному управлению, рис. 5 и 6 – фазочастотному управлению. При этом, на рис. 1, 3 и 5 приведены графики скорости экипажа, а на рис. 2, 4 и 6 – графики действующей на него тяговой силы ЛСД.

spe, m/s

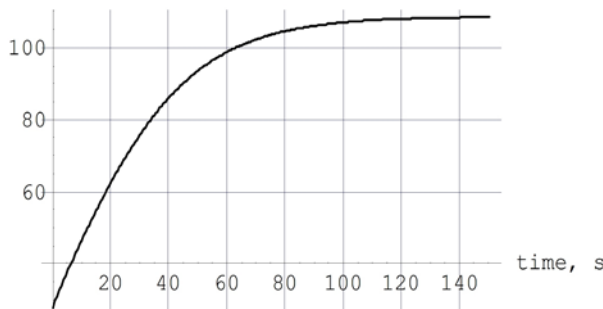


Рис. 1

tmf, N

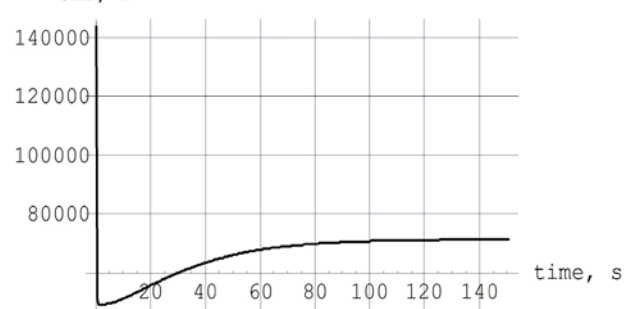


Рис. 2

spe, m/s

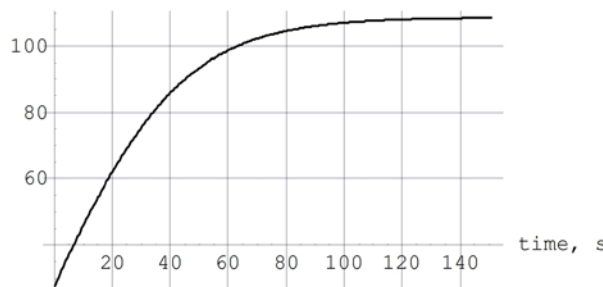


Рис. 3

tmf, N

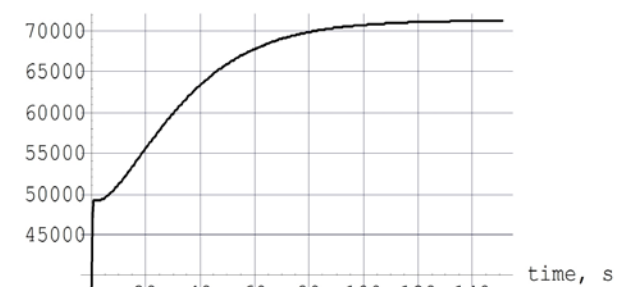


Рис. 4

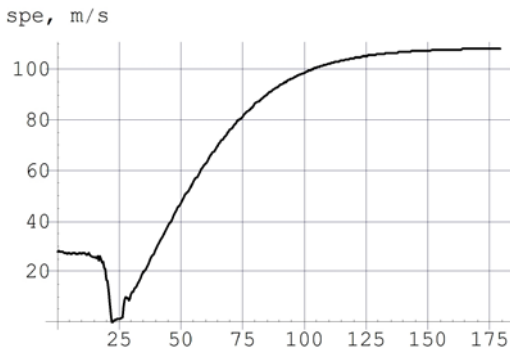


Рис. 5

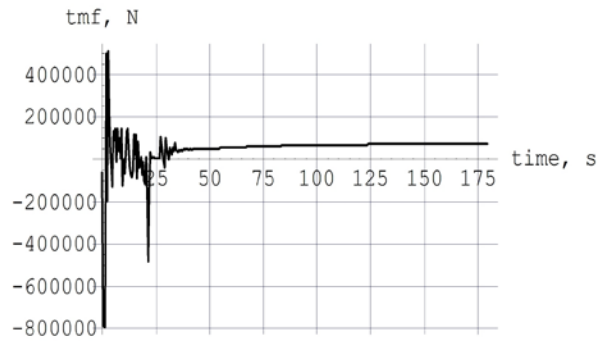


Рис. 6

Анализ результатов моделирования разгона поезда свидетельствует о неприемлемости как только частотного варианта управления – из-за высокого значения ускорения поезда, так и фазочастотного – вследствие возникающей высокочастотной осцилляции скорости МЛП. Кроме того, в последнем случае недопустимо высоки якорные токи ЛСД. Наиболее приемлем амплитудно-частотный вариант управления якорным напряжением.

Вход поезда в тоннель и выход из него приводят к перепадам аэродинамического сопротивления примерно на 30 % [7], что может приводить к резким колебаниям ускорения и скорости движения. Это недопустимо и делает целесообразной автоматизацию управления им. При входе и выходе из тоннеля это дополнительное сопротивление изменяется почти по линейному закону. Поэтому при моделировании такого режима движения считалось, что аэродинамическое сопротивление ему описывается соотношениями

$$F_{ADx}^* = F_{ADx} \cdot [1 + (1/0,7 - 1) \cdot \kappa];$$

$$\kappa = \begin{cases} 0 & \forall x < \xi_{ts} - 0,5 \cdot l_v \vee x > \xi_{tf} + 0,5 \cdot l_v; \\ (x + 0,5 \cdot l_v - \xi_{ts}) \cdot l_v^{(-1)} & \forall \xi_{ts} - 0,5 \cdot l_v \leq x \leq \xi_{ts} + 0,5 \cdot l_v; \\ 1 & \forall \xi_{ts} + 0,5 \cdot l_v < x < \xi_{tf} - 0,5 \cdot l_v; \\ (\xi_{tf} - x + 0,5 \cdot l_v) \cdot l_v^{(-1)} & \forall \xi_{tf} - 0,5 \cdot l_v \leq x \leq \xi_{tf} + 0,5 \cdot l_v, \end{cases} \quad (9)$$

где  $l_v$  – длина поезда;  $\xi_{ts}, \xi_{tf}$  – расстояния от точки начала отсчёта пути до начала и конца тоннеля. Цель управления при движении в тоннеле:

$$\ddot{x}(t) = \ddot{x}_{ts} = const, \quad (10)$$

где  $\ddot{x}_{ts}$  – ускорение при входе в тоннель. Условие (10) достигается частотным, амплитудно-частотным, либо фазочастотным управлением величиной  $U_a$ . Требуемые его законы находились из модели (2) (в которой  $F_{ADx}$  заменялось на  $F_{ADx}^*$ , а  $\ddot{x}$  – на  $\ddot{x}_{ts}$ ), а также модели динамики ЛСД [4].

Иллюстративные примеры результатов исследования движения МЛП в тоннеле приведены на рис. 7 – 12. Рис. 7 и 8 соответствуют управлению только частотой якорного напряжения, рис. 9 и 10 – амплитудно-частотному управлению этим напряжением, а рис. 11 и 12 – фазочастотному управлению. При этом на рис. 7, 9 и 11 приведены графики скорости экипажа, а на рис. 8, 10 и 12 – графики действующей на него тяговой силы ЛСД.

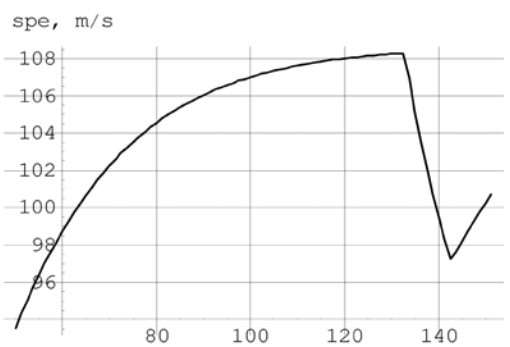


Рис. 7

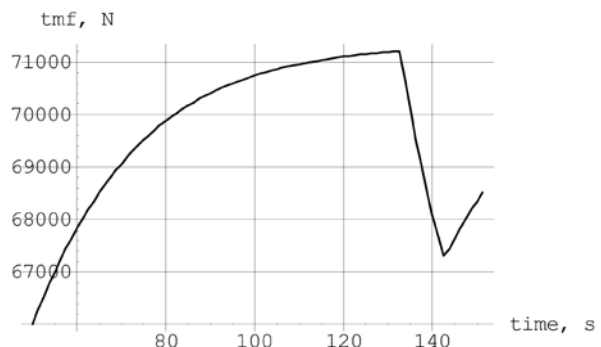


Рис. 8



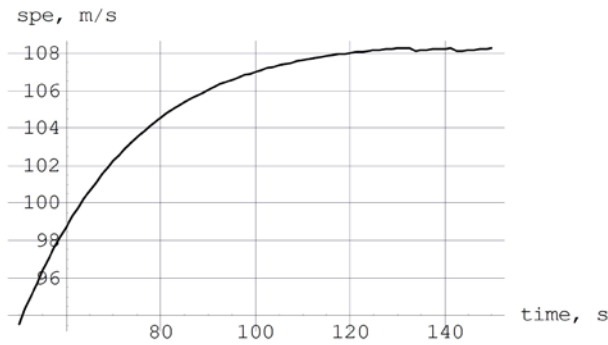


Рис. 9

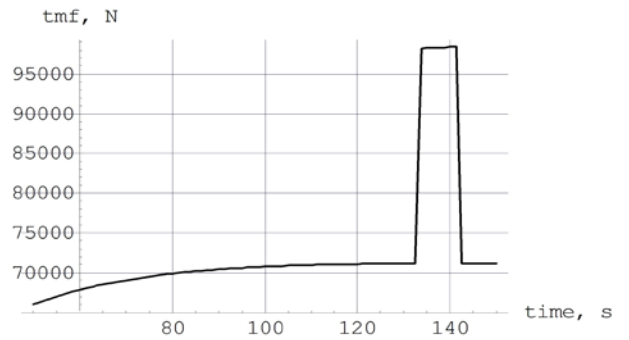


Рис. 10

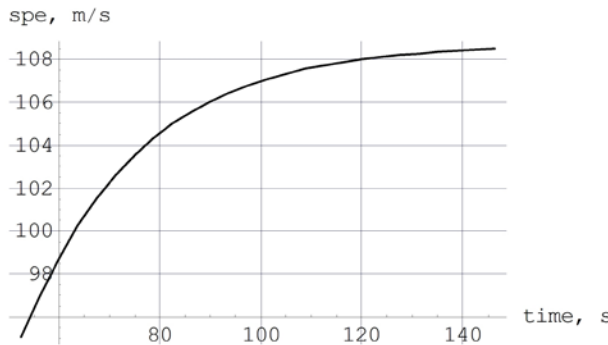


Рис. 11

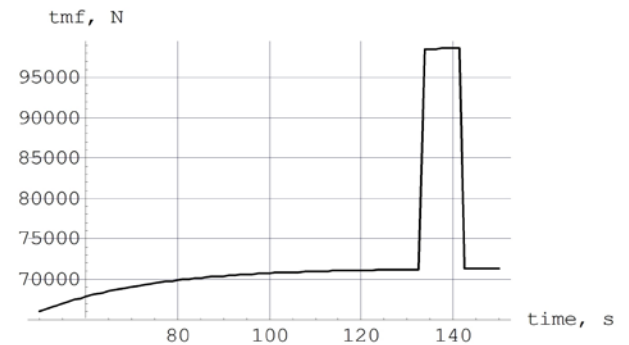


Рис. 12

Анализ результатов моделирования указанных трёх вариантов управления проходом поезда сквозь тоннель приводит к следующим выводам. В случае только частотного управления, перепад значения скорости МЛП составляет около 10 %, что, безусловно, недопустимо. Иные два способа автоматического регулирования напряжения примерно эквивалентны, так как в обоих этих случаях отсутствуют сколько-нибудь существенные колебания скорости и ускорения МЛП при проходе тоннеля. В тоже время, фазочастотный способ регулирования проще (поскольку отпадает необходимость регулирования высоковольтных напряжений). Однако, при амплитудно-частотном регулировании пиковые значения фазовых токов примерно в полтора раза ниже, что снижает токовую нагрузку на электрооборудование двигателя.

В процессе движения МЛП происходит взаимное перемещение якорной и индукторных обмоток ЛСД. В этих обмотках индуцируются электродвижущие силы взаимной индукции, ведущие к возникновению механических сил, противодействующих взаимному смещению обмоток. Напряжение, питающее якорную обмотку двигателя, обычно компенсирует указанные электродвижущие силы и ЛСД работает в тяговом режиме. Но если текущее значение якорного напряжения  $u_v, \forall v \in [A, B, C]$  снижается, двигатель автоматически переходит в тормозной режим. Как и разгон МЛП, его электродинамическое торможение должно быть плавным. Поэтому двумя наиболее приемлемыми путями осуществления служебного торможения поезда являются амплитудно-частотное и фазочастотное регулирование якорного напряжения ЛСД. Для реализации указанных режимов плавного регулирования, амплитуда и начальная фаза напряжения на якоре могут изменяться, например, согласно законам

$$U_a(t) = U_a^* \cdot [1 - th(t \cdot k_{vi})]; \tag{11}$$

$$\theta_u(t) = -\alpha_u \cdot th(t \cdot k_{fm}), \tag{12}$$

где  $k_{vi}, k_{fm}$  – коэффициенты, определяющие темп изменения амплитуды и начальной фазы якорного напряжения. Эти законы могут использоваться для служебного торможения поезда. Для экстренного же его торможения применимо мгновенное снятие питающего напряжения с якорной обмотки двигателя, но с сохранением замкнутости её контуров – путём двубортного трёхфазного короткого замыкания этой обмотки.

Иллюстративные примеры результатов исследования движения МЛП в различных тормозных режимах приведены на рис. 13 – 18. Рис. 13 и 14 соответствуют реализации служебного торможения при амплитудно-частотном регулировании напряжения, а рис. 15 и 16 – при фазочастотном. Наконец, рис. 17 и 18 соответствуют экстренному торможению – путём двубортного трёхфазного короткого замыкания якорной обмотки ЛСД. При этом на рис. 13, 15 и 17 приведены графики скорости поезда, а на рис. 14, 16 и 18 – графики действующей на него тяговой силы ЛСД.

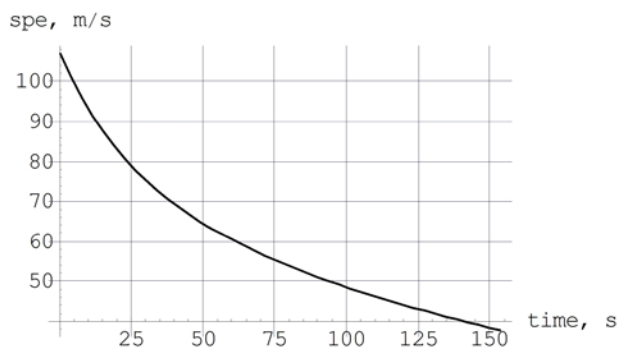


Рис. 13

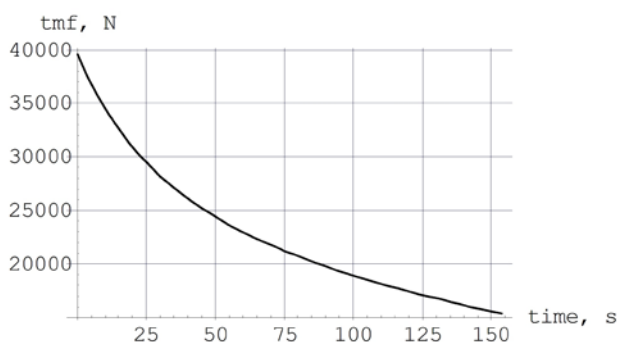


Рис. 14

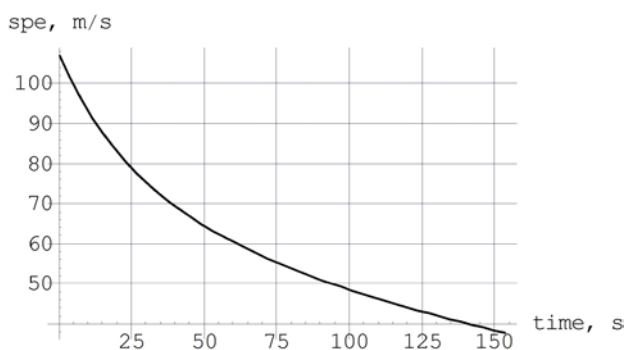


Рис. 15

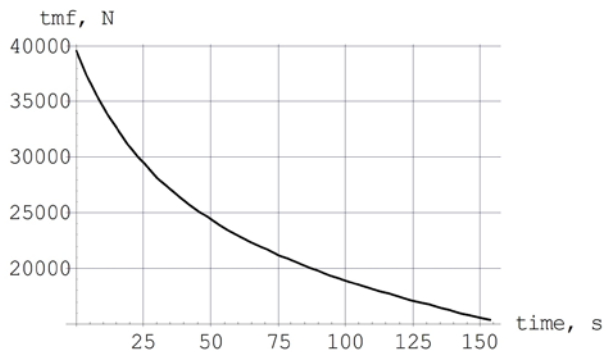


Рис. 16

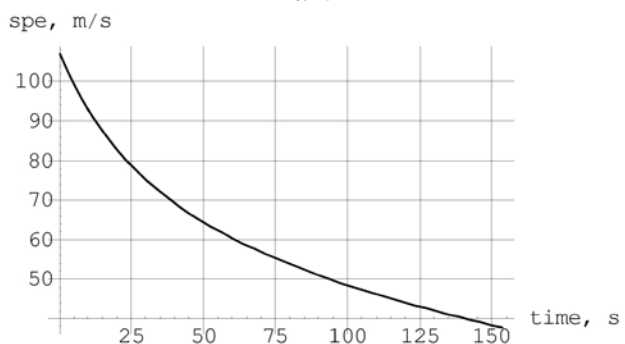


Рис. 17

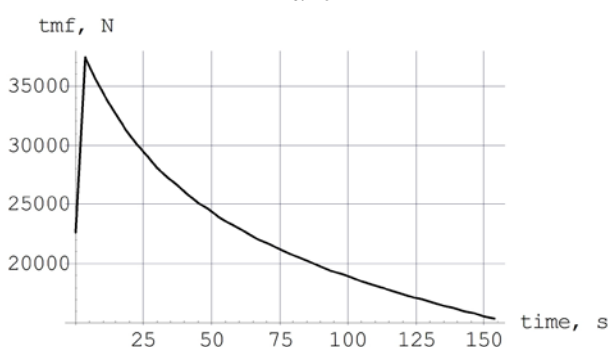


Рис. 18

Анализ результатов моделирования тормозных режимов движения МЛП приводит к следующим выводам. Режим служебного торможения при амплитудно-частотном и фазочастотном регулировании якорного напряжения двигателя по реализуемым тормозным характеристикам примерно равноценны. Оба они обеспечивают достаточную плавность изменения ускорения и скорости поезда. Пиковые значения ускорения при этом не превышают  $0,15 \cdot g$ , что вполне приемлемо. Реализация экстренного торможения приводит к значительным пиковым ускорениям – около  $0,22 \cdot g$ , устранить которые не представляется возможным. Однако такое кратковременное повышение ускорения в экстремальных ситуациях является оправданным.

#### Выводы

Путём компьютерного моделирования изучена динамика магнитолевитирующего поезда, подверженного естественным возмущениям и управляемого линейным синхронным двигателем, в режимах разгона, прохода тоннеля, а также служебного и экстренного торможения. Анализ полученных результатов позволил оценить динамические качества поезда в рассмотренных нестационарных режимах движения, а также его нагруженность в их процессе. Этим решена задача настоящей части исследования.

#### Список использованной литературы

1. Дзензерский В.А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В.А. Дзензерский, В.И. Омеляненко, С.В. Васильев, В.И. Матин, С.А. Сергеев. – К.: Наук. думка, 2001. – 479 с.
2. Antlauf W. Fast Tracks: Building the Shanghai Maglev / W. Antlauf, K. C. Coates // Civil Engineering – 2004. – № 11. P. 59 – 66.
3. Maglev Trains. Key Underlying Technologies / L. Zhigang, Z. Long – Springer, 2015. – 215 p.

4. Поляков В.А. Модель процесса реализации тяговой силы двигателя магнитолевитирующего поезда / В.А. Поляков, Н. М. Хачапуридзе // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – № 4 (64) –Дніпропетровськ, 2016. – С. 55 - 62.
5. Лебедев А.А. Динамики полёта беспилотных летательных аппаратов / А.А. Лебедев, Л.С. Чернобровкин – М.: Машиностроение, 1973 – 616 с.
6. Дзензерский В. А. Устойчивость вертикальных колебаний в системе электродинамического подвеса с дискретной путевой структурой / В.А. Дзензерский, А.А. Зевин, Л.А. Филоненко // Прикл. Механика. – 1995. – Т. XXXI, № 7. – С. 88 – 93.
7. Фудзиэ Дз. Наземный транспорт на подвесе на сверхпроводящих магнитах. II. Система подвеса на сверхпроводящих магнитах/ Дз. Фудзиэ // Дэнгакуси (Япония). – 1991. – Т. 3. – С. 457 – 459.

УДК 532.528:681.513

В.Н. СЕМЕНЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины

А.Ю. АНДРЕЙЦЕВ, Т.В. КРИЖАНОВСКАЯ, Т.Н. СЕМЕНЕНКО

Государственный университет инфраструктуры и технологий

### ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНЫХ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

Разработан новый метод активной стабилизации движения высокоскоростных подводных суперкавитирующих аппаратов по крену и метод управления их движением путем регулирования угла крена. Приведены результаты компьютерного моделирования маневрирования суперкавитирующего аппарата по курсу при управлении с помощью вертикальных гидродинамических рулей, проникающих из каверны в воду, и путем регулирования угла крена. Показано, что метод управления креном суперкавитирующего аппарата с целью его маневрирования по курсу является достаточно эффективным.

Ключевые слова: суперкавитирующий аппарат, управление, маневрирование, рули, крен, компьютерное моделирование.

В.М. СЕМЕНЕНКО

Институт гідромеханіки НАН України

А.Ю. АНДРЕЙЦЕВ, Т.В. КРИЖАНОВСЬКА, Т.М. СЕМЕНЕНКО

Державний університет інфраструктури та технологій

### ПРО ОДИН МЕТОД КЕРУВАННЯ РУХОМ ПІДВОДНИХ СУПЕРКАВІТУЮЧИХ АПАРАТІВ

Розроблено новий метод активної стабілізації руху високошвидкісних підводних суперкавітуючих апаратів по крену і метод управління їх рухом шляхом регулювання кута крену. Наведено результати комп'ютерного моделювання маневрування суперкавітуючого апарату за курсом при управлінні за допомогою вертикальних гідродинамічних рулів, що проникають з каверни у воду, і шляхом регулювання кута крену. Показано, що метод управління креном суперкавітуючого апарату з метою його маневрування за курсом є досить ефективним.

Ключові слова: суперкавітуючий апарат, управління, маневрування, рулі, крен, комп'ютерне моделювання.

V.N. SEMENENKO

Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine

A.Yu. ANDREYTSSEV, T.V. KRYZHANOVSKA, T.N. SEMENENKO

State University of Infrastructure and Technologies

### ON A METHOD OF CONTROL OF THE UNDERWATER SUPERCAVITATING VEHICLE MOTION

A new method of the active roll stabilization of a high-speed underwater supercavitating vehicle (briefly SC-vehicle), and a method of its motion control by the roll angle regulation have been developed. For computer simulation of dynamics of the self-propelled SC-vehicles with ventilated supercavities we use the approximation mathematical model of a SC-body 3D motion based on the principle of independence of the unsteady cavity section expansion by G.V. Logvinovich [1]. In our previous works [5–7], the comparative analysis of three methods of the SC-vehicle motion control was given: 1) inclination of the cavitator ( $\delta$ -control), 2) deflection of the propulsor thrust vector ( $\eta$ -control), 3) using the vertical and/or horizontal hydrodynamic cavity-piercing fins ( $f$ -control). The zero roll angle stabilization has to be ensured when the  $f$ -controlled SC-vehicle course maneuvering. We propose a method of active hydrodynamic stabilization of the SC-vehicle specified roll angle  $\theta$  with the help of both the special roll fin and the automatic error-closing control system. The small roll fin is located on the vehicle bottom tail part in the zone of the vehicle planing along the cavity wall (see Fig. 1). The same method can be used for the course control of the SC-vehicle motion ( $\theta$ -control). Results of computer simulation of the SC-vehicle course maneuvering with using both the vertical hydrodynamic cavity-piercing fins with the roll stabilization and the vehicle  $\theta$ -control are given. It has been shown that the method of the SC-vehicle  $\theta$ -control is sufficient effective for the course maneuvering.

Key words: supercavitating vehicle, control, maneuvering, rudders, roll, computer simulation.

**Постановка проблеми**

Єдинственным реальним путем достижения очень больших скоростей в воде является организация движения в режиме суперкавитации, когда вокруг тела с помощью специального носового кавитатора образуется полость, заполненная водяным паром или газом [1]. При этом сопротивление движению резко падает. Для разгрузки веса аппарата он должен глиссировать своей хвостовой частью по нижней поверхности суперкаверны. Основным параметром подобия суперкавитационных течений является число кавитации:

$$\sigma = \frac{2(p_{\infty} - p_c)}{\rho V^2}, \quad (1)$$

где  $p_{\infty}$  – давление в невозмущенном потоке;  $p_c$  – давление в каверне;  $\rho$  – плотность воды;  $V$  – скорость аппарата. Суперкавитационному режиму обтекания соответствуют малые значения числа кавитации  $\sigma < 0.1$ . При скоростях  $V > 100$  м/с число кавитации может достигать значений  $\sigma = 0.02$  и меньше.

В настоящее время актуальной и до конца не решенной является проблема управляемости и маневренности высокоскоростных подводных суперкавитирующих аппаратов (сокращенно СК-аппаратов) по глубине и по курсу.

**Анализ последних достижений и публикаций**

Динамика СК-аппаратов весьма сложна, причиной чего является нестационарное поведение образуемой телом каверны и сложный разрывный характер взаимодействия тела со стенками каверны. При этом основной практической проблемой оказалась неустойчивость продольного движения самодвижущихся СК-аппаратов по глубине и, как следствие, необходимость активной стабилизации их движения [2]. Практически стабилизация движения СК-аппаратов по глубине осуществляется путем автоматического регулирования угла наклона кавитатора (т.н.  $\delta$ -стабилизация). Второй практической проблемой является выбор оптимального метода управления движением СК-аппарата, обеспечивающего заданные параметры его маневренности по курсу [3, 4].

В наших предыдущих работах [5–7] дан сравнительный анализ трех методов управления движением СК-аппаратов: 1) наклон кавитатора с двумя степенями свободы ( $\delta$ -управление), 2) отклонение вектора тяги движителя с двумя степенями свободы ( $\eta$ -управление), и 3) использование вертикальных и горизонтальных гидродинамических рулей, проникающих из каверны в воду ( $f$ -управление).

В нашей работе [8] показано, что возможности маневрирования СК-аппаратов по курсу при любом методе управления ограничены вследствие возникающей деформации каверны и, как следствие, замыва корпуса аппарата. В [8] дан простой метод оценки минимального допустимого радиуса циркуляции для конкретного СК-аппарата.

**Цель исследования**

В данной статье исследуется новый метод управления движением СК-аппарата путем регулирования угла крена аппарата  $\theta$  (т.н.  $\theta$ -управление, аналогичное известному в авиации типу управления “bank-to-turn”). Приводятся примеры компьютерного моделирования маневрирования по курсу самодвижущихся СК-аппаратов с использованием  $f$ -управления и  $\theta$ -управления.

**Изложение основного материала исследования**

**1. Расчетный метод и расчетная модель.** Для компьютерного моделирования динамики самодвижущихся подводных СК-аппаратов мы используем аппроксимационную математическую модель нестационарной суперкаверны, основанную на принципе независимости расширения сечений суперкаверны Г.В. Логвиновича [1]. Она включает следующие уравнения и соотношения:

- уравнения динамики твердого тела с шестью степенями свободы в связанной системе координат;
- уравнения для расчета формы нестационарной каверны и ее положения в поточной системе координат с учетом искажений, вызванных наклоном кавитатора и влиянием весомости (см. [9]);
- уравнения для давления в нестационарной вентилируемой каверне  $p_c(t)$ , которое определяется разностью между расходом газа на поддув каверны и уносом газа из каверны (см. [9]);
- соотношения, связывающие действующие гидродинамические силы и моменты с текущими параметрами тела и каверны. Компоненты силы при глиссировании модели в каверне вычисляются по формулам Э.В. Парышева (см. [6]). Для расчета сил на рулях и размеров каверн, образующихся за рулями, используются известные соотношения линейной теории суперкавитирующих крыльев малого удлинения (см. [7]).

Все вычисления, результаты которых приводятся ниже, проводились для расчетной модели подводного СК-аппарата, эскиз которой показан на рис. 1. Ее основные параметры: длина  $L = 5.0$  м;

диаметр цилиндрической части  $D_b = 340$  мм; диаметр кавитатора  $D_n = 70$  мм; масса  $m = 600$  кг; моменты инерции относительно осей аппарата  $I_x = 8$  кгм<sup>2</sup>,  $I_y = I_z = 900$  кгм<sup>2</sup>. Начальные параметры движения модели на маршевом режиме: скорость  $V_{cr} = 120$  м/с; глубина  $H = 5.0$  м. При этом число кавитации  $\sigma = 0.02$ ; длина каверны  $L_{cr} = 6.555$  м; объемный расход газа на поддув каверны  $\dot{Q}_{in} = 72.125$  л/с. Равновесные значения параметров при установившемся продольном движении модели без рулей в режиме глиссирования в каверне: угол наклона кавитатора  $\delta_z = -5.774^\circ$ ; угол тангажа  $\psi = 0.371^\circ$ ; тяга движителя  $F_{cr} = 23.213$  кН.

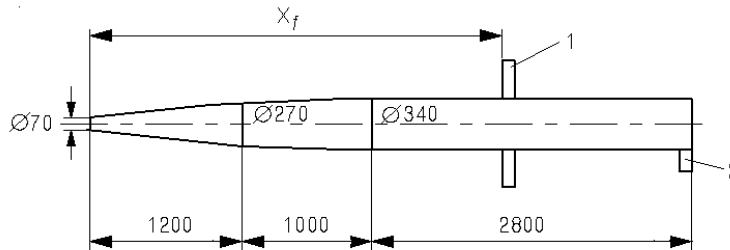


Рис. 1. Эскиз расчетной модели СК-аппарата:  
1 – вертикальный руль; 2 – руль крена

Модель может иметь пару одинаковых вертикальных рулей 1 и донный руль крена 2. Все рули имеют прямоугольную форму в плане и клиновидную форму в поперечном сечении. Положение и размеры вертикальных рулей:  $x_f = 2.3$  м, хорда 100 мм, высота 130 мм, угол клиновидности  $6^\circ$ ; размеры руля крена 2: хорда 50 мм, высота 80 мм, угол клиновидности  $6^\circ$ .

Любой способ управление движением СК-аппарата с целью его маневрирования по курсу должен создавать боковую центростремительную силу, приложенную к центру масс аппарата. Эффективность маневрирования по курсу характеризуется двумя параметрами: скорость изменения траекторного угла  $\chi = \varphi - \beta$  и радиус циркуляции  $r$ :

$$\dot{\chi} = V(s) \frac{d\chi}{ds}, \quad r = \frac{ds}{d\chi} = \frac{V}{\dot{\chi}}, \tag{2}$$

где  $V$  – скорость движения;  $\varphi$  – угол рыскания;  $\beta$  – угол скольжения;  $s$  – дуговая координата центра масс аппарата вдоль траектории.

**2. Особенности управления движением СК-аппаратов.** Маневренностью подводного аппарата по курсу называется его способность совершать циркуляцию заданного радиуса в горизонтальной плоскости. Простой анализ показывает, что из-за малости поверхностей контакта с водой высокоскоростные СК-аппараты способны совершать циркуляции с минимальным радиусом, на 2–3 порядка большим, чем при сплошном обтекании [5]. Как показано в работе [8], возможности маневрирования СК-аппаратов по курсу дополнительно ограничены из-за деформации каверны и, как следствие, замыва корпуса аппарата. В [8] дан простой метод оценки минимального радиуса циркуляции для конкретного СК-аппарата с дисковым кавитатором.

Анализ показал, что наиболее эффективным элементом управления движением СК-аппарата является кавитатор ( $\delta$ -управление). Оказалось однако, что для достижения допустимых по [8] радиусов циркуляции  $\delta$ -управление часто является недостаточным, поскольку угол наклона кавитатора ограничен некоторым максимальным значением  $\delta_{max}$ . К тому же кавитатор обычно используется для стабилизации движения по глубине [2, 6]. Поэтому на практике приходится использовать дополнительные органы управления, такие как проникающие из каверны в воду гидродинамические рули ( $f$ -управление).

Маневрирование СК-аппарата путем  $f$ -управления сопряжено с существенным возрастанием сопротивления движению и, следовательно, с потерей скорости движения при постоянной тяге движителя. В случае высокоскоростных СК-аппаратов рули, проникающие из каверны в воду, будут обтекаться в режиме суперкавитации. При этом эффективность таких органов управления резко уменьшается по сравнению со случаем их сплошного обтекания. Кроме того, при изменении эффективного угла атаки рулей  $\alpha_f$  может происходить скачкообразное изменение боковой силы, сопровождающееся гистерезисным эффектом.

Поскольку вследствие несимметрии каверны боковые силы на вертикальных рулях обычно различны, возникает суммарный осевой момент:

$$M_{fx} = F_{fz2}y_{fv2} - F_{fz1}y_{fv1}, \quad (3)$$

где  $y_{fv1}$ ,  $y_{fv2}$  – расстояния от точек приложения сил на вертикальных рулях соответственно  $F_{fz1}$ ,  $F_{fz2}$  до продольной оси аппарата. Здесь индексы 1 и 2 относятся соответственно к нижнему и верхнему вертикальным рулям. Этот момент приводит к увеличению угла крена аппарата  $\theta$  и, следовательно, к неблагоприятному изменению направления действия управляющих сил. Действительно, при увеличении угла крена уменьшаются проекции сил, действующих на вертикальные рули, на горизонтальную плоскость. Таким образом, при  $f$ -управлении движением СК-аппарата необходимо стабилизировать движение не только по глубине, но и по крену.

Ранее нами было показано, что наиболее эффективным при маневрировании СК-аппарата по курсу является носовое расположение гидродинамических рулей (схема "утка") [7]. При смещении рулей в корму их эффективность уменьшается приблизительно по линейному закону. Традиционное кормовое расположение рулей является неприемлемым для целей маневрирования СК-аппарата.

Метод управления посредством отклонения вектора тяги движителя, широко применяемый в авиации и ракетостроении ( $\eta$ -управление), применительно к движению СК-аппаратов с гидродинамической точки зрения эквивалентен управлению с помощью кормовых рулей, т.е. является неэффективным.

**3. Стабилизация СК-аппарата по крену.** Как было сказано выше, при маневрировании СК-аппаратов по курсу с помощью  $f$ -управления необходимо обеспечивать стабилизацию СК-аппарата по крену. Стабилизация СК-аппарата по крену может осуществляться пассивным и активным способами. Пассивная стабилизация нулевого угла крена осуществляется при наличии у аппарата метацентрической высоты (как у надводных судов и подводных лодок).

Метацентрическая высота аппарата  $h_M$  представляет собой расстояние между центром поперечного сечения аппарата и его центром масс. Если центр масс аппарата лежит ниже центра сечения на величину  $h_M$ , то при крене аппарата на угол  $\theta$  возникает восстанавливающий момент относительно продольной оси:

$$M_{gx} = -h_M mg \cos\psi \sin\theta, \quad (4)$$

где  $\psi$  – угол тангажа. В результате во время движения аппарат будет испытывать низкочастотные колебания по крену около значения  $\theta = 0$ . Иными словами, при  $h_M > 0$  аппарат является статически устойчивым относительно возмущений нулевого угла крена.

На практике применительно к высокоскоростным СК-аппаратам, в отличие от надводных водоизмещающих судов, эффективность пассивной стабилизации по крену ограничена из-за малости реально достижимых величин  $h_M$ . Известен также метод пассивной гидродинамической стабилизации по крену с помощью V-образной системы крыльев, проникающих из каверны в воду [10]. Их параметры подбираются таким образом, чтобы при крене аппарата крылья создавали суммарный восстанавливающий осевой момент  $M_{fx}$ .

Для активной стабилизации нулевого угла крена мы предлагаем использовать специальный вертикальный руль крена (см. рис. 1). Руль крена 2 расположен в донной хвостовой части СК-аппарата в области глиссирования аппарата по нижней границе каверны, вследствие чего его применение лишено недостатков, присущих гидродинамическим рулям, проникающим из каверны в воду. Его размеры могут быть значительно меньше, чем размеры вертикальных рулей, так как он служит не для создания боковой силы, а только для создания осевого момента.

Закон обратной связи для автоматической системы регулирования угла отклонения руля крена  $\delta_{fb}$  для поддержания заданного угла крена  $\theta = \theta_2$  задается в виде известного в авиации и судостроении "простого автопилота" [11, 12]:

$$\delta_{fb}(t) = -u_1[\theta(t-t_1) - \theta_2] - u_2\omega_x(t-t_1), \quad (5)$$

где  $u_1 \geq 0$ ,  $u_2 \geq 0$  – коэффициенты обратной связи (передаточные числа);  $t_1$  – время задержки срабатывания исполнительного устройства;  $\omega_x$  – угловая скорость относительно продольной оси аппарата. При этом для изменения угла отклонения руля крена вводится конструктивное ограничение:

$$|\delta_{fb}(t)| \leq \delta_{fb1}, \quad t > t_{beg}, \quad (6)$$

где  $t = t_{beg}$  – момент начала работы руля крена. На рис. 2 показана структурная схема системы автоматической стабилизации угла крена СК-аппарата по закону (5) с одним контуром обратной связи и одним усилителем  $A$ .

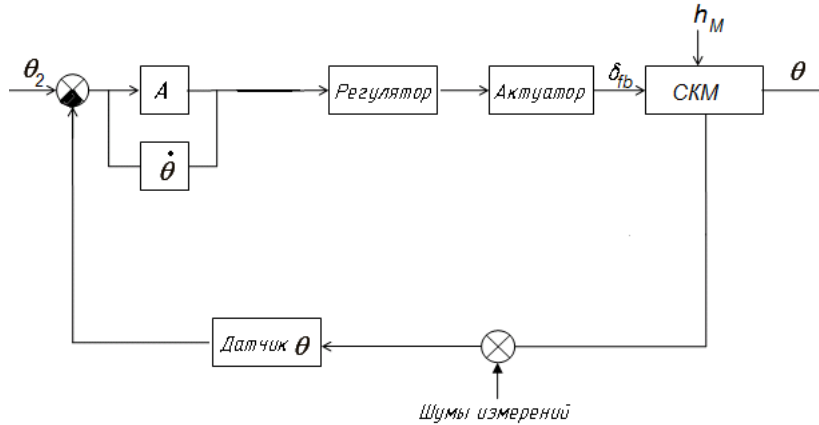


Рис. 2. Структурная схема одноконтурной автоматической системы стабилизации угла крена СК-аппарата

**4. Алгоритм  $\theta$ -управления СК-аппаратом по курсу.** Метод  $\theta$ -управления движением СК-аппарата по курсу (или управление типа "bank-to-turn") основан на том, что при изменении угла крена  $\theta$  суперкавитирующей модели в трехмерном движении изменяется эффективный угол наклона кавитатора в горизонтальной плоскости, а, следовательно, и проекции вектора силы, действующей на кавитатор. Действительно, крен аппарата на угол  $\theta$  с одновременным наклоном кавитатора на угол  $\delta'_z$  эквивалентен наклону кавитатора в двух плоскостях на углы  $\delta'_z$  и  $\delta'_y$  при  $\theta = 0$ . Можно показать, что углы  $\delta'_z$ ,  $\theta$ ,  $\delta'_z$  и  $\delta'_y$  связаны соотношениями:

$$\operatorname{tg} \delta'_z = \frac{\operatorname{tg} \delta'_z}{\cos \theta}, \quad \operatorname{tg} \delta'_y = \frac{\operatorname{tg} \delta'_z}{\sin \theta}. \tag{7}$$

Таким образом, при  $\theta$ -управлении движением СК-аппарата активным управляющим элементом является кавитатор, поэтому оно так же эффективно, как  $\delta$ -управление. Нужный крен аппарата  $\theta_2 \neq 0$  достигается при помощи руля крена 2 (см. рис. 1). При этом возникает проблема установления и поддержания необходимого угла крена модели  $\theta_2$ . Для решения этой проблемы нами предложен следующий алгоритм:

- 1) на временном отрезке  $0 < t < t_{beg}$  считается, что руль крена отсутствует, при этом модель движется без крена:  $\theta = 0, \omega_x = 0$ ;
- 2) в момент времени  $t = t_{beg}$  руль крена отклоняется на заданный угол  $\delta_{fb} = \delta_{fb0}$ . При этом угол крена модели  $\theta$  и угловая скорость относительно оси модели  $\omega_x$  начинают возрастать;
- 3) в момент, когда  $\theta = \theta_1 / 2$  (где  $\theta_1$  – некоторый пробный угол крена), угол отклонения нижнего руля изменяется на противоположный  $\delta_{fb} = -\delta_{fb0}$ . В результате угловая скорость  $\omega_x$  начинает уменьшаться, а угол крена модели  $\theta$  продолжает расти;
- 4) в момент, когда  $\omega_x = 0$  (при этом угол крена принимает значение  $\theta = \theta_2$ ) угол отклонения руля крена устанавливается равным нулю и включается система автоматической стабилизации угла крена  $\theta_2$  (5).

Заметим, что при использовании  $\theta$ -управления движением СК-аппарата наличие метацентрической высоты  $h_M > 0$  играет отрицательную роль, поскольку при стабилизации необходимого значения угла крена  $\theta_2$  автоматической системе управления приходится постоянно преодолевать осевой момент (3), стремящийся установить нулевое значение угла крена  $\theta = 0$ .



**5. Примеры компьютерного моделирования.** Примем дополнительно к перечисленным выше следующие параметры расчетной модели СК-аппарата: положение центра масс  $x_c = 3.5$  м; метацентрическая высота  $h_M = 28$  мм. При этом равновесные значения угла наклона кавитатора  $\delta_z$  и угла тангажа модели  $\psi$  равны:  $\delta_z^* = -4.313^\circ$ ,  $\psi^* = 0.3362^\circ$ . Все расчеты проводились при включенной системе автоматической  $\delta$ -стабилизации движения СК-аппарата по глубине [6]:

$$\delta_z(t) = \delta_z^* + k_1 \bar{y}_c(t - t_1) + k_2(\psi(t - t_1) - \psi^*) - k_3 \omega_z(t - t_1), \quad (8)$$

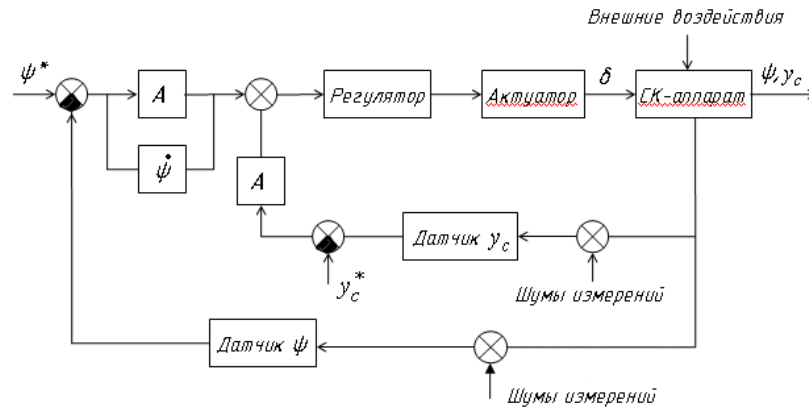


Рис. 3. Схема двухконтурной системы  $\delta$ -стабилизации движения СК-аппарата по глубине

где  $k_1, k_2, k_3$  – неотрицательные коэффициенты обратной связи;  $\bar{y}_c = y/L$  – отклонение центра масс аппарата от горизонтальной траектории;  $\omega_z$  – угловая скорость относительно поперечной оси аппарата. Для данной модели в расчетах использовались значения коэффициентов  $k_1 = 2.0, k_2 = 5.0, k_3 = 0$ . На рис. 3 показана структурная схема системы автоматической  $\delta$ -стабилизации движения СК-аппарата по глубине по закону (8) с двумя контурами обратной связи и двумя усилителями  $A$ .

**Пример 1. Стабилизация нулевого угла крена при  $f$ -управлении СК-аппаратом.** На рис. 4, а, б представлены графики изменения угла отклонения руля крена модели  $\delta_{fb}$  (а) и соответствующих достигнутых значений угла крена  $\theta$  (б) на начальном интервале  $0 < t < 5.0$  с при работе системы автоматической  $\theta$ -стабилизации угла крена  $\theta = 0$ . Расчеты проводились при следующих значениях параметров управления:  $\delta_{fv} = 5.0^\circ$ ;  $u_1 = 0.1$ ;  $u_2 = 0.3$ ;  $\delta_{fu1} = 10.0^\circ$ .

Как видно, после окончания переходного процесса обе функции  $\delta_{fb}(t), \theta(t)$  принимают форму установившихся квазипериодических колебаний с основной частотой 6.80 Гц. При этом достигаются параметры маневра  $\dot{\chi}_m = 7.645^\circ/\text{с}$ ,  $r = 0.888$  км.

Для сравнения заметим, что при отсутствии  $\theta$ -стабилизации нулевого угла крена движение модели в этом примере продолжается только 0.3 с, после чего модель оказывается замытой водой. При этом угол крена модели в момент  $t = 0.3$  с составил  $\theta = 140^\circ$ .

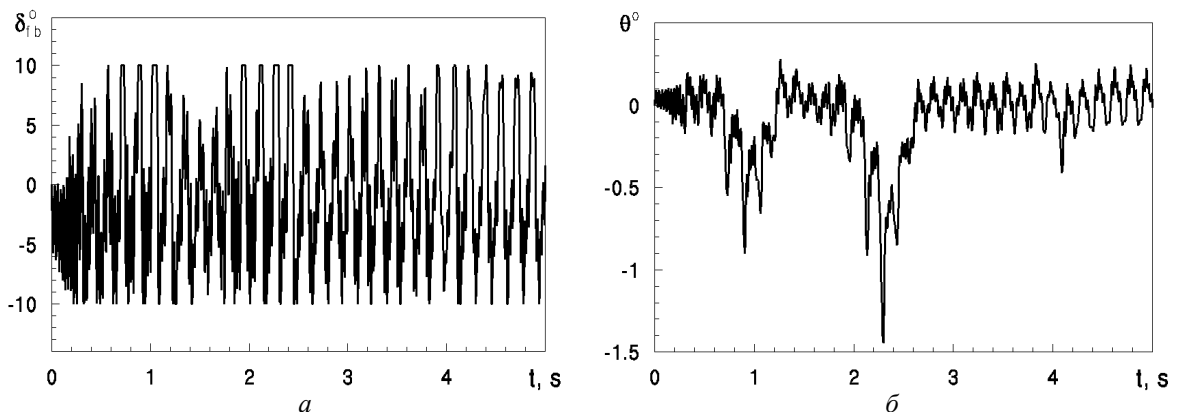


Рис. 4. Работа системы автоматической стабилизации нулевого угла крена СК-аппарата: а –  $\delta_{fb}(t)$ ; б –  $\theta(t)$

**Пример 2. Установление и стабилизация заданного угла крена СК-аппарата.** Будем теперь считать, что вертикальные рули у СК-аппарата отсутствуют, и рассмотрим работу системы автоматического установления и стабилизации заданного угла крена по алгоритму, описанному выше в Разделе 4.

На рис. 5, а представлен график зависимости угла отклонения руля крена модели  $\delta_{fb}$  от времени при работе системы автоматического установления и стабилизации угла крена  $\theta_2 = 15.0^\circ$ . Расчеты проводились при следующих значениях основных параметров:  $\theta_1 = 17.6^\circ$ ;  $t_{beg} = 1.0$  с;  $u_1 = 0.1$ ,  $u_2 = 0.3$ ;  $\delta_{fu1} = 10.0^\circ$ . График соответствующего изменения угла крена  $\theta$  представлен на рис. 5, б.

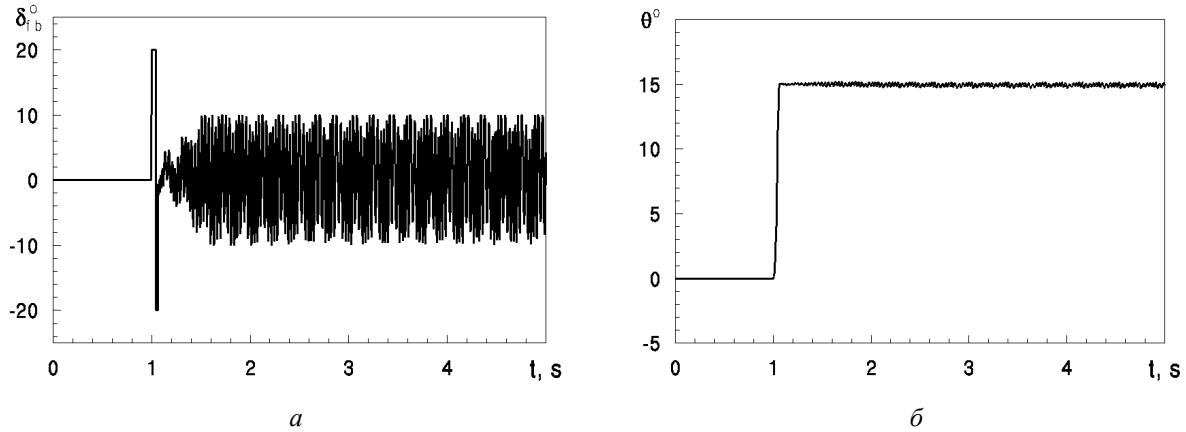


Рис. 5. Работа системы автоматического установления и стабилизации заданного угла крена  $\theta = 15.0^\circ$ : а –  $\delta_{fu}(t)$ ; б –  $\theta(t)$

**Пример 3. Маневрирование СК-аппарата по курсу с помощью  $\theta$ -управления.** Исследуем эффективность  $\theta$ -управления движением СК-аппарата при его маневрировании по курсу. В таблице 1 приведены результаты расчета средней скорости поворота модели по курсу  $\dot{\chi}_m$  и радиуса циркуляции  $r$  для ряда значений угла крена  $\theta$ . Расчеты для каждой колонки таблицы 1 проводились при постоянном значении угла крена модели  $\theta$  на дистанции 1.0 км при  $x_c = 2.5$  м и  $h_M = 0$ .

Таблица 1

Зависимость скорости поворота СК-аппарата и радиуса циркуляции от угла крена

$\theta^\circ$	0	2.0	5.0	10.0	20.0	30.0	40.0
$\dot{\chi}_m, \text{ }^\circ/\text{с}$	0	-0.417	-0.743	-0.849	-1.715	-2.711	-3.942
$r, \text{ км}$	$\infty$	37.5	16.5	8.09	4.01	2.54	1.74

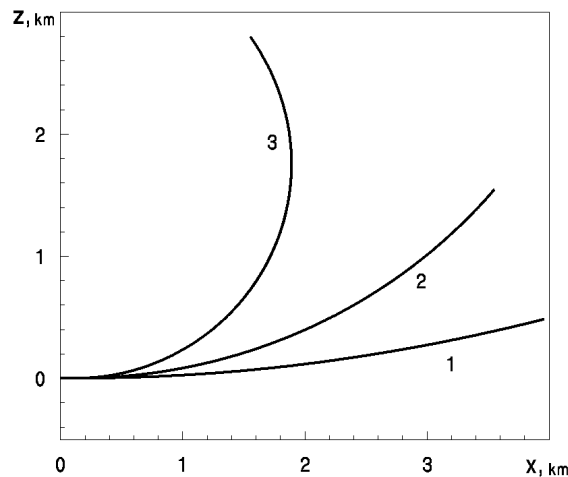


Рис. 6. Формы траектории СК-аппарата при  $\theta$ -управлении:

$$1 - \theta_2 = 6.61^\circ; \quad 2 - \theta_2 = 20.85^\circ; \quad 3 - \theta_2 = 44.24^\circ$$

На рис. 6 показаны рассчитанные формы траекторий центра масс модели (проекция на горизонтальную плоскость) на дистанции 4.0 км при  $\theta$ -управлении для ряда значений регулируемого угла крена  $\theta_2$ . Сравнение с [5] показывает, что  $\theta$ -управление движением СК-аппарата для его маневрирования по курсу так же эффективно, как  $\delta$ -управление.

#### Выводы

Предложен новый метод активной стабилизации самодвижущихся СК-аппаратов по крену с помощью специального донного руля крена и автоматической системы управления с обратной связью. Показано, что стабилизация нулевого угла крена необходима при маневрировании СК-аппаратов по курсу с помощью  $f$ -управления.

Тот же метод может быть использован для  $\theta$ -управления движением высокоскоростного подводного СК-аппарата по курсу путем установления заданного угла крена  $\theta_2$  и дальнейшей автоматической стабилизации этого угла.

Поскольку при  $\theta$ -управлении движением СК-аппарата активным управляющим элементом является кавитатор, то  $\theta$ -управление обладает теми же достоинствами и ограничениями, что и  $\delta$ -управление [9]. В результате сравнительного анализа достоинств и недостатков каждого из рассмотренных четырех методов управления движением СК-аппарата по курсу можно сделать вывод, что предложенный метод  $\theta$ -управления является достаточно эффективным и в пределах своей эффективности является оптимальным.

#### Список использованной литературы

1. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами / Г.В. Логвинович. – Киев: Наукова думка, 1969. – 208 с.
2. Dzielski J. A benchmark control problem for supercavitating vehicles and an initial investigation of solution / J. Dzielski, A. Kurdila // Journal of Vibration and Control, 2003, 19(7), pp. 791–804.
3. Kirschner I. Control strategies for supercavitating vehicles / I. Kirschner, D.C. Kring, A.W. Stokes, N.E. Fine, J.S. Uhlman // Journal of Vibration and Control, 2002, Vol. 8, pp. 219 – 242.
4. Ruzzene M. Trajectory optimization strategies for supercavitating underwater vehicles / M. Ruzzene, R. Kamada, C.L. Botasso, F. Scorcelletti // Journal of Vibration and Control, 2008, 14(5), pp. 611–644.
5. Савченко Ю.Н. О маневренности по курсу подводных суперкавитирующих аппаратов / Ю.Н. Савченко, В.Н. Семенов // Прикладна гідромеханіка. – 2011. – Т. 13, № 1. – С.43–50.
6. Semenenko V.N. Study of the supercavitating body dynamics / V.N. Semenenko, Ye.I. Naumova // In book: Supercavitation: Advances and Perspectives. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 2012, pp. 147–176.
7. Semenenko V.N. Prediction of supercavitating vehicle maneuvering / V.N. Semenenko // Proceedings of the 11th International Scientific School "High Speed Hydrodynamics & Shipbuilding (HSH-2013)", 20–26 June 2013, Cheboksary, Russia.
8. Савченко Ю.Н. Особенности маневрирования при суперкавитационном обтекании / Ю.Н. Савченко, В.Н. Семенов, Г.Ю. Савченко // Прикладна гідромеханіка. – 2016. – Т. 18, № 1. – С.79–82.
9. Semenenko V.N. Artificial cavitation. Physics and calculations / V.N. Semenenko // VKI Special Course on Supercavitating Flows. – RTO EN-010, VKI, Brussels, Belgium, 2001.
10. Savchenko Yu.N. Control of supercavitation flow and stability of supercavitating motion of bodies / Yu.N. Savchenko // VKI Special Course on Supercavitating Flows. – RTO EN-010, VKI, Brussels, Belgium, 2001.
11. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами / В.А.Боднер. – М.: Машиностроение, 1973. – 506 с.
12. Лукомский Ю.А. Системы управления морскими подвижными объектами / Ю.А. Лукомский, В.С. Чугунов. – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.

УДК 666.97.033.16

И.Н. СИВАК, Ю.В. ЧОВНЮК

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

В.Т. КРАВЧУК

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

## УТОЧНЁННЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ФОРМЫ С БЕТОННОЙ СМЕСЬЮ ПРИ РАЗНОНАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Составлены математические модели взаимодействия бетонной смеси с днищем вибрационной формы при вертикальных и горизонтальных колебаниях, а также с вертикальными стенками вибрационной формы при горизонтально направленных колебаниях. Уплотняемая среда представлена в виде сплошной среды с распределёнными параметрами. В результате решения уравнения колебаний уплотняемой среды в частных производных, удовлетворяющего заданным граничным условиям при разнонаправленных колебаниях, определена закономерность деформирования уплотняемой среды в зависимости от нарастающей во времени плотности формируемой смеси, её физико-механических характеристик, толщины уплотняемого слоя, массы вибрационной формы, частоты и амплитуды возмущающей силы. Определены приведенные массы и коэффициент сопротивления бетонной смеси при разнонаправленных колебаниях, действующих на днище и вертикальные стенки вибрационной формы. Определены амплитуды колебаний вибрационной формы и напряжения, возникающие в уплотняемой среде. Исследованы основные характеристики свободных колебаний, возникающих в системе.

Ключевые слова: вибрационная форма, колебания, взаимодействие, уплотняемая среда.

I.M. SIVAK, Y.V. CHOVNYUK

Национальний університет біоресурсів і природокористування України

V.T. KRAVCHUK

Київський національний університет будівництва і архітектури

## УТОЧНЕНИЙ АНАЛИЗ ВЗАЄМОДІЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ФОРМИ З БЕТОННОЮ СУМІШСЮ ПРИ РІЗНОСПРЯМОВАНИХ КОЛИВАННЯХ

Складено математичні моделі взаємодії бетонної суміші з днищем вібраційної форми при вертикальних і горизонтальних коливаннях, а також з вертикальними стінками вібраційної форми при горизонтально направлених коливаннях. Уцілююване середовище представлено у вигляді суцільного середовища з розподіленими параметрами. У результаті розв'язання рівняння коливань уцілююваного середовища у частинних похідних, що задовольняють заданим граничним умовам при різноспрямованих коливаннях, визначена закономірність деформування уцілююваного середовища у залежності від наростаючої у часі щільності формованої суміші, її фізико-механічних характеристик, товщини уцілююваного шару, маси вібраційної форми, частоти і амплітуди вимушеної сили. Визначено наведені маси і коефіцієнт опору бетонної суміші при різноспрямованих коливаннях, що діють на дно і вертикальні стінки вібраційної форми. Визначені амплітуди коливань вібраційної форми і напруги, що виникають в уцілююваному середовищі. Досліджені основні характеристики вільних коливань, виникаючих у системі.

Ключові слова: вібраційна форма, коливання, взаємодія, уцілююване середовище.

I.N. SIVAK, Y.V. CHOVNYUK

National University of Bioresources and Life Sciences of Ukraine

V.T. KRAVCHYUK

Kyiv National University of Construction and Architecture

## ASCERTAIN ANALYSIS OF THE INTERACTION BETWEEN VIBRATING FORM AND CONCRETE MIXTURE WITH DIFFERENTLY DIRECTED OSCILLATIONS

**Purpose.** To study the interaction of concrete mix with bottom and vertical walls vibrating shapes with differently directed oscillations. The concrete account of the forces of resistance of cement concrete mix largely determines the accuracy of the establishment of the law of vibrations of the vibrating form, the choice of her rational parameters and technological parameters of vibration exposure on the treated environment. These resistance forces arise in the vertical, horizontal and torsion (angular) vibrations at vibrating forms and they are performed simultaneously, they have different values. Therefore, for justification of rational parameters of vibrating the forms necessary to accurately determine the pattern of deformation generated environment in vertical and horizontal directions, and the deformation of the concrete environment of the side walls of the mold. **Methodology.**

*Mathematical model of interaction of concrete mix with bottom vibrating the forms with vertical and horizontal vibrations, vertical wall of the vibration shape at the horizontally directed oscillations. Here the sealing environment is presented in the form of continua with disturbed parameters. As a result of solutions to the equations of oscillations of the sealing medium equations, satisfying the given boundary conditions with differently directed oscillations, determined the pattern of deformation of the sealing medium depending on the rise time of the density of the moldable mixture, its physical and mechanical characteristics, the thickness of the sealing layer of the vibrating mass shape, frequency and amplitude of disturbing force. The free oscillations of the system are account as well. **Results.** On the basis of oscillation theory to continuum mechanics, studied the process of propagation of waves of deformation in the sealing environment, presented in the form of systems with disturbed parameters, and defined the law of deformation of the sealing medium with multidirectional vibrations acting on the bottom of the vibrating shape in the vertical and horizontal directions and the vertical wall of the vibration shape at the horizontally directed oscillations, subjected to horizontally directed vibrations from the vertical, closely spaced to each other walls of the vibrating shape. The theoretical expression that allows to accurately describe the behavior of a real dynamical system "form of vibratory-compacted environment" in the molding of concrete products from ready mix concrete by the application of multidirectional vibrations. The parameters of free and force oscillations of the system are calculated. **Originality.** The obtained theoretical expressions allow computer simulation of the laws of motion and mode shapes of the sealing layers of the concrete mix, to analyze them from the point of view of effective influence on the processed medium multidirectional vibrations, to justify the shape and form of vibration exposure, and to substantiate the rational parameters of vibrating equipment. **Practical value.** The proposed method of determining the laws of motion and basic parameters of vibration forms for compaction of concrete mixture will be widely used in the design of new vibrating machines for compacting concrete mixes.*

*Keywords: form vibration, oscillation, interaction, the sealing environment.*

### Постановка проблемы

Известно, что на характер колебаний вибрационной формы и эффективность обработки цементобетонных смесей большое влияние оказывают физико-механические характеристики обрабатываемой среды. В практике создания вибрационных машин их движение и определение основных параметров производят, как правило, рассматривая только вертикальные либо только горизонтальные колебания. При этом не учитывается вибрационное воздействие на бетонную среду, осуществляемое в другой плоскости. Правильный учёт сил сопротивления цементобетонной смеси во многом определяет точность установления закона колебаний вибрационной формы, выбора её рациональных параметров и технологических параметров вибрационного воздействия на обрабатываемую среду. Эти силы сопротивления возникают при вертикальных, горизонтальных и крутильных (угловых) колебаниях вибрационной формы, осуществляемые одновременно, и имеют при этом различные значения. Поэтому для обоснования рациональных параметров вибрационной формы необходимо точно определить закономерность деформирования формуемой среды в вертикальном и горизонтальном направлениях, а также деформирование бетонной среды боковыми стенками формы.

### Анализ последних исследований и публикаций

Авторы [1–3] исследовали основные физико-механические характеристики виброформируемых цементобетонных смесей. Созданию вибрационных машин с вертикально направленными колебаниями посвящены работы [4–6], а с горизонтально направленными колебаниями – работы [7–9].

Теория вибромашин для уплотнения строительных смесей на основе синтеза дискретно-континуальных систем предложена в работах [10–15], однако развитый в них подход некорректен, поскольку авторы используют метод разделения переменных (метод Фурье) для решения волнового уравнения при подвижных граничных условиях (что недопустимо!). Наиболее обоснованный подход к решению задач такого класса, по мнению авторов данного исследования, изложен в [16–20]. Именно его мы и будем придерживаться в дальнейшем изложении.

### Цель исследования

Цель работы – обоснование модели взаимодействия бетонной смеси с дном и вертикальными стенками вибрационной формы при разнонаправленных колебаниях, на основе которой проведен анализ основных параметров, характеризующих свободные и вынужденные колебания указанной смеси, а также установлены основные технологические параметры самой вибрационной формы, оптимизирующие процессы уплотнения и формообразования смеси.

### Изложение основного материала исследования

#### 1. Анализ собственных колебаний вибрационной формы с бетонной смесью.

##### 1.1. Взаимодействие вибрационной формы с обрабатываемой цементобетонной средой в вертикальном направлении.

Для определения характера взаимодействия вибрационной формы с обрабатываемой цементобетонной средой в вертикальном направлении авторы [15] исследовали динамическую систему "вибрационная форма – цементобетонная среда" следующим образом. Вибрационная форма считалась

конструктивно выполненной с плоским дном, а обрабатываемая среда представлялась в виде системы с распределёнными параметрами. Вибрационная форма установлена на основании при помощи упругих амортизаторов и на неё действует возмущение в виде вертикально направленной гармонической силы  $Q \sin \omega t$ .

Зависимость между напряжением и деформацией обрабатываемой цементобетонной среды в первом приближении авторами цитированной выше работы описывается известным уравнением:

$$\sigma = E \frac{\partial u(z,t)}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $u$  и  $z$  – эйлерова и лагранжева координаты;  $E$  – динамический модуль упругой деформации обрабатываемой цементобетонной смеси.

Дифференциальное уравнение движения уплотняемой смеси в направлении координаты  $z$  за время  $t$  будет иметь вид [21] (с учётом зависимости (1)):

$$E \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} = \rho \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность цементобетонной смеси.

В соответствии с работой [22], относительно уравнения (2) необходимо отметить следующее. Периодические возмущения, вызывающие упругие деформации среды, распространяются в ней с некоторой скоростью (в данном случае – в цементобетонной смеси эта скорость составляет  $a = \sqrt{E/\rho}$ ), зависящей от её физических свойств. В [15] указанная скорость  $a$  некорректно названа фазовой скоростью распространения возмущения в обрабатываемом слое (**следует знать, что фазовая скорость волны не переносит никакой энергии и никакого вещества!**). Процесс колебательного движения, при котором возмущение, вызвавшее деформацию, не сопровождается поступательным перемещением вещества, называется волновым. Необходимыми условиями распространения волн в среде являются её упругость (отсутствие пластического течения) и инертность (противодействие деформациям). При этом всегда различают продольные и поперечные волны. В случае продольных волн в твёрдом теле упругость характеризуется модулем упругости (модуль Юнга, здесь – это  $E$ ), а поперечных – модулем сдвига ( $G$ ). Во всех волновых процессах в формулу скорости распространения волны входят плотность среды ( $\rho$ ) и модуль Юнга ( $E$ ), характеризующие соответственно её инертность и упругость.

Уравнения, описывающие волновые процессы, являются гиперболическими. Получение их точных аналитических решений в случаях незатухающих (вынужденных) колебаний, происходящих под действием некоторой возмущающей силы, представляет значительные трудности. Решения подобных задач получены лишь в отдельных частных случаях при конкретно заданных законах изменения возмущающей нагрузки [23–28]. При этом рассмотрение вопросов, связанных с решением проблемы бесконечной скорости распространения потенциалов исследуемых полей (деформаций и напряжений), в известной литературе авторами данного исследования не обнаружено. Однако, как показали выполненные в настоящей работе исследования, учёт релаксационных свойств среды (цементобетонной смеси) приводит к существенному отличию колебательного процесса по сравнению со случаем их неучёта. Учёт этих свойств позволяет устранить проблему скачкообразного изменения напряжений, деформаций и смещений в обрабатываемой среде во времени, возникающую ввиду заложенной в формуле закона Гука (1) бесконечной скорости распространения возмущений. В самом деле, продольное напряжение  $\sigma$  и деформация  $\varepsilon = \partial u(z,t)/\partial z$  здесь не разделены во времени (в формуле закона Гука отсутствует напрямую время). Устранение проблемы бесконечной скорости приводит к существенному изменению не только формы колебаний, но и времени затухания колебательного процесса.

Таким образом, уравнение (2) описывает незатухающие колебания упругих тел (цементобетонной смеси). Для того, чтобы учесть затухание колебаний, волновое уравнение должно содержать слагаемые, учитывающие силы внутреннего трения. Согласно формуле (1) закона Гука, напряжение в смеси, вызванное некоторой силой, мгновенно (скачком) достигает соответствующих этой силе величин, то есть в этом законе заложена бесконечная скорость распространения возмущений. Однако скорости распространения любых физических величин не могут принимать бесконечных значений, и, следовательно, как напряжение, так и величина  $\varepsilon$  не могут мгновенно достигать любых конкретных величин. В реальной физической среде их изменения происходят с некоторым запаздыванием во времени согласно релаксационным свойствам материала (цементобетонной смеси), учитываемым некоторым коэффициентом  $\tau_r$  (коэффициентом

релаксации). Используя подход [22], можно получить уравнение, описывающее изменение продольного перемещения цементобетонной смеси  $u(z,t)$  с учётом релаксационных свойств обрабатываемой среды:

$$\tau_r \frac{\partial^3 u(z,t)}{\partial t^3} + \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} + a^2 \cdot \tau_r \cdot \frac{\partial^3 u(z,t)}{\partial z^2 \partial t}. \quad (3)$$

В уравнении (3) отсутствуют члены, учитывающие внутреннее сопротивление цементобетонной смеси при воздействии на неё нагрузки, вызывающей упругие перемещения её участков. Для учёта сопротивления среды примем, что сила сопротивления пропорциональна скорости изменения перемещения во времени:

$$F_c = -r \cdot \frac{du(z,t)}{dt}, \quad (4)$$

где знак "минус" означает, что сила сопротивления  $F_c$  имеет направление, противоположное скорости изменения перемещения;  $r = a^2 \cdot \tau_r / \delta^2$  – коэффициент сопротивления, имеющий размерность  $c^{-1}$ ,  $\delta \equiv H$  – толщина обрабатываемого слоя цементобетонной смеси.

Таким образом, коэффициент  $r$  при фиксированных значениях  $a$  и  $H$  зависит лишь от коэффициента релаксации  $\tau_r$ . Коэффициент  $r$  принят в таком виде, чтобы размерность соотношения  $-r \cdot du/dt$  совпадала с размерностью всех других членов уравнения (3).

Для выполнения второго закона Ньютона (являющегося уравнением закона сохранения энергии в механике) применительно к затухающим колебаниям в цементобетонной смеси соотношение (4) подставим в правую часть уравнения (3):

$$\tau_r \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \tau_r \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \right) - r \cdot \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (5)$$

Найдём точное аналитическое решение краевой задачи о затухающих колебаниях цементобетонной смеси, неподвижной на её поверхности ( $z = H$ ) и на линии контакта с дном формы ( $z = 0$ ). По сути, это решение описывает (свободные, собственные) колебания в смеси при отсутствии внешних возмущающих сил. Математическая постановка задачи в данном случае имеет вид, аналогичный представленному в [22], а именно:

$$r \cdot \frac{\partial u(z,t)}{\partial t} + \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} + \tau_r \cdot \frac{\partial^3 u(z,t)}{\partial t^3} = a^2 \cdot \left\{ \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} + \tau_r \cdot \frac{\partial^3 u(z,t)}{\partial z^2 \partial t} \right\}, \quad (t > 0; 0 < z < H). \quad (6)$$

$$u(z,0) = \frac{\rho g}{E} \cdot z \cdot (H - z), \quad \partial u(z,0)/\partial t = 0, \quad \partial^2 u(z,0)/\partial t^2 = 0, \quad u(0,t) = 0, \quad u(H,t) = 0. \quad (7)$$

В (7)  $g$  – ускорение свободного падения. Ввиду громоздкости это решение, полученное в [22], здесь не представлено. Анализ результатов расчётов перемещений смеси по формуле (3.35) [22] позволяет заключить, что для

$$a \cdot \tau_r / H \leq 10^{-4} \quad (8)$$

практически получаются незатухающие колебания в смеси.

Ниже, в табл. 1 представлены возможные значения  $\tau_r$  для типичных значений  $a$  в цементобетонной смеси и высот  $H$  формуемых изделий.

Таблица 1

Значения  $\tau_r$ , с для различных значений  $a$  и  $H$

H, м	a, м/с			
	30	50	70	100
0,2	$6,7 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-7}$	$2,9 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-7}$
0,5	$1,7 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$7,1 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-7}$
1,0	$3,0 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$

Анализ результатов, представленных в табл. 1, позволяет утверждать, что с увеличением высоты слоя формуемой цементобетонной смеси при неизменной скорости распространения возмущений в ней, предельное значение времени релаксации, когда можно считать колебания в смеси незатухающими, возрастает. Для одного и того же значения толщины слоя формуемой смеси, при увеличении скорости распространения возмущений в ней предельное значение времени релаксации для незатухающих колебаний уменьшается.

Из неравенства (8) следует, что время распространения возмущения по всей длине формуемого изделия ( $H/a$ ) должно быть, как минимум, в  $10^4$  раз больше, чем время релаксации колебаний в смеси ( $\tau_r$ ). Тогда можно считать, что данная цементобетонная смесь способна поддерживать незатухающие колебания, а расчёты, проведенные в [15], справедливы. В иной ситуации необходимо, кроме решения (2), определяющего вынужденные колебания в смеси, учитывать также и собственные (свободные) колебания смеси, что значительно усложняет все расчёты.

**1.2. Взаимодействие вибрационной формы с обрабатываемой цементобетонной средой в горизонтальном направлении.**

Цементобетонная смесь при сдвиговых деформациях, так же как и при нормальных деформациях, обладает инерционными свойствами. Однако при действии сдвиговых деформаций в бетонной смеси, возникающих в результате крутильных колебаний вибрационной формы, определение характеристик взаимодействия вибрационной формы с бетонной смесью при помощи волновой теории колебаний представляет собой довольно сложную задачу. Поэтому для определения сил сопротивления цементобетонной смеси при сдвиговых деформациях следует, по нашему мнению, воспользоваться косвенными методами. В этом случае расчётная схема динамической системы "вибрационная форма – цементобетонная смесь" представляется следующим образом. Вибрационная форма имеет плоское днище и установлена на основании на упругих амортизаторах. На неё действует возмущение в виде горизонтально направленной гармонической силы  $Q \sin \omega t$ . (Здесь, в этом пункте исследования, рассмотрены собственные колебания вибрационной формы).

При колебаниях вибрлотка, на него со стороны цементобетонного слоя будет действовать сила кулонова трения

$$R = m_b g f_{mp} = FH \rho g f_{mp}, \tag{9}$$

где  $F$  – площадь днища вибрационной формы,  $m_b$  – масса обрабатываемого слоя смеси,  $f_{mp}$  – коэффициент трения цементобетонного слоя с днищем вибрационной формы;  $H$  – высота обрабатываемого слоя смеси.

На основании выражения (9), движение вибрационной формы в горизонтальном направлении может быть описано следующим нелинейным уравнением:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c_2 y + \Psi(t) = Q \sin \omega t, \tag{10}$$

где  $m$  – масса вибрационной формы,  $y$  – перемещение вибрационной формы в горизонтальном направлении;  $c_2$  – коэффициент жёсткости упругих амортизаторов в горизонтальном направлении;  $\Psi(t)$  – нелинейная функция:

$$\Psi(t) = R \cdot \text{sign} \left( \frac{dy}{dt} \right). \tag{11}$$

Можно предположить, что вибрационная форма под действием гармонической силы  $Q \sin \omega t$  будет совершать периодические колебания с частотой  $\omega$  (т.е. вынужденные колебания). Тогда при стационарных колебаниях вибрационной формы нелинейную функцию  $\Psi(t)$  с достаточной степенью точности можно представить в виде ряда Фурье [21]:

$$\Psi(t) = \frac{4R}{\pi} \cdot \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin[(2n+1)\omega t]}{2n+1} \right\}. \tag{12}$$

Подставляя функцию (12) в уравнение (10), можно получить следующее уравнение собственных колебаний вибрационной формы с цементобетонной смесью:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c_2 y = -\frac{4R}{\pi} \cdot \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin[(2n+1)\omega t]}{2n+1} \right\}. \tag{13}$$

Решение (13) при начальных условиях  $y|_{t=0} = y_0$  и  $\dot{y}|_{t=0} = \dot{y}_0$  имеет следующий вид:

$$y = y_0 \cos \Omega t + \frac{\dot{y}_0}{\Omega} \sin \Omega t - \frac{4R}{\pi} \cdot \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(c_2 - m \cdot (2n+1)^2 \omega^2)} \cdot \sin[(2n+1)\omega t] \right] \right\}. \tag{14}$$

Анализ полученного выражения (14) показывает, что в динамической системе "вибрационная форма – цементобетонная смесь" в самой обрабатываемой среде (при горизонтально направленных колебаниях



внешней возмущающей силы  $Q \sin \omega t$ ) возникают свободные колебания с частотой  $\Omega = \sqrt{c_2/m}$ , и она играет роль отрицательного возмущающего сопротивления. Более того, на частотах  $\omega$ , удовлетворяющих соотношению

$$\omega = \Omega / (2n + 1), \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (15)$$

эти собственные колебания сопровождаются субрезонансными колебаниями, приводящими к раскачиванию вибраторной формы относительно её нейтрального положения. (По-видимому, подобные явления, приводящие к перекачке энергии, передаваемой возмущающей силой  $Q \sin \omega t$ , в субрезонансные колебания вибраторной формы, не всегда полезны! Поэтому, в ряде случаев следует предпринять специальные меры по подавлению подобных колебаний).

Если использовать метод эквивалентной линеаризации силы кулоновского трения [2], тогда (10) можно привести к следующему виду:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b_e \frac{dy}{dt} + c_2 y = Q \sin \omega t, \quad (16)$$

где  $b_e$  – эквивалентный коэффициент вязкого трения бетонной смеси в горизонтальном направлении:

$$b_e = \frac{4R}{\pi A_e \omega} = \frac{4m_b g f_{mp}}{\pi A_e \omega}, \quad (17)$$

где  $A_e$  – амплитуда колебаний вибраторной формы с учётом действия эквивалентного трения бетонной смеси.

В работе [15] определено значение  $A_e$ , которое с учётом замеченной авторами ошибки, имеет следующий вид:

$$A_e = \frac{Q}{\sqrt{(c_2 - m\omega^2)^2 + b_e^2 \omega^2}}. \quad (18)$$

Подставляя зависимость (17) в выражение (18), найдём окончательно амплитуду (вынужденных) колебаний вибраторка с учётом значений эквивалентного коэффициента вязкого трения бетонной смеси  $b_e$ , т.е.

$$A_e = \sqrt{Q^2 - \frac{16R^2}{\pi^2} / (c_2 - m\omega^2)}. \quad (19)$$

Собственные (свободные) колебания вибраторка определяются из (16) с правой частью, равной нулю:

$$y = \exp\left\{-\frac{b_e}{2m} \cdot t\right\} \left\{ y_0 \cos \tilde{\Omega} t + \frac{\left(\dot{y}_0 + y_0 \cdot \frac{b_e}{2m}\right)}{\tilde{\Omega}} \cdot \sin \tilde{\Omega} t \right\}, \quad (20)$$

где  $\tilde{\Omega} = \sqrt{\Omega^2 - \frac{b_e^2}{4m^2}}$ . При условии:

$$Q = 4R / \pi \quad (21)$$

свободные колебания вибраторка быстро затухают, а при  $\omega = \Omega$  – становятся незатухающими:

$$y = y_0 \cos \Omega t + \frac{\dot{y}_0}{\Omega} \sin \Omega t. \quad (22)$$

## 2. Анализ вынужденных колебаний вибраторной формы с бетонной смесью.

### 2.1. Анализ вертикально направленных вынужденных колебаний.

Решение волнового уравнения колебаний (2) будем отыскивать методом, развитым в [16], при следующих граничных условиях [15]:

$$\begin{cases} -m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - c_1 u(0,t) + EF \frac{\partial u(0,t)}{\partial z} = -Q \sin \omega t; \\ E \frac{\partial u(H,t)}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (23)$$

где  $c_1$  – коэффициент жёсткости упругих амортизаторов в вертикальном направлении;  $Q$  – здесь и выше амплитуда возмущающей силы;  $\omega$  – угловая частота вынужденных колебаний;  $F$  – площадь днища вибрационной формы с бетонной смесью.

Учитывая то обстоятельство, что граничные условия задачи (23) подвижные, метод Фурье разделения переменных при отыскании решений (2) следует применять не напрямую, как это сделано в [15], а найти ещё и решение задачи (2), (22) при следующих граничных и начальных условиях:

$$E \frac{\partial u_0(0,t)}{\partial z} = 0; \quad E \frac{\partial u_0(H,t)}{\partial z} = 0; \quad E \frac{\partial u(z,0)}{\partial z} = \rho g(H-z) \Leftrightarrow u(z,0) = \frac{\rho g}{E} \left( Hz - \frac{z^2}{2} \right), u(z,0) \equiv u_0(z,0). \quad (24)$$

В итоге получаем следующее решение задачи (2), (22):

$$u(z,t) = \frac{Q}{\left( c_1 - \left[ m + \frac{\rho F}{k} \operatorname{tg} kH \right] \cdot \omega^2 \right)} \cdot \frac{\operatorname{cosh} k(H-z)}{\operatorname{cosh} kH} \cdot \sin \omega t + u_0(z,t), \quad (25)$$

где  $k = \frac{\omega}{a}$  – волновое число, а функция  $u_0(z,t)$ , являющаяся неучтённым компонентом решения, представленного в [15], обусловленная граничными и начальными условиями (24), и определяющая собственные колебания цементобетонной смеси при вертикально направленных колебаниях, имеет следующий вид:

$$u_0(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin \left[ (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{z}{H} \right) \right] \cdot \sin \left[ (2n-1) \cdot \pi \cdot \frac{at}{H} \right], \quad (26)$$

где  $A_n$  – амплитуда  $n$ -ой собственной формы колебаний цементобетонной смеси при вертикально направленных колебаниях определяется соотношением:

$$A_n = \frac{\int_0^H \frac{\rho g}{E} \left\{ z \cdot \left( H - \frac{z}{2} \right) \right\} \cdot \sin \left[ (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{z}{H} \right) \right] dz}{\int_0^H \sin^2 \left[ (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{z}{H} \right) \right] dz \cdot \left\{ 1 - \frac{m}{c_1} \cdot \left[ (2n-1) \cdot \pi \cdot \frac{a}{H} \right]^2 \right\}}. \quad (27)$$

Из анализа полученного решения (25) уравнения (2) следует, что выражение  $\left( \frac{\rho F}{k} \operatorname{tg} kH \right) \omega^2$ , названное в [15] величиной силы инерции цементобетонной смеси в вертикальном направлении (а на самом деле – это эффективная жёсткость цементобетонной смеси в вертикальном направлении), вряд ли может быть таковой при наличии резонансов вибрационной формы (имеющей собственную частоту колебаний  $\Omega_1 = \sqrt{\frac{c_1}{m}}$ ) с одной из частот собственных колебаний цементобетонной смеси  $\omega_n$ , т.е. при наличии условия:

$$\Omega_1 = (2n-1) \cdot \pi \cdot \frac{a}{H}, \quad n \in N. \quad (28)$$

Анализ резонансного условия (28) показывает, что в рассматриваемой системе возможны субрезонансные колебания системы "вибрационная форма – цементобетонная смесь", которые здесь условно названы субрезонансами  $(2n-1)$ -ого порядка столба смеси высотой  $H$ , возникающие при условии:

$$H = \frac{\pi \cdot a \cdot (2n-1)}{\sqrt{c_1/m}} = \frac{\pi \cdot a}{\{\Omega_1/(2n-1)\}}. \quad (29)$$

Ниже, в табл. 2 представлены значения высоты столба смеси для типичных значений скорости распространения возмущений в ней  $a$ , при которой возникает наиболее мощный основной резонанс ( $n=1$ ) для  $\Omega_1 = 62,8c^{-1}$ .

В табл. 3 представлены значения высоты столба цементобетонной смеси для различных значений скорости  $a$  (при  $\Omega_1 = 62,8c^{-1}$ ), соответствующих субрезонансным колебаниям  $m$ -ого (3-го, 5-го и 7-го) порядка,  $m=2n-1$ .

Безусловно, необходимо в практике формирования цементобетонных смесей избегать субрезонансных колебаний вибрационной формы со смесью, т.к. они приводят к резким раскачиваниям системы и

неминуемым перегрузкам. Поэтому, при избегании резонансов типа (28), (29), можно считать, как и в [15], что приведенная масса цементобетонной смеси в вертикальном направлении  $m_{np1}$  может быть определена из следующего выражения:

$$m_{np1} = \frac{\rho F}{k} \operatorname{tg} k H. \tag{30}$$

Таблица 2

Значения  $H$ , при которых возможен основной резонанс в системе "вибрационная форма – бетонная смесь" при вертикально направленных колебаниях

$a, \text{ м/с}$	30	50	70	100
$H, \text{ м}$	1,5	2,5	3,5	5

Таблица 3

Значения  $H$ , при которых в системе "цементобетонная смесь – вибрационная форма" возможны субрезонансы 3-го, 5-го и 7-го порядков при вертикально направленных колебаниях

$a, \text{ м/с}$	30	50	70	100
$H, \text{ м} (m=3, n=2)$	0,50	0,83	1,17	1,67
$H, \text{ м} (m=5, n=3)$	0,30	0,50	0,70	1,00
$H, \text{ м} (m=7, n=4)$	0,21	0,36	0,50	0,71

Величина удельной (на единицу площади поверхности вибрационной формы) приведенной массы цементобетонной смеси в вертикальном направлении определяется из выражения (30):

$$m_{y1} = m_{np1} / F = \frac{\rho}{k} \operatorname{tg} k H. \tag{31}$$

Анализ формул (30) и (31) показывает, что при определённых значениях высоты столба смеси  $H$  и заданных значениях  $k, a$ , значит, и  $\omega, a$ , возможны ситуации, когда эта масса (приведенная или удельная) принимает бесконечно большие значения, что в физическом смысле означает отсутствие возмущений в смеси при наличии внешней возмущающей силы (с амплитудой  $Q$  и частотой  $\omega$ ):

$$\frac{\omega}{a} \cdot H = \frac{\pi}{2} \cdot (2n - 1), \quad n \in N. \tag{32}$$

Следует отметить, что подобное утверждение вовсе не означает, что в смеси вообще отсутствуют какие-либо возмущения, поскольку, в соответствии с изложенным выше, смесь даже в этом случае может поддерживать собственные колебания.

Существуют также условия, при которых смесь не проявляет никаких инерционных свойств при вертикально направленных колебаниях внешней возмущающей силы:

$$\frac{\omega}{a} \cdot H = n \cdot \pi, \quad n \in N. \tag{33}$$

В соответствии с (30), (31), это физически означает, что вся подводимая извне к вибрационной форме энергия растрчивается не на уплотнение смеси, а на бесполезное раскачивание самой формы (её массы  $m$ ). Безусловно, таких режимов функционирования системы следует избегать, как неэффективных!

Значения приведенной и удельной масс цементобетонной смеси существенно зависят от её динамического модуля упругой деформации  $E$ , плотности смеси  $\rho$ , скорости распространения возмущений в уплотняемом слое  $a$ , толщины обрабатываемого слоя  $H$ , площади опорной поверхности дна формы  $F$ , угловой частоты колебаний  $\omega$ . Кроме того, эти значения во многом определяются и наличием (отсутствием) условий (соотношений) типа (32), (33). По мнению авторов настоящего исследования, полученные в [15] формулы для приведенной и удельной масс цементобетонной смеси некорректны, т.к. не учитывают диссипативных процессов в ней, что существенно изменяет все представленные по этим параметрам соотношения. (По-видимому, это является предметом отдельного научного исследования).

## 2.2. Анализ взаимодействия вертикальных стенок вибрационной формы с цементобетонной смесью при горизонтально направленных колебаниях.

Для определения характера взаимодействия противоположными вертикальными стенками вибрационной формы, а с обрабатываемой цементобетонной средой при действии нормальных

горизонтально направленных колебаний исследуем динамическую систему "вибрационная форма – цементобетонная смесь", которая аналогична представленной в [15]. Здесь вибрационная форма конструктивно выполнена с плоским дном, а обрабатываемая среда представлена в виде системы с распределёнными параметрами. Вибрационная форма смонтирована на основании с помощью упругих амортизаторов и на неё действует возмущение в виде горизонтально направленной гармонической силы  $Q \sin \omega t$ .

При изучении взаимодействия цементобетонной смеси с вертикальными стенками вибрационной формы пренебрегаем действием сил трения бетонной смеси о дно вибрационной формы. Тогда дифференциальное уравнение движения уплотняемой смеси в направлении горизонтальной (вдоль дна формы) координаты  $y$  за время  $t$  будет иметь вид [21]:

$$E \frac{\partial^2 u(y,t)}{\partial y^2} = \rho \frac{\partial^2 u(y,t)}{\partial t^2}. \tag{31}$$

Решение волнового уравнения колебаний (31) будем отыскивать методом, развитым в [16], при следующих граничных условиях:

$$-m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - c_2 u(0,t) + EF_1 \frac{\partial u(0,t)}{\partial y} = -Q \sin \omega t; \quad u(0,t) = u(a_0,t). \tag{32}$$

Здесь  $F_1$  – площадь поверхности одной вертикальной стенки, контактирующей с цементобетонной смесью;  $a_0$  – расстояние между вертикальными стенками (ширина обрабатываемого цементобетонного слоя). Остальные обозначения приведены выше.

Искомое решение задачи (31), (32) представим в виде:

$$u(y,t) = \frac{Q \cdot \left( \frac{1 - \cos ka_0}{\sin ka_0} \sin ky + \cos ky \right)}{c_2 - \left[ m + \frac{\rho F_1 (1 - \cos ka_0)}{k \sin ka_0} \right] \omega^2} \sin \omega t + u_0(y,t), \tag{33}$$

где  $u_0(y,t)$  – составляющая решения задачи (31), (32), определяющая свободные собственные колебания бетонной смеси, как системы с распределёнными параметрами, при следующих граничных и начальных условиях:

$$u_0(0,t) = u_0(a_0,t) = 0; \quad u_0(y,0) = B = const. \tag{34}$$

Решение  $u_0(y,t)$  имеет следующий вид:

$$u_0(y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{A}_n \cdot \cos \left[ (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{y}{a_0} \right) \right] \cdot \cos \left[ (2n-1) \cdot \pi \cdot \frac{at}{a_0} \right], \quad n \in N. \tag{35}$$

Амплитуда  $\tilde{A}_n$  определяется из следующего соотношения:

$$\tilde{A}_n = \frac{\int_0^{a_0} B \cdot \cos \left[ (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{y}{a_0} \right) \right] dy}{\int_0^{a_0} \cos^2 \left[ (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{y}{a_0} \right) \right] dz \cdot \left\{ 1 - \frac{m}{c_2} \cdot \left[ (2n-1) \cdot \pi \cdot \frac{a}{a_0} \right]^2 \right\}}. \tag{36}$$

Из анализа решения (33) следует, что при уплотнении цементобетонной смеси с помощью горизонтально направленных колебаний необходимо избегать ситуаций, приводящих к субрезонансным колебаниям смеси совместно с формой, в которой эта смесь находится. Такие колебания реализуются при условии:

$$\Omega_2 = \sqrt{c_2/m} = (2n-1) \cdot \pi \cdot \frac{a}{a_0}. \tag{37}$$

Расстояние между вертикальными стенками (ширина обрабатываемого слоя), при котором реализуются субрезонансные колебания совместно формы и смеси, приводящие к значительным размахам этих колебаний и неизбежному выходу из строя металлоконструкции (самой формы) вибрационной установки для уплотнения цементобетонной смеси, можно найти из соотношения:

$$a_0 = (2n - 1) \cdot \pi \cdot a / \Omega_2 = \frac{\pi \cdot a}{(\Omega_2 / (2n - 1))}. \quad (38)$$

Если приняты меры по отстройке от нежелательных субрезонансных колебаний совместно формы и смеси, тогда выражение  $\left[ \frac{\rho F_1 (1 - \cos ka_0)}{k \sin ka_0} \right] \cdot \omega^2$  представляет собой не что иное, как величину эквивалентной жёсткости цементобетонной смеси при её уплотнении горизонтально направленными колебаниями относительно днища вибрационной формы. (Кстати, в работе [15] неправильно интерпретируется это выражение, как величина силы инерции цементобетонной смеси, взаимодействующей с вертикальными стенками вибрационной формы при горизонтально направленных колебаниях. Чтобы убедиться в правоте высказанных авторами данного исследования суждений по этому поводу, достаточно проанализировать размерность указанного выражения!). Далее можно цементобетонную смесь, взаимодействующую с вертикальными стенками вибрационной формы при горизонтально направленных колебаниях, представлять в виде приведенной массы  $m_{np2}$ , т.е.

$$m_{np2} = \frac{\rho F_1 (1 - \cos ka_0)}{k \sin ka_0} = \frac{\rho F_1}{k} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{ka_0}{2} \right). \quad (39)$$

Анализ формулы (39) показывает, что существуют две ситуации, которые по-разному интерпретируют инерционные свойства смеси при её уплотнении таким способом. Ситуация 1. Смесь вообще не проявляет никаких инерционных свойств, т.е. её масса равна нулю. Такое возможно в том случае, если выполняется условие:

$$\frac{\omega \cdot a_0}{2 \cdot a} = n \cdot \pi, \quad n \in N. \quad (40)$$

Ситуация 2. Смесь имеет бесконечную по величине массу, которая препятствует действию на неё каких либо возмущений. Такое возможно в том случае, если выполняется условие:

$$\frac{\omega \cdot a_0}{2 \cdot a} = (2n - 1) \cdot \frac{\pi}{2}, \quad n \in N. \quad (41)$$

Полученные при таком анализе результаты, приведенные выше, свидетельствуют о том, что интерпретация выражения (39) как приведенной массы уплотняемой смеси, не вполне корректна и нуждается в доработке. По-видимому, это должно быть предметом отдельного исследования.

В рассматриваемой динамической системе при горизонтально направленных колебаниях также будут действовать силы трения бетонного столба о днище вибрационной формы, которые можно учесть с помощью эквивалентного коэффициента сопротивления  $b_e$  бетонной смеси (17). Тогда с учётом выражений (18), (19), (33) в последней зависимости необходимо внести изменения, а именно: следует в первом члене, пропорциональном  $\sin \omega t$ , заменить:

$$Q \leftrightarrow \sqrt{Q^2 - \frac{16R^2}{\pi^2}}, \quad \omega \cdot t \leftrightarrow \omega \cdot t - \varphi_e, \quad (42)$$

где  $\varphi_e$  – угол сдвига фаз между перемещением и амплитудой возмущающих сил, равный:

$$\varphi_e = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{b_e \cdot \omega}{c_2 - m\omega^2} \right\}. \quad (43)$$

Значения  $m_{np2}$  (39) существенно зависят от динамического модуля упругой деформации  $E$  обрабатываемой цементобетонной смеси, её плотности  $\rho$ , фазовой скорости распространения возмущения в уплотняемом слое  $a$ , угловой частоты колебаний  $\omega$ , ширины обрабатываемого слоя  $a_0$ , и площади поверхности одной из вертикальных стенок формы  $F_1$ .

По мнению авторов данного исследования, под выражениями  $m_{np1}\omega^2$ ,  $m_{np2}\omega^2$ , в отличие от мнения авторов [15], следует понимать эффективную жёсткость бетонной смеси, как системы с распределёнными параметрами, подверженной процессу уплотнения вертикально или горизонтально направленными колебаниями извне. Тогда возникает логичный вывод, исходя из соотношений (28)-(33) и (37)-(41), о том, что жёсткостные свойства цементобетонной смеси при её уплотнении в некоторых случаях (в зависимости от высоты столба смеси или ширины днища вибрационной формы) приобретают свойства абсолютно твёрдого тела (жёсткость стремится к бесконечности) или абсолютно податливого тела (жёсткость смеси стремится к нулю).

**Выводы**

1. На основании методов математической физики и теории колебаний механики сплошной среды изучен процесс распространения волн деформации в уплотняемой среде, представленной в виде системы с распределёнными параметрами, и определён закон деформирования уплотняемой среды при разнонаправленных колебаниях, действующих на днище вибрационной формы в вертикальном и горизонтальном направлениях, а также на вертикальные стенки вибрационной формы при горизонтально направленных колебаниях, воздействию на неё горизонтально направленными колебаниями со стороны вертикально, близко расположенных друг к другу стенок вибрационной формы.
2. Получены теоретические выражения, позволяющие достаточно точно и корректно описывать поведение реальной динамической системы «вибрационная форма – уплотняемая среда» при формовании бетонных изделий из цементобетонных смесей путём приложения разнонаправленных колебаний.
3. Полученные в данной работе результаты могут быть в дальнейшем использованы для уточнения и совершенствования существующих инженерных методов расчёта вибротехники для уплотнения строительных/бетонных смесей как на стадиях их проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации.

**Список использованной литературы**

1. Маслов А.Г. Исследование взаимодействия вибрирующей плиты с цементобетонной смесью / А.Г. Маслов, Ю.С. Саленко, Н.А. Маслова // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 2 (67). Частина I. – С. 93-98.
2. Маслов А.Г. Вибрационные машины и процессы в дорожно-строительном производстве / А.Г. Маслов, Ю.С. Саленко. – Кременчук: ПП Щербатых О.В., 2014. – 262 с.
3. Иткин А.Ф. Вибрационные машины для формования бетонных изделий / А.Ф. Иткин. – К.: "МП Леся", 2009. – 152 с.
4. Chen X. Experimental study and analytical formulation of mechanical behavior of concrete / X. Chen, S. Wu, J. Zhou // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 47. – P. 662-670.
5. Tattersall G.H. Effect of Vibration on the Rheological Properties of Fresh Cement Pastes and Concretes / G.H. Tattersall // Rheology of Fresh Cement and Concrete. Proceedings of the International Conference. P.F.G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, March 16-29. – London: Chapman and Hall, 1990. – P. 323-338.
6. Kakuta S. Rheology of Fresh Concrete under Vibration / S. Kakuta, T. Kojima // Rheology of Fresh Cement and Concrete. Proceedings of the International Conference. P.F.G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, March 16-29. – London: Chapman and Hall, 1990.
7. Szwabowski J. Influence of Three-Phase Structure on the Yield Stress of Fresh Concrete / J. Szwabowski // Rheology of Fresh Cement and Concrete. Proceedings of the International Conference. P.F.G. Banfill, ed., University of Liverpool, UK, March 16-29. – London: Chapman and Hall, 1990. – P. 241-248.
8. Klosinski J. Frequency analysis of vibratory device model (in Polish) / J. Klosinski, A. Trabka // Pneumatyka. – 2010. – Vol. 1. – P. 46-49.
9. Zoltowski B. Research of machine dynamics (in Polish) / B. Zoltowski. – 2002. – Wyd. MARKAR, Bydgoszcz.
10. Назаренко И.И. Прикладные задачи теории вибрационных систем / И.И. Назаренко. – К.: ИСДО, 1993. – 216 с.
11. Назаренко И.И. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії / И.И. Назаренко. – К.: КНУБА, 2007. – 203 с.
12. Свідерський А.Т. Вивчення та впровадження сучасних гідравлічних вібраційних систем у виробничий процес – шлях до створення універсальних самоадаптованих високопродуктивних віброушільнювачів / А.Т. Свідерський // Техніка будівництва. – К.: КНУБА, 2004. – № 13. – С. 66-70.
13. Ручинський М.М. Високоєфективна машина для формування фундаментних блоків / М.М. Ручинський // Техніка будівництва. – К.: КНУБА, 2004. – № 13. – С. 63-65.
14. Назаренко И.И. Теорія вібротехніки для ущільнення будівельних сумішей на основі синтезу дискретно-континуальних систем / И.И. Назаренко, М.М. Ручинський, Б.М. Пентюк // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – №4 (56). – С. 55-59.
15. Маслов А.Г. Исследование взаимодействия вибрационной формы с бетонной смесью при разнонаправленных колебаниях / А.Г. Маслов, Л.Н. Ахметова, А.И. Елизаров // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2017. – Вип. 6 (107). Частина I. – С. 123-128.
16. Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1970. – 712 с.
17. Гробов В.А. Теория колебаний механических систем / В.А. Гробов. – К.: Вища школа, 1982. – 183 с.
18. Потураев В.Н. Вибрационная техника и технологии в энергоёмких производствах / В.Н. Потураев, В.П. Франчук, В.П. Надутый. – Днепропетровск: НГА Украины, 2002. – 190 с.

19. Франчук В.П. Учёт большого слоя материала вибрационных машин технологического назначения / В.П. Франчук // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2011. – №2 (62). – С. 48-53.
20. Голоскоков Е.Г. Нестационарные колебания механических систем / Е.Г. Голоскоков, А.П. Филиппов. – К.: Наукова думка, 1966. – 336 с.
21. Маслов А.Г. Вибрационные машины для приготовления и уплотнения бетонных смесей / А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин, Ю.С. Саленко. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2014. – 324 с.
22. Кудинов И.В. Получение точного аналитического решения гиперболического уравнения колебаний струны с учётом релаксационных свойств материалов / И.В. Кудинов, В.А. Кудинов // *Известия РАН. Механика твёрдого тела*. – 2014. – №5. – С. 63-75.
23. Фролов К.В. Избранные труды в двух томах. Т. 1: Вибрация и техника / К.В. Фролов. – М.: Наука, 2007. – 351 с.
24. Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Дрофа, 2004. – 592 с.
25. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 798 с.
26. Зельдович Я.Б. Высшая математика для начинающих физиков и техников / Я.Б. Зельдович, И.М. Яглом. – М.: Наука, 1982. – 510 с.
27. Юнин Е.К. Загадки и парадоксы сухого трения / Е.К. Юнин. – М.: Книжный дом "Либроком", 2009. – 128 с.
28. Кабисов К.С. Колебания и волновые процессы: Теория. Задачи с решениями / К.С. Кабисов, Т.Ф. Камалов, В.А. Лурье. – М.: КомКнига, 2010. – 360 с.

УДК 534.1:539.3

Н.В. СМЕТАНКІНА, С.В. УГРИМОВ

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІДГУКУ БАГАТОШАРОВОГО СКЛА НА  
ВИБУХОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ФАЗИ РОЗРІДЖЕННЯ**

Стаття присвячена дослідженню відгуку багатошарового скла на вплив ударної хвилі з урахуванням як фази підвищеного тиску, так і фази розрідження. Динамічна поведінка скла описується рівняннями узагальненої моделі багатошарових пластин, яка заснована на методі степеневих рядів і дозволяє врахувати усі необхідні компоненти деформацій та напружень у шарах конструкції. Вплив повітряної ударної хвилі описується експоненційною залежністю, що була запропонована Кіннеу для аналізу фази надлишкового тиску, і яка може бути застосована й для аналізу фази розрідження. Розв'язок задачі отримано аналітико-чисельним методом. На чисельних прикладах досліджено вплив урахування фази розрідження в ударних хвилях на параметри напружено-деформованого стану оскління.

Ключові слова: багатошарове оскління, напружено-деформований стан, повітряна ударна хвиля, фаза тиску, фаза розрідження.

Н.В. СМЕТАНКИНА, С.В. УГРИМОВ

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА МНОГОСЛОЙНОГО СТЕКЛА НА  
ВЗРЫВНОЕ НАГРУЖЕНИЕ С УЧЕТОМ ФАЗЫ РАЗРЕЖЕНИЯ**

Статья посвящена исследованию отклика многослойного стекла на воздействие ударной волны с учетом как фазы повышенного давления, так и фазы разрежения. Динамическое поведение стекла описывается уравнениями обобщенной модели многослойных пластин, которая основана на методе степенных рядов и позволяет учесть все необходимые компоненты деформаций и напряжений в слоях конструкции. Влияние воздушной ударной волны описывается экспоненциальной зависимостью, которая была предложена Киннеу для анализа фазы избыточного давления, и которая может быть применена и для анализа фазы разрежения. Решение задачи получено аналитико-численным методом. На численных примерах исследовано влияние учета фазы разрежения в ударных волнах на параметры напряженно-деформированного состояния остекления.

Ключевые слова: многослойное остекление, напряженно-деформированное состояние, воздушная ударная волна, фаза сжатия, фаза разрежения.

N.V. SMETANKINA, S.V. UGRIMOV

A. Pidgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine

**MATHEMATICAL MODELING OF RESPONSE OF MULTILAYER GLAZING UNDER BLAST  
LOADING WITH EFFECT OF UNDERPRESSURE PHASE**

When we analyze the strength of structural elements under various explosions it is necessary to take into account several factors at once: an impact of primary and secondary fragments, temperature fields, as well as the influence of the air shock wave. There are transient processes, which require consideration of dynamic deformation processes to assess the structural strength. The paper presents an investigation of the response of a laminated glass to the impact of a shock wave, taking into account both the phase of increased pressure and the underpressure phase. Dynamic behavior of the glass is described by the equations of the generalized model of multilayer plates, which is based on the method of power series and allows to take into account all the necessary components of strains and stresses in the layers of the structure. The effect of an air shock wave is described by the exponential dependence that proposed Kinney for analyze the phase of excess pressure, and which can be applied to the analysis of the underpressure phase. The solution of the problem is obtained by an analytical-numerical method.

Numerical examples have been used to study the effect of accounting for the underpressure phase in shock waves on the parameters of the strain-stressed state of glazing. The numerical results of a investigation of stress-strained state for a three-layer glass on the influence of the air shock wave taking into account and without consideration the underpressure phase are given. The results were compared with the data obtained by L.R. Dharani, J. Wei for case architectural glass. There is a good agreement between the results, which confirms the efficiency of the proposed approach. Also the investigation of the response of glazing for transport vehicles on blast loading is carried out. It has been established that in some cases the consideration of the underpressure phase is necessary. It is shown that taking into account the influence of this phase can lead to increase deflections and stresses in glass layers almost twice.

Keywords: multilayer glazing, stress-strain state, blust loading, compression phase, underpressure phase.



### Постановка проблеми

Багатошарове скло широко використовується у сучасному будівництві та осклінні транспортних засобів. Воно є більш травмобезпечним, оскільки при ударі не розтрощується на окремі уламки, які можуть привести до травм людини. Зазвичай, для оскління використовуються триплекси (тришарове скло із двома шарами скла). При необхідності забезпечити захист від особливих навантажень (кулестійкість, птахостійкість тощо) використовуються багатошарові пакети. Таке оскління виконується із шарів силікатного скла (СС), органічного, полікарбонату, які з'єднуються полівінілбутираллю (ПВБ) або іншими клейовими шарами. Для підвищення міцності пакету замість звичайних використовуються зміцнені силікатні стекла. Таке зміцнення здійснюється формуванням високих напружень стиску в поверхневих шарах скла хіміко-термічною обробкою, загартовуванням, а також видаленням поверхневого дефектного шару хімічним травленням, що підвищує міцність скла у декілька разів. Загальна товщина багатошарових стекел може бути досить значною і в деяких випадках їх неможливо віднести до тонких конструкцій. Крім того, механічні властивості шарів відрізняються на декілька порядків, тому при аналізі напружено-деформованого стану (НДС) необхідно враховувати можливе поперечне обтиснення пакету та поворот нормальних елементів у кожному його шарі.

При аналізі міцності елементів конструкцій при різноманітних вибухах необхідно враховувати відразу кілька вражаючих факторів: удар первинними й вторинними уламками, температурні впливи, а також вплив повітряної ударної хвилі. Усе це швидкоплинні процеси, які для оцінки міцності конструкції потребують розгляду динамічних процесів деформування. Дослідження впливу повітряних ударних хвиль на елементи конструкцій зазвичай проводяться тільки з урахуванням дії надлишкового тиску, а фаза розрідження зовсім не враховується. У роботі досліджується НДС оскління при впливі повітряної ударної хвилі з урахуванням фази розрідження.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вплив повітряної ударної хвилі на елементи конструкцій, насамперед, визначається різкою зміною тиску на поверхні. Швидкий викид енергії під час вибуху приводить до різкого збільшення тиску з наступним його поступовим зменшенням до звичайних значень. Ця фаза надлишкового тиску змінюється фазою розрідження, при якій тиск стає меншим за атмосферний. Тривалість цієї фази зазвичай є більшою, ніж фази дії надлишкового тиску. При цьому при звичайних вибухах максимальний надлишковий тиск значно більший, ніж величина тиску на стадії фази розрідження. Тому при оцінці міцності елементів конструкцій на вплив повітряної ударної хвилі досить часто враховують тільки стадію надлишкового тиску [1-5]. Це спрощення виправдане при розгляді жорстких конструкцій, які незначно деформуються.

Останнім часом з'явився цілий ряд робіт [6-12], у яких відзначається значний вплив саме фази розрідження на динамічний відгук багатошарового скла. Так, J.L. Smith із співавторами повідомили, що при в експериментальних дослідженнях скла при вибухових навантаженнях спостерігалася його руйнування не на фазі дії підвищеного тиску [6]. Т. Krauthammer та А. Altenberg припустили, що вплив саме фази розрідження став причиною руйнування скла. У роботі [7] вони провели дослідження впливу саме цієї фази на руйнування скла. L.R. Dharani та J. Wei [8, 9] провели детальне чисельне дослідження відгуку архітектурного тришарового скла на вплив повітряної ударної хвилі. Було встановлено, що при врахуванні впливу фази розрідження прогини й напруження у склі можуть практично у два рази перевищувати значення, що спостерігаються при врахуванні тільки фази надлишкового тиску. Таке підвищення напружень може приводити до того, що скло, яке витримало стадію дії надлишкового тиску, руйнується пізніше. Таким чином, для аналізу НДС оскління при впливі ударної хвилі необхідним є врахування фази розрідження.

### Мета дослідження

Метою роботи є створення методу розрахунку та проведення дослідження відгуку багатошарового скла реальних транспортних засобів на вплив повітряної ударної хвилі з урахуванням фази розрідження. Ця робота є продовженням раніше проведених авторами досліджень впливу повітряної ударної хвилі, у яких не враховувалася дія цієї фази.

### Викладення основного матеріалу дослідження

**Математична модель зміни тиску при вибухові.** Вибухові хвилі поширюються у вигляді ударних хвиль, на фронті яких стрибкоподібно змінюється тиск, щільність і температура. Навантаження від ударної хвилі діє на зовнішню поверхню конструкції й визначається у вигляді функції, що змінюється за часом. У якості основного фактора, за яким оцінюється небезпека вибуху, приймається значення надлишкового тиску на фронті ударної хвилі при підході до досліджуваного об'єкта. При цьому необхідно враховувати процес обтікання конструкції ударною хвилею.

На рис. 1 показана характерна зміна тиску повітряної хвилі у фіксованій у просторі точці [5, 13–15].

Головною особливістю ударної хвилі є різке зростання тиску в її фронті від вихідного атмосферного тиску  $p_A$  до максимального значення  $p_A + \Delta p_{\Phi}$  і потім падіння до атмосферного тиску. Час  $\tau_+$ , протягом якого тиск зростає від  $p_A$  до  $p_A + \Delta p_{\Phi}$ , визначає тривалість фази стискання. Фаза стискання змінюється фазою розрідження тривалістю  $\tau_-$ , у якій тиск виявляється нижчим атмосферного на  $\Delta p_-$ .

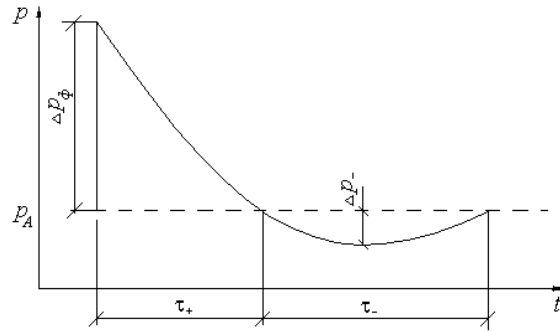


Рис. 1. Зміна тиску у фронті ударної хвилі.

Величина надлишкового тиску у фронті ударної хвилі залежить від типу й маси вибухової речовини, а також від відстані до точки вибуху. Параметри повітряної ударної хвилі можуть бути визначені за співвідношеннями, отриманими М.О. Садовським на основі теорії подібності [13, 14], або іншими залежностями [8, 9, 12]. Надлишковий тиск у фронті ударної хвилі  $\Delta p_\phi$  й тривалість фази стискання при повітряному вибухові можуть бути визначені за експериментальними залежностями:

$$\Delta p_\phi = \frac{0,084 \sqrt[3]{M}}{R} + \frac{0,27 \sqrt[3]{M^2}}{R^2} + 0,7 \frac{M}{R^3}, \quad \tau_+ = 1,5 \cdot 10^{-3} \sqrt[6]{M} \sqrt{R},$$

де  $M$  – маса еквівалентного тротилового заряду;  $R$  – відстань від центра вибуху до перешкоди.

Імпульс, що діє на конструкцію під час вибуху, на стадії підвищеного тиску може бути описаний різними математичними співвідношеннями. Найчастіше використовуються лінійні [12–14] та експоненційні наближення [4, 5, 8, 12–15]. G.F. Kinney [16] для опису зміни тиску на цій стадії використав експоненційну залежність у вигляді

$$\Delta p(t) = \Delta p_\phi \left(1 - \frac{t}{\tau_+}\right) \exp\left(-\alpha \frac{t}{\tau_+}\right), \tag{1}$$

де  $\Delta p(t)$  – підвищення тиску на перешкоді;  $\Delta p_\phi$  – максимальне значення тиску у момент при  $t = 0$ ;  $\tau_+$  – час дії фази підвищеного тиску;  $\alpha$  – коефіцієнт розпаду [8, 16].

Зміну тиску на стадії розрідження зазвичай рекомендують описувати лінійною залежністю у вигляді трикутного імпульсу [12, 17]. L.R. Dhanani використав і для цієї стадії ту ж експоненціальну залежність (1), що раніше застосовувалася тільки на стадії стиску. У роботі [8] він навів формули для визначення трьох коефіцієнтів у залежності (1). Ці коефіцієнти залежать від маси тротилового заряду та відстані від центру вибуху. L.R. Dhanani показав [8], що результати, отримані за цією формулою, добре узгоджуються з експериментальними даними, наведеними J.L. Smith та інші в роботі [6].

Ми також будемо виходити з того, що тиск за фронтом ударної хвилі змінюється за експоненційним законом (1). У результаті дослідження НДС оскління при впливі повітряної ударної хвилі зводиться до розв'язання задачі про імпульсне деформування багат шарової конструкції.

**Математична модель багат шарового скла.** Розглядається багат шарове скло, яке закріплене по краю і перебуває під впливом розподіленого імпульсного навантаження, викликаного впливом повітряної ударної хвилі. Необхідно визначити НДС у шарах скла. Скло (рис. 2) складається із  $I$  шарів постійної товщини ( $h_i$  – товщина  $i$ -го шару). Припускається, що контакт між шарами виключає їхнє розшарування й взаємне проковзування.

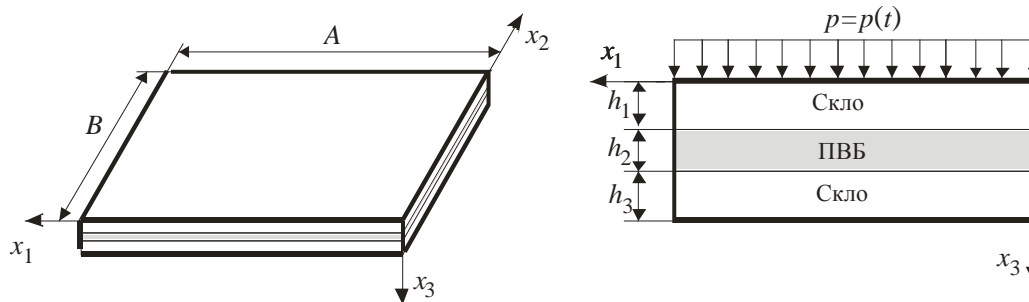


Рис. 2. Багат шарове скло.

Поведінка скла описується рівняннями узагальненої моделі багатошарових пластин [18, 19], яка дозволяє обирати необхідну точність опису НДС залежно від композиції пакета і умов навантаження. У загальному випадку переміщення точки  $i$ -го шару описуються наступними кінематичними залежностями:

$$u_v^i(x_1, x_2, x_3, t) = u_v + \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{j=1}^{i-1} h_j^k u_{vk}^j + (x_3 - \delta_{i-1})^k u_{vk}^i \right], \quad v = 1, 2,$$

$$u_3^i(x_1, x_2, x_3, t) = u_3 + \sum_{\ell=1}^L \left[ \sum_{j=1}^{i-1} h_j^\ell u_{3\ell}^j + (x_3 - \delta_{i-1})^\ell u_{3\ell}^i \right], \quad (2)$$

де  $h_j^k = (h_j)^k$ ;  $\delta_i = \sum_{j=1}^i h_j$ ,  $\delta_{i-1} \leq x_3 \leq \delta_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ ;  $u_\alpha^i (\alpha = \overline{1, 3})$  – переміщення точки  $i$ -го шару в напрямку

осі  $Ox_\alpha$ ;  $u_\alpha, u_{\alpha k}^i$  – коефіцієнти розвинень переміщень у степеневі ряди, які є функціями аргументів  $x_1, x_2, t$ ;  $K_\alpha^i$  – максимальні степені поперечної координати для площинних ( $\alpha = 1, 2$ ) і поперечних ( $\alpha = 3$ ) переміщень точок  $i$ -го шару, які вибираються залежно від необхідної точності.

Змінюючи кількість утримуваних членів у степеневих рядах (2), можна одержати різні за точністю двовимірні апроксимації НДС. Прийняті кінематичні залежності (2) при  $K = 1, L = 0$  еквівалентні гіпотезам моделі Є.І. Григолюка, П.П. Чулкова [20], при  $K = 1, L = 1$  – гіпотезам уточненої моделі першого порядку, що враховує обтиснення кожного шару [18, 21], а при  $K = 3, L = 2$  – гіпотезам моделі високого порядку, яка дозволяє досліджувати локалізовані навантаження [18, 22].

Зазвичай багатошарове скло складається із шарів, механічні властивості яких відрізняються на декілька порядків. Тому при аналізі його НДС необхідно враховувати можливе поперечне обтиснення пакета. Раніше у роботах [18, 19, 23] було встановлено, що для аналізу згинних напружень у тонких та середньої товщини багатошарових пластинах при дії розподілених, нелокалізованих навантажень доцільно використовувати гіпотези уточненої моделі першого порядку ( $K = 1, L = 1$ ), що враховує обтиснення кожного шару. Саме ця модель буде використана для аналізу відгуку багатошарового скла на імпульсне навантаження.

Деформації у кожному шарі пластини вважаються малими й описуються лінійними співвідношеннями. Напруження і деформації у шарах пов'язані законом Гука. Рівняння руху багатошарового скла та граничні умови отримано з варіаційного принципу Остроградського-Гамільтона. Рівняння руху в зусиллях та моментах для багатошарової пластини мають вигляд [18]:

$$\sum_{i=1}^I [L_\alpha^i - I_{\alpha 1}^i] + p_\alpha = 0,$$

$$N_{1\alpha,1}^{ik} + N_{\alpha 2,2}^{ik} - k_\alpha N_{\alpha 3}^{ik\alpha-1} + h_i^{k_\alpha} \sum_{j=i}^{I-1} [L_\alpha^{j+1} - I_{\alpha 1}^{j+1}] - I_{\alpha k_\alpha+1}^i = 0, \quad (3)$$

де  $L_1^i = N_{11,1}^{i0} + N_{12,2}^{i0}$ ,  $L_2^i = N_{22,2}^{i0} + N_{12,1}^{i0}$ ,  $L_3^i = N_{13,1}^{i0} + N_{23,2}^{i0}$ ,

$$I_{\alpha r}^i = \frac{\rho_i h_i^r}{r} \left( u_{\alpha 0,tt} + \sum_{k=1}^{K_\alpha} \left[ \sum_{j=1}^{i-1} h_j^k u_{\alpha k,tt}^j + \frac{r h_i^k}{k+r} u_{\alpha k,tt}^i \right] \right),$$

$$N_{\alpha\beta}^{ik} = N_{\beta\alpha}^{ik} = \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} (x_3 - \delta_{i-1})^k p_{\alpha\beta}^i dx_3, \quad \alpha = \overline{1,3}, \quad k_\alpha = \overline{1, K_\alpha}, \quad i = \overline{1, I}.$$

Кількість рівнянь залежить від числа шарів і дорівнює для обраної моделі  $3I + 3$ .

**Метод розв'язання.** Метод розв'язання системи рівнянь (3) для прямокутних шарнірно опертих багатошарових пластин полягає у наступному. Переміщення і зовнішні навантаження розвиваються у ряди по функціям, які задовольняють граничним умовам, в результаті чого задача про коливання багатошарової пластини зводиться до інтегрування системи звичайних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами. Ця система інтегрується за допомогою однокрокового методу [18], який ґрунтується на розвиненні розв'язку в ряд Тейлора. Для пластин, що мають складну форму у плані або складні граничні умови опираючі, для розв'язання використовується метод занурення [18, 21], ідея якого полягає у зануренні вихідної пластини складної форми у плані у допоміжну шарнірно-оперту прямокутну пластину, для якої розв'язок можна легко отримати аналітично. При цьому для того, щоб процес деформування вихідної та розширеної системи був

ідентичним, по контуру вихідної пластини прикладаються компенсуючі навантаження, які знаходяться у ході розв'язання задачі.

Закріплення стеклов у прорізах автомобілів здійснюється за допомогою гумового ущільнювача, який фіксується по периметру замком з полімерного матеріалу або гуми. Це дозволяє розглядати елементи оскління як шарнірно оперті пластини. Тому переміщення й навантаження розвиваються в тригонометричні ряди по функціях, що задовольняють умовам шарнірного опирання:

$$u_j^i(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \phi_{jmn}^i(t) B_{jmn}(x, y), \quad p_j(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{jmn}(t) B_{jmn}(x, y), \quad j = \overline{1,3}, \quad i = \overline{1, I},$$

$$B_{1mn} = \cos \alpha_m x_1 \sin \beta_n x_2, \quad B_{2mn} = \sin \alpha_m x_1 \cos \beta_n x_2, \quad B_{3mn} = \sin \alpha_m x_1 \sin \beta_n x_2, \quad \alpha_m = m\pi/A, \quad \beta_n = n\pi/B.$$

Будемо вважати, що оскління розташоване фронтально до напрямку поширення ударної хвилі, тоді її вплив на зовнішню поверхню першого шару будемо описувати залежністю (1).

Коефіцієнти розвинення навантаження (1) у ряд Фур'є мають вигляд:

$$p_{3mn} = \frac{4}{m\pi^2} \Delta p_{\phi} \left(1 - \frac{t}{\tau_+}\right) \exp\left(-\alpha \frac{t}{\tau_+}\right) \cdot (\cos m\pi - 1) \cdot (\cos n\pi - 1).$$

**Чисельні результати та обговорення.** Проведено чисельне дослідження впливу повітряної ударної хвилі (1) на різні за призначенням тришарові стекла. Параметри ударної хвилі вибрано аналогічно даним, наведеним у роботі [8]:  $\tau_+ = 7,7$  мс,  $\alpha = 0,55$ ,  $\Delta p_{\phi} = 6894,8$  Па.

Для оцінки достовірності розробленого методу проведено дослідження тришарового квадратного архітектурного скла з геометричними характеристиками  $A = B = 1,325$  м,  $h_1 = h_3 = 4,76$  мм,  $h_2 = 1,52$  мм, зовнішні шари якого виконані із СС з механічними характеристиками:  $E_i = 72$  ГПа,  $\rho_i = 2500$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu_i = 0,25$ ,  $i = 1,3$ . Другий шар виконано із ПВБ:  $E_2 = 0,274$  ГПа,  $\rho = 1100$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu_2 = 0,38$ . Тут  $E_i$  – модуль пружності,  $\nu_i$  – коефіцієнт Пуассона,  $\rho_i$  – щільність  $i$ -го шару. Результати розрахунку порівнювалися із даними аналогічного дослідження, проведеного L.R. Dharani, як аналітично, так і чисельно за допомогою комплексу LS-DYNA3D [8, 9].

На рис. 3 показано зміну за часом прогинів посередині скла при впливі повітряної ударної хвилі без урахування (пунктирна лінія) та з урахуванням фази розрідження (суцільна лінія). Результати розрахунку порівнюються із даними, отриманими L.R. Dharani (точки – без урахування, штрихпунктир – з урахуванням фази розрідження). Спостерігається добре узгодження результатів, що підтверджує їх достовірність і працездатність запропонованого підходу.

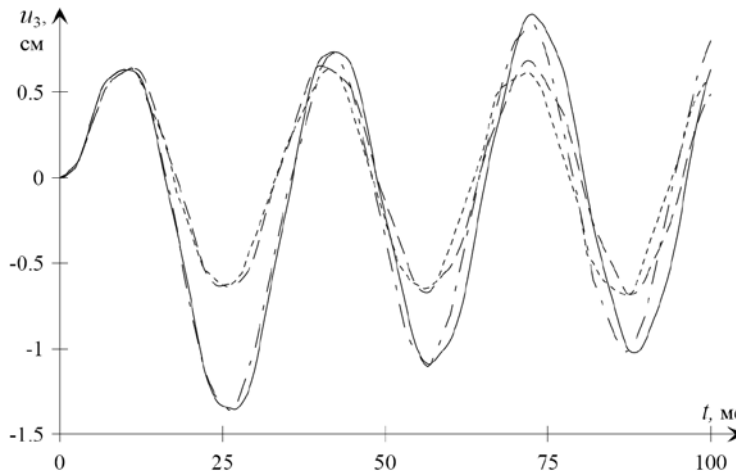


Рис. 3. Зміна за часом прогинів.

Розглянуто вплив повітряної ударної хвилі з тими ж параметрами на оскління деяких вантажних автомобілів. Композицію спеціального оскління для цих автомобілів раніше було підібрано у роботі [4]. Запропоноване оскління, згідно з вимогами по міцності, витримує надлишковий тиск з параметрами  $\Delta p = 30$  кПа й  $\tau_+ = 1$  с. Це тришарове скло, зовнішні шари якого виготовлено з СС з механічними характеристиками  $E_i = 6,8 \cdot 10^4$  МПа,  $\nu_i = 0,22$ ,  $\rho_i = 2500$  кг/м<sup>3</sup> ( $i = 1, 3$ ), а внутрішній – з ПВБ,

характеристики якого становлять  $E_2 = 280$  МПа,  $\nu_2 = 0,38$ ,  $\rho_2 = 1200$  кг/м<sup>3</sup>. Типи автомобілів та геометричні параметри оскління наведено у табл. 1.

У табл. 2 наведено максимальні значення напружень на зовнішніх поверхнях несучих шарів, отримані на основі запропонованої методики при використанні моделі ударного імпульсу у вигляді експоненційної залежності із урахуванням та без урахування фази розрідження.

Таблиця 1

Геометричні параметри вітрових стекол

Тип автомобіля	$A \times B$ , мм	Композиція $h_1(h_2)h_3$ , мм
КамАЗ-5320, КамАЗ-4310	1024 x 662	5 (2) 5
Урал-375, Урал-432	788 x 384	3 (2) 3
КрАЗ-260	855 x 563	3 (2) 5

Таблиця 2

Напруження в шарах оскління

Тип автомобіля	Номер шару $i$	Напруження $p_{ii}$ , МПа			
		без урахування стадії розрідження		із врахуванням стадії розрідження	
		Min	max	min	max
КамАЗ-5320 КамАЗ-4310	1	-9,29	7,28	-9,29	8,52
	3	-7,29	9,28	-8,52	9,28
Урал-375 Урал-432	1	-7,77	6,18	-7,77	7,79
	3	-6,18	7,77	-7,79	-7,77
КрАЗ-260	1	-10,56	9,72	-10,56	10,87
	3	-9,18	9,95	-10,24	9,95

Видно, що урахування фази розрідження змінює значення і розподіл напружень у шарах оскління, але не так істотно, як це було у попередньому випадку. Різниця результатів без та з урахуванням фази розрідження не перевищує 20%, але максимальні значення розтягуючих напружень залишилися практично незмінними для усіх видів оскління. Тільки в осклінні КрАЗу спостерігалось зростання цих напружень на 9%. Це пов'язано з тим, що періоди першого тону оскління для розглянутих автомобілів є меншими, ніж для розглянутого вище випадку архітектурного оскління, при однаковій для всіх випадків тривалості впливу фази стискування.

Проведено дослідження впливу тривалості дії фази стискування на НДС оскління автомобіля марки КамАЗ. У табл. 3 наведено максимальні значення напружень посередині внутрішньої поверхні скла при зменшенні тривалості фази стискування. З таблиці видно, що при зменшенні параметру  $\tau_+$  спостерігається істотне підвищення рівня максимальних значень напружень при урахуванні впливу фази розрідження. Для випадку 1,925 мс різниця складає 87%.

Таблиця 3

Напруження в шарах оскління при зміні тривалості фази стиску

Тривалість фази стиску $\tau_+$ , мс	Напруження $p_{ii}$ , МПа			
	без урахування стадії розрідження		із врахуванням стадії розрідження	
	min	max	min	max
7,7	-7,29	9,28	-8,52	9,28
3,85	-6,88	7,25	-9,45	7,18
1,925	-4,98	4,98	-9,33	7,21

### Висновки

Проведено дослідження відгуку багатошарового оскління на дію повітряної ударної хвилі. Математична модель, що описує вплив повітряної ударної хвилі на оскління, базується на експоненціальній залежності і враховує не тільки вплив фази підвищеного тиску, а й фази розрідження. Поведінка оскління описується на основі узагальненої теорії пластин. Розв'язок рівнянь отримано аналітико-чисельним методом. Наведено результати розрахунку НДС тришарових стекол на вплив повітряної ударної хвилі без урахування та з урахуванням фази розрідження. Результати порівнювалися із даними, отриманими іншими

дослідниками. Встановлено, що для деяких типів оскління врахування фази розрідження є необхідним. Показано, що врахування впливу цієї фази може приводити до збільшення прогинів і напружень у шарах скла майже у два рази.

Запропонована методика може бути використана при проектуванні не тільки багатошарового оскління, але й інших елементів конструкцій спецтехніки МО та МНС.

Роботу виконано у рамках Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин" ("Ресурс-2").

#### Список використаної літератури

1. Birman V. Behaviour of laminated plates subjected to conventional blast / V. Birman, C.W. Bert // Intern. J. Impact Engineering. – 1987. – Vol. 6, № 3. – P. 145-155.
2. Teng T.L. Transient dynamic large-deflection analysis of panel structure under blast loading / T.L. Teng, C.C. Liang, C.C. Liao // JSME Intern. J. Ser. A. – 1995. – Vol. 39, № 4. – P. 591-597.
3. Turkmen H.S. Nonlinear structural response of laminated composite plates subjected to blast loading / H.S. Turkmen, Z. Mecitoglu // AIAA J. – 1999. – Vol. 37, № 12. – P. 1639-1647.
4. Математичне моделювання процесу деформування багатошарового оскління пожежних автомобілів при нестационарних навантаженнях / Є.В. Свет, О.М. Шупіков, Н.В. Сметанкіна, С.В. Угримов, Н.В. Долгополова, Н.Г. Гармаш // Вестник Херсон. нац. техн. ун-та. – 2012. – № 2(45). – С. 325-329.
5. Розрахунок багатошарових елементів конструкцій атомних електростанцій при нестационарних впливах / Н.В. Сметанкіна, С.В. Угримов, Н.В. Долгополова, О.М. Шупіков // Проблемы машиностроения. – 2003. – Т. 6, № 4. – С. 41-51.
6. Smith J.L. Glazing hazard mitigation technology / J.L. Smith, B. Hall, N. Renfroe // Protective Glazing Association: 1st Annual Educational Seminar, (Washington DC, April 21-23, 1999 y.). – Washington DC, 1999.
7. Krauthammer T. Negative phase blast effects on glass panels / T. Krauthammer, A. Altenberg // Intern. J. of Impact Engineering. – 2000. – Vol. 24(1). – P. 1-17.
8. Dharani L.R. Dynamic response of laminated glass under blast loading: effect of negative phase / L.R. Dharani, J. Wei // Structures under shock and impact VIII. – 2004. – P. 181-190.
9. Wei J. Dharani. Response of laminated architectural glazing subjected to blast loading / J. Wei, L.R. Dharani // Intern. J. of Impact Engineering. – 2006. – Vol. 32(12). – P. 2032-2047.
10. Experimental and numerical investigations of laminated glass subjected to blast loading / M. Larcher, G. Solomos, F. Casadei, N. Gebbeken // Intern. J. of Impact Engineering. – 2012. – Vol. 39(1). – P. 42-50.
11. Teich M. The influence of the underpressure phase on the dynamic response of structures subjected to blast loads / M. Teich, N. Gebbeken // Intern. J. of Protective Structures. – 2010. – Vol. 1(2). – D. Fay // Intern. J. of Protective Structures. – 2014. – Vol. 5 (1). – P. 1-20.
12. Саргсян А.Е. Динамика сооружений атомных станций при особых воздействиях / А.Е. Саргсян, В.Г. Бедняков, А.П. Кириллов и др. // Энергетика и электрификация. Атомные электростанции. – 1991. Вып. 6. – 48 с.
13. Бирбраер А.Н. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях / А.Н. Бирбраер, С.Г. Шульман. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 250 с.
14. Баум Ф. А. Физика взрыва / Ф. А. Баум, П. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
15. Kinney G.F. Explosive Shocks in Air, The Macmillan Company. – New York, 1962. – P. 75.
16. Structures to resist the effects of accidental explosions: UFC-3-340-02 [5 December 2008]. Superseding: ARMY TM 5-1300. US Department of Defence Washington USA.
17. Нестационарные колебания многослойных пластин и оболочек и их оптимизация / А.Н. Шупіков, Я.П. Бузько, Н.В. Сметанкіна, С.В. Угримов. – Харьков: Изд-во ХНЭУ, 2004. – 252 с.
18. Ugrimov S.V. Layered orthotropic plates. Generalized theory / S. V. Ugrimov, A. N. Shupikov // Composite Structures. – 2015. – Vol. 129, № 1. – P. 224-235.
19. Григолюк Э. И. Теория вязкоупругих многослойных оболочек с жестким наполнителем при конечных прогибах / Э. И. Григолюк, П. П. Чулков // Журн. прикладной механики и техн. физики. – 1964. – № 5. – С. 109-117.
20. Сметанкіна Н. В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек / Н. В. Сметанкіна. – Харьков: Миськдрук, 2011. – 376 с.
21. High-order theory of multilayer plates. The impact problem / A.N. Shupikov, S.V. Ugrimov, A.V. Kolodiazhny, V.G. Yareschenko // Intern. J. of Solids and Structures. – 1998. – Vol. 35, № 25. – P. 3391-3404.
22. Сметанкіна Н.В. Математичне моделювання процесу нестационарного деформування багатошарового оскління при розподілених та локалізованих силових навантаженнях / Н.В. Сметанкіна, О.М. Шупіков, С.В. Угримов // Вестник Херсон. нац. техн. ун-та. – 2016. – Вып. 3(58). – С. 408-413.

УДК 532.516

С.В. ТАРАСОВ, Д.А. РЕДЧИЦ, А.С. ТАРАСОВ  
Институт транспортных систем и технологий НАН Украины  
С.В. МОЙСЕЕНКО  
Херсонский национальный технический университет**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБТЕКАНИЯ  
СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ**

*В работе проведены комплексные исследования аэродинамики симметричных и несимметричных профилей с замкнутым и разомкнутым контуром. Численное моделирование выполнено на базе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS), с использованием дифференциальной однопараметрической модели турбулентности Spalart-Allmaras, адаптированной к тензору скоростей деформаций (SALSA). Получены картины турбулентного обтекания различных профилей, установлены зависимости коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы от угла атаки. Проведено детальное сравнение полей течения при обтекании этих профилей. Результаты расчетов хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Сравнительный анализ результатов расчетов показал, что увеличение угла атаки приводит к резкому возрастанию коэффициента лобового сопротивления у несимметричных профилей. В то же время несимметричные профили с разомкнутым контуром обладают гораздо большими значениями подъемной силы, чем с замкнутым контуром.*

*Ключевые слова: симметричный и несимметричный аэродинамический профиль, уравнения Навье-Стокса, модель турбулентности.*

С.В. ТАРАСОВ, Д.О. РЕДЧИЦЬ, А.С. ТАРАСОВ  
Институт транспортних систем і технологій НАН України  
С.В. МОЙСЕЄНКО  
Херсонський національний технічний університет**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБТІКАННЯ СИМЕТРИЧНИХ І  
НЕСИМЕТРИЧНИХ ПРОФІЛІВ**

*В роботі проведено комплексні дослідження аеродинаміки симетричних і несиметричних профілів із замкнутим і розімкнутим контуром. Чисельне моделювання виконано на базі усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (URANS), з використанням диференціальної однопараметричної моделі турбулентності Spalart-Allmaras, адаптованої до тензора швидкостей деформацій (SALSA). Отримано картини турбулентного обтікання різних профілів, встановлено залежності коефіцієнтів лобового опору і підйомної сили від кута атаки. Проведено детальне порівняння полів течії при обтіканні цих профілів. Результати розрахунків добре узгоджуються з наявними експериментальними даними. Порівняльний аналіз результатів розрахунків показав, що збільшення кута атаки приводить до різкого зростання коефіцієнта лобового опору у несиметричних профілів. У той же час несиметричні профілі з розімкненим контуром мають набагато більші значення підйомної сили, ніж із замкнутим контуром.*

*Ключові слова: симетричний і несиметричний аеродинамічний профіль, рівняння Нав'є-Стокса, модель турбулентності.*

S.V. TARASOV, D.O. REDCHYTS, A.S. TARASOV  
Institute of Transport Systems and Technologies of Ukrainian National Academy of Science  
S.V. MOISEENKO  
Kherson National Technical University**AERODYNAMICS OF J-AIRFOIL IN TURBULENT FLOW OF AIR  
AT ARBITRARY ANGLE OF ATTACK**

*In the work, complex studies of the aerodynamics of symmetric and asymmetric airfoils with a closed and open contour were carried out aimed at improving existing and developing new effective designs of vertical-axis wind turbine rotors. The authors have developed a specialized CFD package in which a compromise between the required computational resources and the quality of the results. On the one hand, provide a complete approach of computational fluid dynamics based on the Navier-Stokes equations, including several differentiated turbulence models, as well as multi-block approach for the flows in multiply connected domains. Designed CFD package allows us to solve the problem of dynamics and aerodynamics, including electrodynamic processes, electrochemistry, multiphase fluids, combustion processes and plasma kinetics. Visualization of turbulent flow around various airfoils is obtained. A detailed comparison of the flow fields around these airfoils is carried out. The stages of generation, development and stalling of vortices are described in the flow around the airfoils of the Darrieus rotor blade. The dependences of the drag and lift coefficients on the angle of attack are established. The*

*effect of the degree of closure of an asymmetric J-profile on its aerodynamic characteristics is established and compared with the values for symmetric profiles, as well as with experimental data. A comparative analysis of the results of calculations showed that an increase in the angle of attack leads to a sharp increase in the drag coefficient for asymmetric airfoils. At the same time, asymmetric airfoils with an open contour have much higher lift coefficients than with a closed contour, which can increase the power coefficient of vertical-axis wind turbine with Darrieus rotor. Therefore, the direction of further research can be to optimize the shape of the J-airfoil in order to reduce the drag coefficient and increase the lift coefficient.*

*Keywords: symmetric and asymmetric aerodynamic airfoil, Navier-Stokes equations, turbulence model*

### Постановка проблемы

На сегодняшний день в качестве профиля лопасти ротора Дарье вертикально-осевой (ВО) ветроэнергетической установки (ВЭУ) применяют симметричные профили замкнутого контура. Это обусловлено известными аэродинамическими характеристиками по данным профилям и хорошим пониманием физики обтекания. Классические аэродинамические профили, которые используют в качестве лопасти в Н-роторах Дарье ВО ВЭУ, как правило, работают при углах атаки  $\pm 15^\circ$ .

Для увеличения коэффициента использования энергии ветра ВО ВЭУ с Н-ротором Дарье целесообразно использовать профили лопастей с улучшенными аэродинамическими свойствами. К таким можно отнести профили несимметричной формы замкнутого и разомкнутого контура. Новая форма профиля, так называемый J-профиль, получается, если у стандартного профиля вырезать часть несущей поверхности [2]. Предполагается, что данная форма профиля позволяет работать лопасти ротора Дарье, как за счет подъемной силы, так и за счет силы лобового сопротивления. Применение J-профиля лопасти может повысить эффективность работы ВЭУ в целом, избежать возникновения "мертвых зон" и снизить минимальную скорость ветра, необходимую ротору Дарье для самозапуска и работы.

### Цель исследования

Целью настоящей работы являются комплексные исследования аэродинамики симметричных и несимметричных профилей с замкнутым и разомкнутым контуром, направленные на совершенствование существующих и разработку новых эффективных конструкций роторов ВО ВЭУ.

**Постановка задачи.** Математическое моделирование аэродинамики лопастей ротора Дарье замкнутого и разомкнутого контура симметричной и несимметричной формы проведено с использованием нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS), замкнутых дифференциальной однопараметрической моделью турбулентности (SALSA) [6]. В качестве начальных условий задавались параметры невозмущенного потока во всей расчетной области. На внешней границе применялись неотражающие граничные условия, для расчета которых использовался метод характеристик. На поверхности твердого тела ставилось условие прилипания. В модели турбулентности SALSA значение рабочей переменной на теле задавалось равным нулю, на выходной границе ставилось условие Неймана.

### CFD пакет и его верификация

Для численного решения поставленной задачи использовался разработанный специализированный пакет вычислительной аэродинамики (CFD пакет) на основе уравнений Навье-Стокса, включая несколько дифференциальных моделей турбулентности, для расчета стационарных и нестационарных ламинарных и турбулентных течений.

Система исходных уравнений записывалась относительно произвольной криволинейной системы координат. Согласование полей давления и скорости осуществлялось с помощью метода искусственной сжимаемости, модифицированного для расчета нестационарных задач [5]. Интегрирование системы исходных уравнений осуществлялось численно с использованием метода контрольного объема. Для конвективных потоков использовалась противопоточная аппроксимация Rogers-Kwak [5], основанная на схеме Roe третьего порядка точности. В моделях турбулентности для аппроксимации конвективных слагаемых применялась схема TVD с ограничителем потоков ISNAS третьего порядка. Производные в вязких членах аппроксимировались центрально-разностной схемой второго порядка. Алгоритм решения уравнений базируется на трехслойной неявной схеме с подитерациями по псевдовремени второго порядка точности по физическому времени. Полученная блочно-матричная система линейных алгебраических уравнений решалась методом минимизации обобщенной невязки GMRES с ILU(k) предобуславливанием.

В качестве верификации разработанного CFD пакета рассмотрено обтекание неподвижного и вращающегося цилиндра; докритическое и закритическое обтекание неподвижного и колеблющегося профиля; турбулентное обтекание многоэлементного профиля; роторов ВО ВЭУ Дарье и Савониуса [1, 3, 4].

### Изложение основного материала исследования

Проведено компьютерное моделирование аэродинамики лопастей ротора Дарье замкнутого и разомкнутого контура симметричной и несимметричной формы в диапазоне углов атаки  $\pm 15^\circ$  на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса несжимаемой жидкости.

В натурном эксперименте длина хорды профиля J1 составляет 0,185 м, толщина 0,001 м. Передняя часть профиля представляет собой часть окружности радиусом 0,03 м. В нижней части окружность



сопрягалась с кривой, которая формирует закрытую часть профиля. Скорость набегающего потока составляла 30 м/с. При численном моделировании в качестве характерного размера была выбрана хорда профиля. Число Рейнольдса, рассчитанное по хорде и скорости набегающего, потока составляет  $3,7 \cdot 10^5$ .

Геометрия профилей различной формы в безразмерном виде приведена на рис. 1. Такое положение профилей соответствует нулевому углу атаки. За положительный угол атаки принимаем положение профиля при повороте его против часовой стрелки. На рис. 1 а-в представлены J-профили с различной степенью закрытости. Если замкнуть J-профиль, получим несимметричный замкнутый профиль (рис. 1 г). Для сравнения с несимметричными профилями замкнутого и разомкнутого контура возьмем близкий по толщине классический симметричный аэродинамический профиль NASA 0025.

В дальнейшем для удобства обозначим профили следующим образом: J0 (рис. 1 а), J1 (рис. 1 б), J2 (рис. 1 в), JC (рис. 1 г), NASA 0025 (рис. 1 д).

Получены картины турбулентного обтекания различных профилей замкнутого и разомкнутого контура симметричной и несимметричной формы, установлены зависимости коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы от угла атаки, проведено детальное сравнение полей течения при обтекании этих профилей.

В настоящей работе для численного моделирования процессов аэродинамики профилей применяются структурированные сетки. Если позволяет геометрия, то строится одноблочная структурированная сетка типа-O (рис. 2 а, г, д). В ином случае применяются многоблочные структурированные сетки типа Chimera (рис. 2 б, в), которые являются комбинацией пересекающихся сеток типа-O и -H. Расчетные сетки содержали от  $1,1 \cdot 10^5$  до  $1,4 \cdot 10^5$  узлов в зависимости от сложности геометрии.

Турбулентное обтекание профилей замкнутого и разомкнутого контура симметричной и несимметричной формы при угле атаки  $-15^\circ$  носит стационарный отрывной характер. Во внутренней полости разомкнутых профилей формируется стационарная отрывная зона с одним (рис. 3 а, в) либо двумя (рис. 3 б) макровихрями. Интенсивность этих вихрей уменьшается с увеличением степени закрытости J-профиля. На подветренной стороне замкнутых профилей формируется стационарная отрывная зона (рис. 3 г, д). Ее размеры зависят от формы обтекаемого профиля. Так, для несимметричного профиля (рис. 3 г) ее размеры минимальны, так как форма профиля близка к форме симметричного профиля при нулевом угле атаки. В то же время обтекание симметричного профиля (рис. 3 д) соответствует докритическому режиму обтекания без массивного срыва потока с верхней подветренной поверхности.

Для данного угла атаки коэффициенты лобового сопротивления различных профилей близки между собой (рис. 7 а). Это обусловлено отсутствием срыва потока с несущих поверхностей. Небольшое отличие в значениях является следствием различной относительной толщины этих профилей.

В то же время для значений коэффициента подъемной силы наблюдается широкий разброс (рис. 7 б). Так симметричный замкнутый профиль NASA 0025 ведет себя "классически" на докритических углах атаки – с увеличением угла атаки происходит рост подъемной силы и силы лобового сопротивления. При угле атаки  $-15^\circ$  несимметричный замкнутый профиль JC создает небольшую подъемную силу, так как давление на верхней и нижней поверхности практически одинаково, за исключением небольшого участка вблизи задней кромки. Для разомкнутого профиля J2 часть несущей поверхности в этой области отсутствует, поэтому коэффициент подъемной силы близок к нулю. Для несимметричных профилей с разомкнутым контуром J0 и J1 коэффициенты подъемной силы имеют отрицательные значения. Фактически эти профили при данном угле атаки работают как антикрыло, т.е. создают не подъемную силу, а прижимную. Этот факт объясняется отсутствием большей части верхней поверхности, что приводит к уменьшению скорости потока в этой области и, как следствие, к увеличению давления.

При угле атаки  $-5^\circ$  картина обтекания рассматриваемых профилей является стационарной (рис. 4). Размеры отрывной зоны во внутренней полости профиля J0 несколько меньше, чем при угле  $-15^\circ$  (рис. 4 а). Набегающий поток прижимает отрывную зону к внутренней поверхности профиля J0. В то же время у профиля J1 (рис. 4 б) вся внутренняя область представляет собой один большой макровихрь. Для профиля J2 (рис. 4 в) картина обтекания близкая к той, что приведена на (рис. 3 в). На нижней поверхности несимметричного профиля с замкнутым контуром JC происходит рост отрывной зоны (рис. 4 г). Обтекание симметричного профиля NASA 0025 происходит без отрыва потока (рис. 4 д). Такая картина обтекания хорошо согласуется с имеющимися представлениями о режимах обтекания симметричного профиля типа NASA 00XX.

Значения коэффициентов лобового сопротивления исследуемых профилей для данного угла атаки близки между собой и не сильно отличаются от значений, полученных при угле  $-15^\circ$  (рис. 7 а).

Коэффициенты подъемной силы профилей имеют широкий разброс при угле атаки  $-5^\circ$  (рис. 7 б). Так, для профиля J0 происходит рост (по модулю) значений коэффициента подъемной силы, а для профиля J1 остаются почти постоянными. Это объясняется тем, что давление на нижней внешней поверхности уравновешивается давлением на нижней внутренней поверхности. Для несимметричного профиля с разомкнутым контуром J2 рост (по модулю) значений коэффициента подъемной силы обусловлен падением давления на нижней поверхности и увеличением на верхней. Давление во внутренней зоне почти постоянно

и не оказывает существенного влияния на перепад давления на внешних поверхностях. Несимметричный замкнутый профиль JC поменял направление подъемной силы, а значение по модулю осталось почти прежним. Для симметричного профиля NASA 0025 значение коэффициента подъемной силы уменьшилось почти в два раза в сравнении со значениями при угле атаки  $-15^\circ$ .

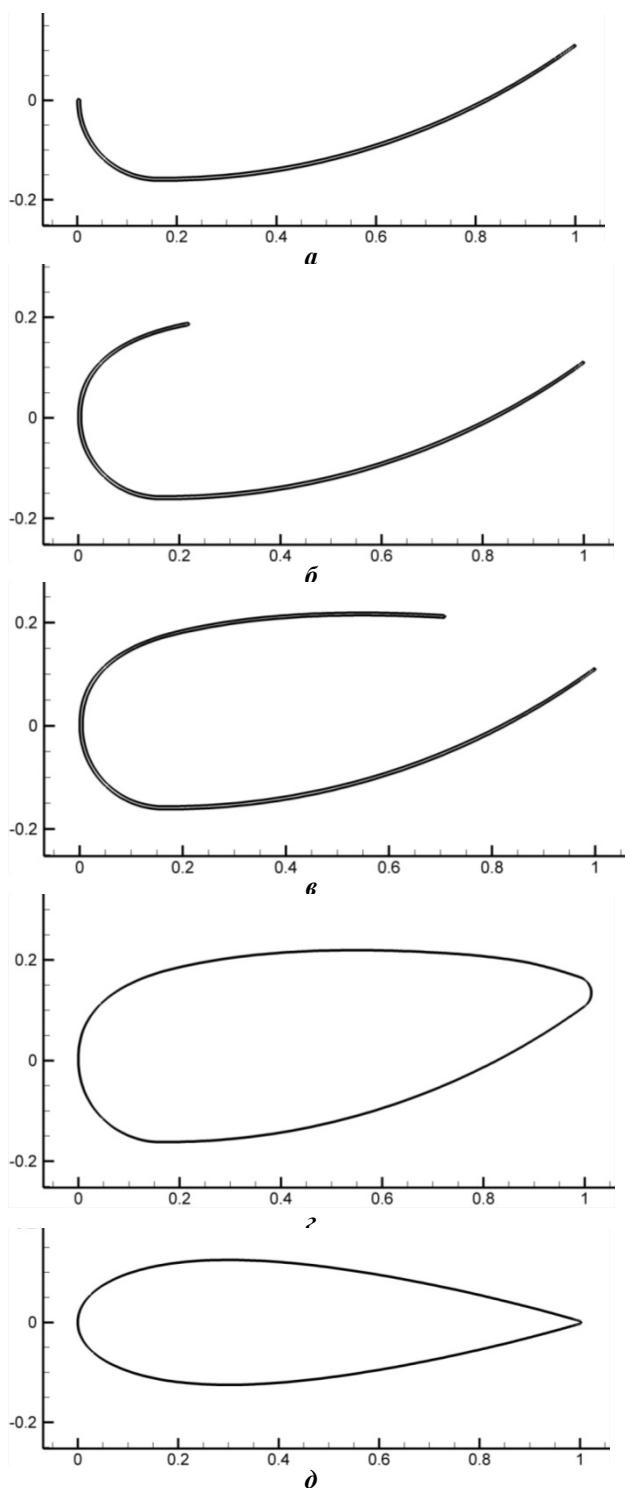


Рис 1. Геометрия профилей различной формы: разомкнутый несимметричный J-профиль с различной степенью закрытости (а, б, в); несимметричный (г) и симметричный (д) замкнутый профиль

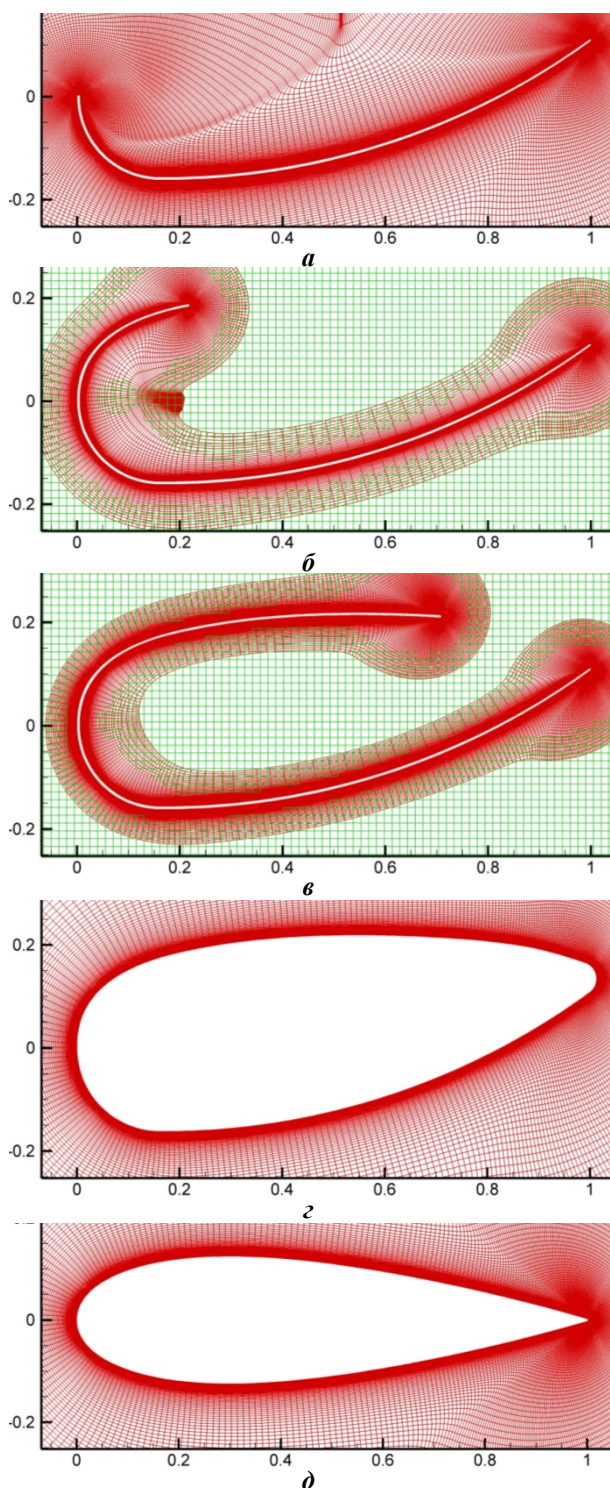


Рис 2. Структурированная сетка вокруг разомкнутого а – J0; б – J1; в – J2 и замкнутого профиля г – JC; д – NASA0025



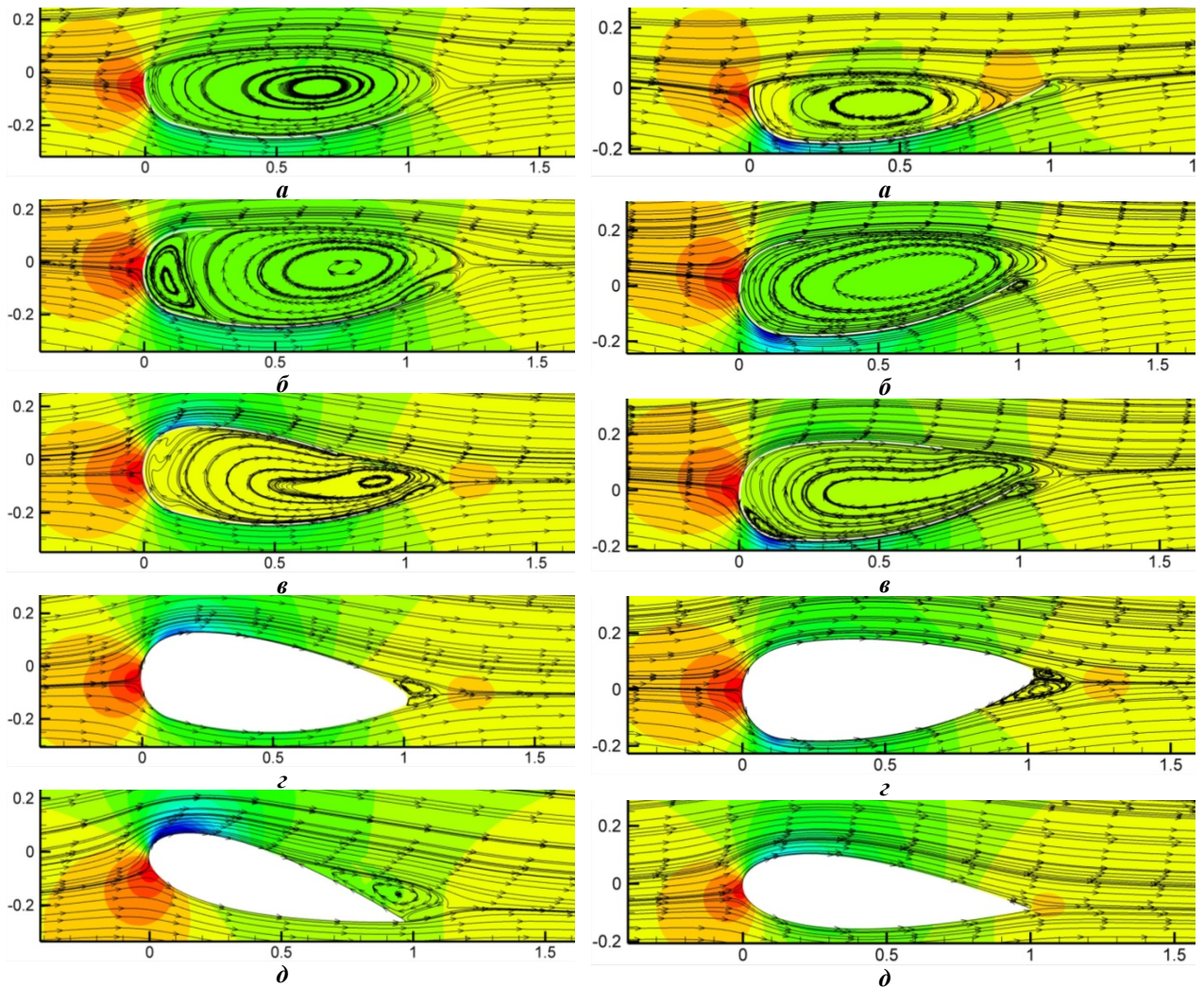


Рис 3. Турбулентне обтекание профилей замкнутого (г, д) и разомкнутого (а, б, в) контура симметричной и несимметричной формы при угле атаки  $-15^\circ$

Рис 4. Турбулентное обтекание профилей замкнутого (г, д) и разомкнутого (а, б, в) контура симметричной и несимметричной формы при угле атаки  $-5^\circ$

На подветренной стороне несимметричных профилей замкнутого и разомкнутого контура при угле атаки  $5^\circ$  (рис. 5 а-г) резко возрастает размер отрывной зоны. Причем ее размер одинаков как для замкнутого JC (рис. 5 г), так и разомкнутого профиля J0, J1, J2 (рис. 5 а-в). Существенное отличие в картине обтекания несимметричных профилей наблюдается для профиля J0 (рис. 5 а), так как набегающий поток воздуха напрямую попадает во внутреннюю область и практически полностью подавляет рециркуляционную зону за исключением небольшого вихря в нижней части профиля. Структура течения вокруг профиля NASA 0025 такая же, как и при угле атаки  $-5^\circ$  (рис. 5 д) в силу симметрии профиля.

В значениях коэффициента лобового сопротивления особых изменений не наблюдается (рис. 7 а), чего не скажешь о коэффициентах подъемной силы. Большой перепад давления между наветренной и подветренной поверхностью несимметричного профиля с разомкнутым контуром J0 приводит к большим значениям (по модулю) коэффициента подъемной силы. Для остальных несимметричных профилей с замкнутым и разомкнутым контуром эти значения практически одинаковые. Значения коэффициента подъемной силы для профиля NASA 0025 одинаковы по модулю со значениями при угле  $-5^\circ$ .

Ярко выраженный нестационарный характер обтекания несимметричных профилей наблюдается при угле атаки  $15^\circ$  (рис. 6 а-г). Набегающий поток воздуха, обтекая подветренную поверхность, резко ускоряется. Происходит срыв потока с образованием периодических вихревых структур в подветренной части профиля. Их размеры и частота схода для данного семейства профилей почти одинакова. Структура течения во внутренней полости близка к той, что формируется при угле атаки  $5^\circ$  (рис. 5 а-г), и практически не оказывает влияние на поток в подветренной зоне профиля, а проявляется в изменении интегральных характеристик. Обтекание симметричного профиля NASA 0025 (рис. 6 д) соответствует режиму обтекания данного профиля при угле  $-15^\circ$  (рис. 3 д).



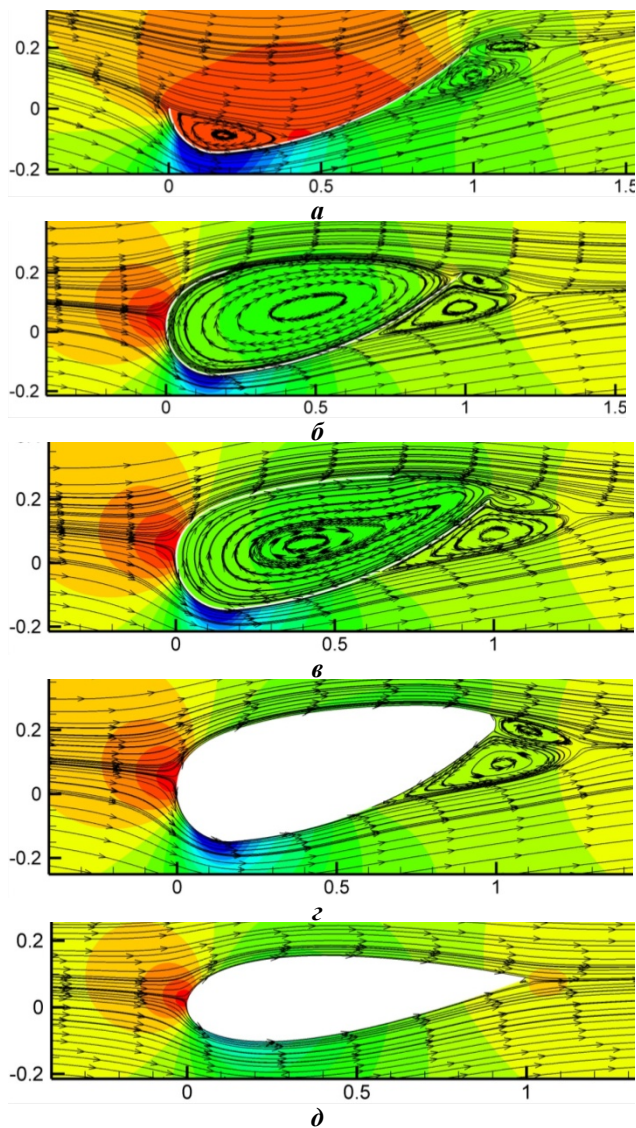


Рис 5. Турбулентне обтекание профилей замкнутого (г, д) и разомкнутого (а, б, в) контура симметричной и несимметричной формы при угле атаки 5°

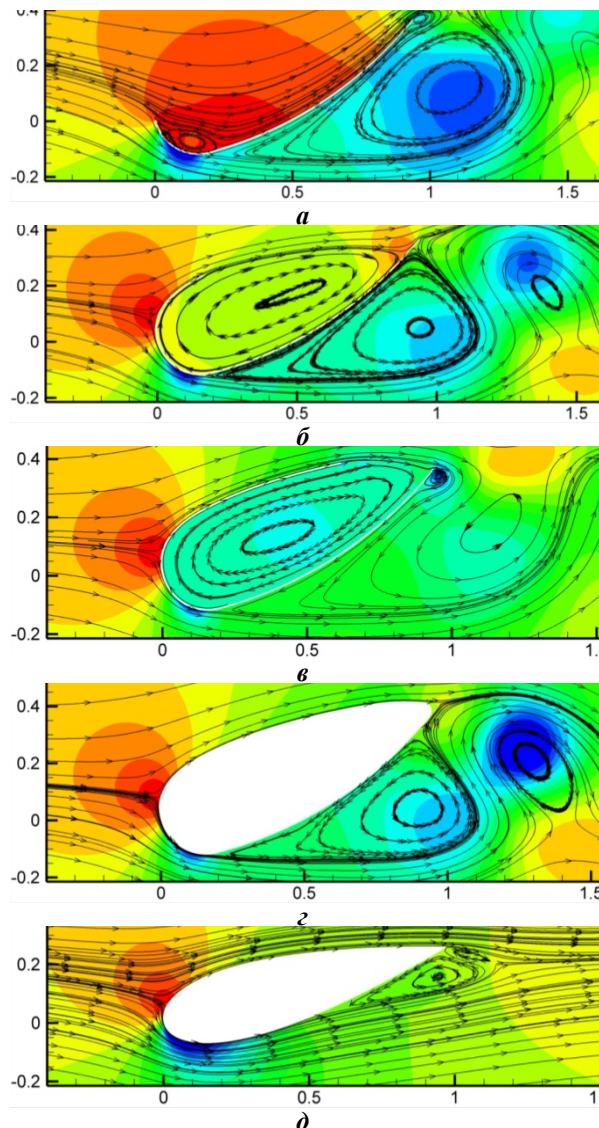


Рис 6. Турбулентное обтекание профилей замкнутого (г, д) и разомкнутого (а, б, в) контура симметричной и несимметричной формы при угле атаки 15°

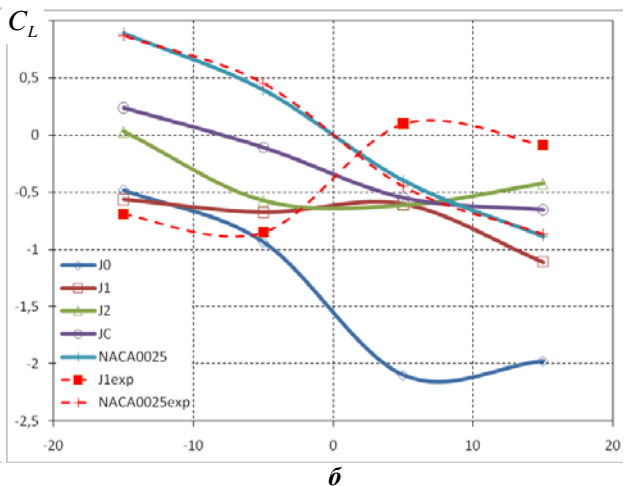
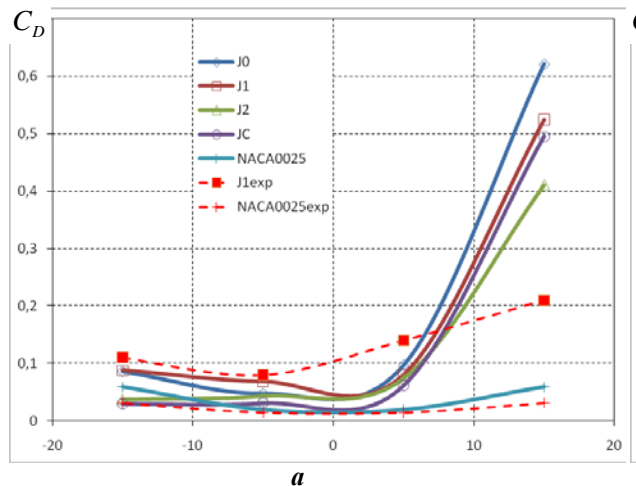


Рис 7. Зависимость коэффициентов лобового сопротивления (а) и подъемной силы (б) профилей различной формы от угла атаки

Увеличение угла атаки приводит к резкому возрастанию коэффициента лобового сопротивления у несимметричных профилей. Это связано с наличием больших вихревых структур в подветренной области профилей, которые приводят к резкому падению давления в этой зоне. А большой перепад давления между наветренной и подветренной сторонами профиля приводит к высоким значениям коэффициента лобового сопротивления. Причем, чем меньше степень закрытости J-профиля, тем выше эти значения, за исключением профиля J2. Такая же картина наблюдается и по коэффициенту подъемной силы. Максимальным по модулю коэффициентом обладает профиль J0, а минимальным J2.

Подводя итоги, можно сказать, что результаты численного моделирования симметричного профиля НАСА 0025 хорошо согласуются с экспериментальными данными в исследуемом диапазоне углов атаки. В то же время сравнение с экспериментальными данными по несимметричному профилю с разомкнутым контуром J1 показывает широкий разброс данных.

#### Выводы

Проведены комплексные исследования аэродинамики симметричных и несимметричных (в том числе разомкнутых) профилей направленные на совершенствование существующих и разработку новых эффективных конструкций роторов ВО ВЭУ. Установлено влияния степени замкнутости несимметричного J-профиля на его аэродинамические характеристики и проведено их сравнение со значениями для симметричных профилей, а также с экспериментальными данными. Сравнительный анализ результатов расчетов показал, что увеличение угла атаки приводит к резкому возрастанию коэффициента лобового сопротивления у несимметричных профилей. Использование в качестве лопасти ротора Дарье профиля с относительно большой толщиной может привести к снижению эффективности работы вертикально-осевой ВЭУ из-за большого лобового сопротивления. В то же время несимметричные профили с разомкнутым контуром обладают гораздо большими значениями подъемной силы, чем с замкнутым контуром, что может повысить коэффициент мощности ВО ВЭУ с ротором Дарье. Поэтому направлением дальнейших исследований может быть оптимизация формы J-профиля с целью снижения коэффициента лобового сопротивления и увеличения коэффициента подъемной силы. Для выработки рекомендаций о применимости конкретных конструктивных вариантов несимметричных профилей замкнутого и разомкнутого контура в роторе Дарье ВО ВЭУ необходимо провести ряд дополнительных исследований в сравнении с роторами на базе классических аэродинамических профилей.

#### Список использованной литературы

1. Дзензерский В.А. Математическое моделирование аэродинамики вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Дарье и Савониуса / В.А. Дзензерский, С.В. Тарасов, Д.А. Редчиц, Н. М. Хачапуридзе // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій.– 2012. – № 19. – С. 96–111.
2. Волков Н.И. Аэродинамика ортогональных ветродвигателей (некоторые математические модели и численная реализация): навч. посіб. / Н.И. Волков. – Сумы: Мрія-1, 1996. – 198 с.
3. Редчиц Д.А. Математическое моделирование отрывных течений на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса / Д.А. Редчиц // Научные ведомости Белгород. гос. ун-та. Серия Математика Физика. – 2009. – № 13. Вып. 17. – С. 118–146.
4. Редчиц Д.А. Математическое моделирование физических особенностей турбулентного обтекания многоэлементного профиля / Д.А. Редчиц // Вестник Херсонского национального технического ун-та. – 2010. Вып. 3(39). – С. 398–403.
5. Rogers S. An upwind differencing scheme for the incompressible Navier-Stokes equations / S.Rogers, D.Kwak // Journal Numerical Mathematics. – 1991. – Vol. 8. – P. 43 – 64.
6. Rung T. Restatement of the Spalart-Allmaras eddy-viscosity model in strain-adaptive formulation / T. Rung, U. Bunge, M. Schatz, F. Thiele // AIAA Journal. – 2003. – Vol. 4, № 7. – P.1396–1399.

УДК 510.6

В.Е. ХОДАКОВ, А.Е. СОКОЛОВ, Г.В. ВЕСЕЛОВСКАЯ  
Херсонский национальный технический университет**МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МОТИВАЦИИ ОБУЧАЕМЫХ**

*Рассмотрены сложные, нестационарные задачи моделирования динамики мотивации обучаемых. Базовой концепцией мотивации выбрано стремление к оптимальной стратегии поведения. Изучены задачи изменения мотивации обучаемых в процессе обучения. Разработана модель формирования индивидуальной функции цели и анализа динамики изменения мотивации обучаемых. Компьютерное моделирование динамики изменения мотивации обучаемых, с использованием в оптимизационной процедуре метода градиента, показало сходимость частных целевых функций обучаемых к целевой функции обучающего.*

*Ключевые слова: моделирование, точка оптимума, целевая функция, динамика, мотивация, обучение, обучаемые, обучающий,*

В.Є. ХОДАКОВ, А.Є. СОКОЛОВ, Г. В. ВЕСЕЛОВСЬКА  
Херсонський національний технічний університет**МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ МОТИВАЦІЇ ТИХ, ЯКИХ НАВЧАЮТЬ**

*Розглянуто складні, нестационарні задачі моделювання динаміки мотивації тих, яких навчають. За базову концепцію мотивації вибрано прагнення до оптимальної стратегії поведінки. Вивчено задачі змінювання мотивації тих, яких навчають, у процесі навчання. Розроблено модель формування індивідуальної функції мети й аналізу динаміки змінювання мотивації тих, яких навчають. Комп'ютерне моделювання динаміки змінювання мотивації тих, яких навчають, із використанням в оптимізаційній процедурі методу градієнту, показало збіжність часткових цільових функцій тих, яких навчають, до цільової функції того, хто навчає.*

*Ключові слова: моделювання, точка оптимуму, цільова функція, динаміка, мотивація, навчання, ті, кого навчають, той, хто навчає.*

V.YE. KHODAKOV, A. YE. SOKOLOV, G.V. VESELOVSKAYA  
Kherson National Technical University**THE MODEL OF THE MOTIVATION DYNAMICS FOR THE TRAINEES**

*The aim of the article is to consider the problems in modeling the formation dynamics of the of motivation for trainees, in which the formation of the motivation for learning is studied as a complex and non-stationary task. The content of the work (method, results, scope) is as follows. In the system, the main control link of which is the trainer, the function of the trainer goal, which is formed on the basis of past experience and the forecast for the future, initially prevails; in the learning process, the goals of the trainer and the trainees are changing quite dynamically, and the question of the training quality is reflected in the movement direction of the optimum point for the trainee objective function. In this connection: the concept of trainees motivation is based on the notion of "reasonableness" as the desire of trainees to choose the optimal strategy for behavior in the learning process; the problems of changing the motivation of trainees in the learning process are studied; a model was developed for the formation of an individual goal function and analysis of the dynamics for changes in the motivation of trainees. In the environment of the software package MATLAB, modeling in the dynamics of the motivation change for the trainees was carried out, while in the optimization procedure of the model the gradient method was used; the performed simulation showed that the particular target functions of the trainees converge to the target function of the trainee. Conclusions on the article: the proposed models were implemented programmatically and practically studied in the process of solving the problems on modeling the motivation dynamics for trainees at the Department of Information Technologies of the Kherson National Technical University; the conducted experiment allowed to confirm in practice the working capacity of the proposed conceptual and mathematical apparatus, to justify the expediency of its application in order to achieve, as a result, more effective modeling and implementation of the learning processes; the main prospect for the development of the studies carried out is an increase in the number of classes for models under consideration in the dynamics of student motivation and confirmatory computer experiments, and the optimization of their software implementations.*

*Keywords: modeling, optimum point, objective function, dynamics, motivation, training, trainees, trainer,*

### Постановка проблеми

Повышение эффективности обучения является чрезвычайно актуальным вопросом современности, что обусловлено постоянным возрастанием требований к уровню профессиональной подготовки специалистов всех сфер деятельности.

Мотивация играет огромную роль в обучении, поскольку только осознанное стремление что-либо изучить приносит гораздо более ощутимый результат, чем принудительное, немотивированное заучивание. Мотивация представляет собой осознание личностью необходимости и важности для нее изучить или сделать что-либо. Обучение является активным процессом. Без заинтересованности, без желания и стремления человека получить знания (в случае отсутствия цели и мотивации), его невозможно ничему научить [1]. Важно понимать необходимость совершенствования своих навыков. В противном случае, у человека нет мотивации к обучению. Он будет невнимательным к любой информации и сведениям, которые ему предоставляются, что снизит уровень обучения и уровень успешности того, что он делает.

Вопросам исследования и формализации процессов мотивации обучения посвящено достаточно немало научных трудов теоретического и прикладного характера. Вместе с тем, моделированию динамики мотивации обучаемых, рассматриваемому в данной статье под углом зрения задачи сложной и нестационарной, последнее время не уделялось должного внимания.

### Анализ последних исследований и публикаций

Процесс обучения представляет собой своеобразный трудовой процесс, и на него распространяются общая методология и закономерности мотивации обучения. В указанной области получены интересные результаты, большинство из которых вполне применимы к выработке приемов мотивации обучения [1–7]. Разработка мотивационных стимулов является творческим процессом. Каждый индивидуум имеет свои личные цели. Мотивация заключается в том, чтобы согласовать личные цели индивидуума и цели организации. Наиболее гармонично данная задача решается в том случае, если степень достижения личных целей определяется результатами деятельности организации в целом и уровнем вклада в них конкретного человека [1–7]. Потенциальные результаты деятельности отдельного индивида  $P$  определяются по формуле  $P = C \times M$ , где  $C$  – способность (навыки, умения, квалификация) индивида выполнять порученную ему работу, а  $M \leq 1$  – уровень его мотивации (желания выполнять работу) [2, 3]. Мотивированный индивидуум стремится максимизировать свой вклад  $P$ , что, как видно из формулы, возможно, если  $M$  стремится к единице ( $M \rightarrow 1$ ). В указанном случае, индивидуум полностью реализует свои профессиональные возможности, и дальнейший рост  $P$  связан с профессиональным совершенствованием (увеличением  $C$ ) [2, 3]. Исходя из общей характеристики мотивации, мотивационные побуждения человека есть результат воздействия культурной и социально-экономической среды. Побуждения влияют на отношение человека к работе, учебе и к жизни вообще. Мотивирующие побуждения индивида отражают воздействие различных элементов среды, то есть культуры, в которой он сформировался как личность (семьи, школы, религии, книг и т.п.). С учетом образовательной специфики, все типы мотивационных побуждений (в особенности, побуждений к достижениям и принадлежности к определенной группе, мотиваций приобретения компетенций и обладания властью) должны быть приняты во внимание и использованы при выработке мотивационных стимулов обучения [1–7].

### Цель исследования

Целью работы является: определение отдельных составляющих мотивационных процессов обучения и объединение их в систему, предназначенную для обучения коллектива обучаемых, для получения хороших (заданных) результатов в обучении; исследование и моделирование вопросов изменения целей участников мотивационных процессов обучения и реализации новых путей движения при этих изменениях.

### Изложение основного материала исследования

Будем рассматривать далее вопросы моделирования обучения при изменении целеполагания, освещая их под углом зрения исследования и моделирования динамики мотивации обучаемых. Задача формирования мотивации обучения является сложной и нестационарной.

Приступая к изучению некоторого вопроса (темы), обучаемый имеет исходные интересы и представления, что можно описать в виде некоей целевой функции в пространстве ресурсов (например, таких как время и материальные затраты). На первом этапе, обучаемый предполагает оптимальное распределение указанных ресурсов (точку оптимума) и зависимость эффективности обучения от распределения ресурсов (функцию цели). При этом следует учитывать, что для обучаемого, как для разумного существа, функция цели выпукла и, как следствие, унимодальна. Рассматривая систему с обучающим (учителем), следует учитывать его функцию цели, сформированную на основе прошлого опыта и прогноза на будущее. Исходные функции цели учеников и учителя, как правило, будут различными. В процессе обучения, когда изменяется представление о предмете, ученик, вполне естественно, изменяет представление и об оптимальном распределении ресурсов, о зависимости результатов от распределения ресурсов, а, следовательно, ученик изменяет и функцию цели. Вопрос о качестве обучения отражается в направлении движения точки оптимума целевой функции ученика: если учитель прав, то функция цели



ученика смещается в сторону оптимума функции цели учителя; если же учитель неправ, то функция цели ученика дрейфует в противоположном направлении. Важную роль играет аспект наличия ресурса системы. Если, при улучшении результата обучения за счет оптимизации целеположения обучения, обучаемый использует весь результат независимо от других членов учебной группы, то это случай системы без ограничения ресурса.

Далее приведена обобщенная поэтапная схема алгоритма моделирования динамики целеположения в системе "обучаемый – обучающий".  
 Этап 1. Начало (активизация) работы алгоритма.  
 Этап 2. Формирование функции цели учителя.  
 Этап 3. Формирование функций цели учеников.  
 Этап 4. Формирование условий распределения ресурсов.  
 Этап 5. Выбор первой модели ( $i = 1$ ).  
 Этап 6. Определение градиента.  
 Этап 7. Сдвиг частной функции цели.  
 Этап 8. Проверка условия завершения обработки всех моделей.  
 Этап 9. Если результат проверки условия на этапе 8 является положительным (условие оказалось истинным), то – осуществление перехода к этапу 10, иначе – выбор следующей модели ( $i = i + 1$ ).  
 Этап 10. Распределение ресурса.  
 Этап 11. Проверка на оптимум.  
 Этап 12. Если результат проверки условия на этапе 11 является положительным, то осуществление перехода к этапу 13, иначе – возврат к этапу 5.  
 Этап 13. Завершение работы алгоритма.

Если ресурс ограничен и обучаемые получают постоянный в сумме результат, то имеет место система с ограничением ресурса, а поведение обучаемых соответственно изменяется. Реален также случай отсутствия обучаемого, когда целеположение учащихся в группе формируется как среднее либо как оптимум для векторной задачи оптимизации.

На рис. 1 приведена реализация функции цели обучающего в координатах затрат времени и средств.

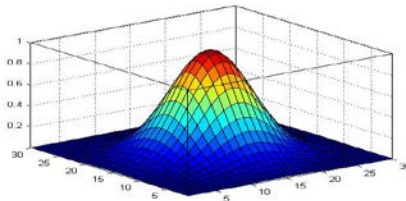


Рис. 1. Функция цели обучающего

Для случая постоянного распределения ресурса для четырех обучаемых, моделирование позволяет определить изменение функций цели (рис. 2).

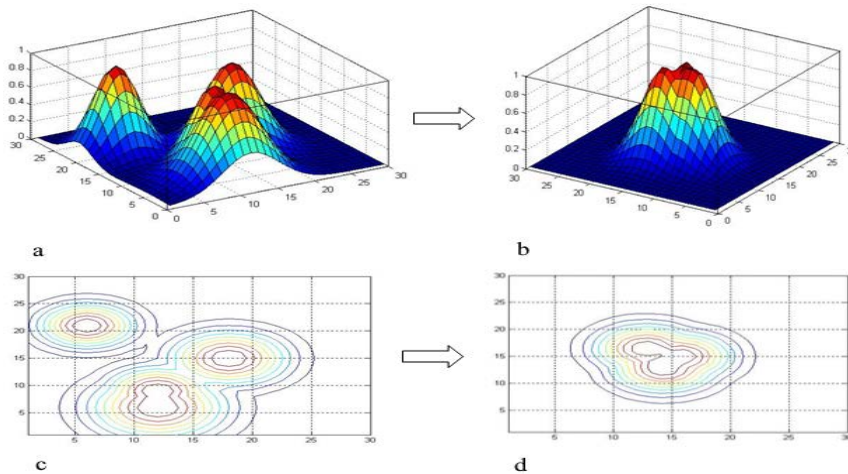


Рис. 2. Изменение функций цели учащихся  $a, b$  и линии равного уровня функций цели  $c, d$

Рассматривая задачу моделирования изменения функции цели обучаемого в процессе обучения, целесообразно отдельно выделить случай отсутствия обучающего. В указанном случае, оптимальное решение определяется неявно собственно учениками в процессе взаимодействия.

Так как каждый из членов коллектива первоначально имеет свое мнение и, соответственно, целевую функцию, то положение точки оптимума решается как векторная задача оптимизации, где выбранная точка достигает наилучшего значения для каждой функции цели.

Данная задача может быть решена с использованием критерия строгого оптимума для вектора функции:

$$\mathbf{x}^* \rightarrow \min \mathbf{f}(\mathbf{x}). \tag{1}$$



При этом критерий оптимальности формируется как задача Лагранжа с дополнительными ограничениями, имеющими смысл равенства функции цели оптимальному значению в точке оптимума:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) = \mathbf{a}. \tag{2}$$

Используя свойство выпуклости частных функций цели, получаем следующее условие оптимальности:

$$\left. \begin{aligned} \nabla L(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}^*) - \mathbf{a} &= \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\lambda}^{**}(\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) - \mathbf{a}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \right\}. \tag{3}$$

При этом, множитель Лагранжа принимает следующий вид:

$$\boldsymbol{\lambda}^{**} = \begin{pmatrix} 1 & \lambda_{12} & \lambda_{13} \cdots & \lambda_{1m} \\ \lambda_{21} & 1 & \lambda_{23} \cdots & \lambda_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \lambda_{m1} & \lambda_{m2} & \lambda_{m3} \cdots & 1 \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Учитывая особенности задачи, а именно, компактное расположение функций цели в области доступных ресурсов, можно упростить решение.

Для заданного вида строго вогнутой функции, которую используем для описания функций цели ученика и учителя:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = \begin{bmatrix} ue^{-(\mathbf{x}-\mathbf{x}_{01})^2 s} \\ \vdots \\ ue^{-(\mathbf{x}-\mathbf{x}_{0m})^2 s} \end{bmatrix} \tag{5}$$

используем в качестве оценки точки оптимума среднее смещений:

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{0i}. \tag{6}$$

Тогда для каждого компонента вектора цели получаем:

$$ue^{-\frac{1}{m^2} \left( \sum_{i=1}^m x_{0i} - nx_{0i} \right)^2} \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \max. \tag{7}$$

Следовательно, чем компактнее расположение функций цели и больше их сходство, тем точнее точка оптимума совпадает со средней координатой частных оптимумов.

Таким образом можно моделировать поведение коллектива обучаемых без обучающего (учеников без учителя), а результаты соответствующего моделирования приведены на рис. 3. Как видно из результатов моделирования, самостоятельная работа группы учащихся без обучающего неэффективна. Группа формирует сходящиеся функции цели, но сходятся они к точке, оцениваемой группой, без учета предыдущего опыта. Таким образом, задача обучения с полной свободой учащихся практически не решается.

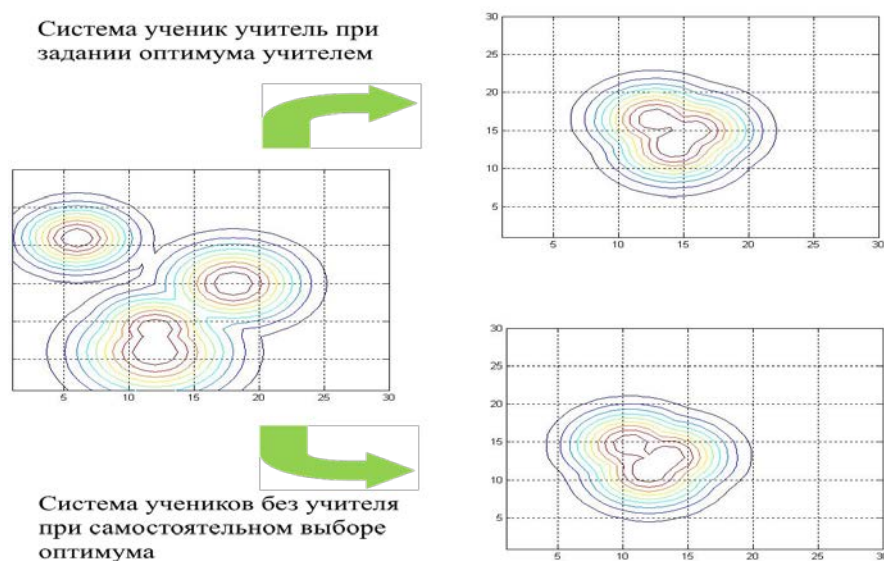


Рис. 3. Моделирование изменения функций цели в системе "обучаемый – обучающий" при наличии и отсутствии обучающего (справа на рисунке представлены результирующие функции цели)

Возможности моделирования динамики целеположения обучаемых не исчерпываются рассмотренными выше задачами. Существующие реалии предполагают еще достаточно много факторов, влияющих на формирование мотивации, которые выходят за рамки данного исследования в силу отсутствия доступных методов воздействия на них.

Кроме рассмотренного случая независимости величины получаемого индивидуального ресурса от результатов остальных членов группы, представляет интерес случай ограниченного ресурса. В этом случае, общий суммарный выигрыш неизменен, и возникают сложные траектории смещения функций цели.

#### Выводы

Рассмотрены задачи изменения мотивации обучаемых в процессе обучения, в соответствии с чем получены приведенные ниже новые результаты. В основу представления о мотивации обучаемого положено представление о "разумности" как о стремлении выбрать оптимальную стратегию поведения. Гипотеза "разумности" определяет выбор выпуклых функций цели в задачах моделирования мотивации обучаемого. Предложена математическая модель формирования индивидуальной функции цели и анализа динамики изменения мотивации обучаемых. В среде MATLAB выполнено моделирование динамики изменения мотивации группы обучаемых. В оптимизационной процедуре модели использован метод градиента, как наиболее естественный подход для данной задачи. Моделирование показало, что, при неограниченном ресурсе, в системе с обучающим частные целевые функции обучаемых сходятся в процессе обучения к целевой функции обучающего. В случае отсутствия обучающего, предположен выбор прогнозируемого оптимума как решение векторной задачи оптимизации. При моделировании, в этом случае, частные целевые функции сходятся к общей цели, но точка оптимума определяется не истинным ее положением, а интересами коллектива учеников, что ослабляет результаты обучения. Предложенная модель позволяет рассматривать задачи с ограниченным ресурсом.

#### Список использованной литературы

1. Петров Э.Г. Современные технологии обучения в высшей школе / Э.Г. Петров, Л.Н. Радванская, Н.В. Шаронова. – Харьков: Коллегиум, 2007. – 172 с.
2. Hellriegel D. Organizational Behavior / Instructor's Resource Guide to Accompany. Seventh edition / D. Hellriegel, J. Slocum, R. Woodman. – New York: West Publishing Company, 2003. – 559 p.
3. Шаронова Н.В. Организационное поведение / Н. В. Шаронова. – Харьков: ХПИ НУА, 2001. – 187 с.
4. Lippke S. Testing two principles of the health action process approach in individuals with type 2 diabetes / S. Lippke, R. C. Plotnikoff // Health Psychology. – 2014. – 33(1). – P. 77-84
5. Schwarzer R. Mechanisms of Health Behavior Change in Persons With Chronic Illness or Disability: The Health Action Process Approach (HAPA) / R. Schwarzer, S. Lippke, A. Luszczynska // Rehabilitation Psychology. – 2011. – Vol. 56(3). – P. 161-170.
6. Wiedemann A.U. Multiple plans and memory performance: results of a randomised controlled trial on fruit and vegetable intake / A.U. Wiedemann, S. Lippke, R. Schwarzer, // Journal of Behavioral Medicine. – 2012. – Vol. 35. – P. 387-392.

7. Ziegelmann J.P. Use of Selection, Optimization, and Compensation strategies in health self-regulation: Interplay with resources and successful development / J.P. Ziegelmann, S. Lippke // *Journal of Aging and Health*. – 2007. – Vol. 19. – P. 500-518.
8. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2007. – 256 с.
9. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2005. – 176 с.
10. Карпенко А.П. Популяционные методы аппроксимации множества Парето в задаче многокритериальной оптимизации Обзор. / А.П. Карпенко, А.С. Семенихин, Е.В. Митина // Электронное издательство НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ: Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". – Эл № ФС 77 – 48211. – 2012.
11. Лутманов С.В. Курс лекций по методам оптимизации / С.В. Лутманов. – Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 368 с.

УДК 658.51.012

В.Д. ХОДУСОВ

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

М.О. ПИГНАСТЫЙ

Харьковский Национальный Университет  
Радиоэлектроники "ХНУРЕ"

## О МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПОТОКОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЛИНИЙ

*Поточная линия – это динамическая распределенная система. Все большее распространение при проектировании систем управления таким поточным производством получают модели с использованием уравнений в частных производных (PDE-модели). Основными параметрами в данных моделях являются размер межоперационных накопителей и значение темпа обработки предметов труда. Их значения зависят от времени и места в технологическом маршруте (технологической позиции обработки изделия). Поточная линия постоянно испытывает колебания потоковых параметров. Наличие колебаний потоковых параметров в отдельных случаях приводит к остановке производственного процесса из-за отсутствия заготовок в межоперационном заделе перед технологической операцией или из-за переполнения межоперационного бункера после технологической операции. Так как остановка производственного процесса является недопустимым фактом в большинстве случаев, то обеспечение устойчивости функционирования параметров производственной линии относительно нормативного невозмущенного состояния является одним из главных требований, предъявляемых к производственной системе. В связи с этим, важным вопросом является определение критериев или соотношений между потоковыми параметрами производственной системы, которые позволяют предсказать остановку производственного процесса. В статье рассмотрены методы исследования устойчивости поточных линий и обсуждаются критерии в виде соотношения между потоковыми параметрами, которые позволяют определить режимы бесперебойного функционирования производственного процесса.*

*Ключевые слова: кинетическое уравнение, производственная линия, массовое производство, незавершенное производство, балансовые уравнения, квазистатический процесс, стохастический процесс.*

В.Д. ХОДУСОВ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

М.О. ПІГНАСТІЙ

Харківський Національний Університет  
Радіоелектроніки "ХНУРЕ"

## ПРО МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ПОТОКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЧИХ ЛІНІЙ

*Поточна лінія – це динамічна розподілена система. Все більше розповсюдження при проектуванні систем керування таким поточним виробництвом отримують моделі з використанням рівнянь у частинних похідних (PDE-моделях). Основними параметрами в даних моделях є розмір міжопераційних накопичувачів та значення темпу обробки предметів праці. Ці значення залежать від часу та місця в технологічному маршруті (технологічної позиції обробки виробів). Поточна лінія постійно відчуває впливи коливань потокових параметрів. Наявність коливань потокових параметрів у окремих випадках приводить до зупинки виробничого процесу через відсутність заготовок в міжопераційному заділі перед технологічною операцією або через переповнення міжопераційного бункера після технологічної операції. Оскільки зупинка виробничого процесу є неприпустимим фактом у більшості випадків, тому забезпечення стабільності функціонування параметрів виробничої лінії відносно нормативного незбуреного стану є однією з головних вимог, які висувуються до виробничої системи. У зв'язку з цим важливим питанням є визначення критеріїв або співвідношення між потоковими параметрами виробничої системи, які дозволяють передбачити зупинку виробничого процесу. В статті розглядаються методи дослідження стійкості поточних ліній і обговорюються критерії у вигляді співвідношення між потоковими параметрами, які дозволяють визначити режими безперебійного функціонування виробничого процесу.*

*Ключові слова: кінетичне рівняння, виробнича лінія, масове виробництво, незавершене виробництво, балансові рівняння, квазистатичний процес, стохастичний процес.*

V.D. KHODUSOV  
V. N. Karazin Kharkiv National University  
M.O. PIHNASTYI  
Kharkiv National University of Radio Electronics

## ABOUT METHODS OF RESEARCH OF STABILITY OF STREAM PARAMETERS OF PRODUCTION LINES

*The flow line is a dynamic distributed system. More and more widely used in the design of control systems for such flow production are models using partial differential equations (PDE-models). The main parameters in these models are the size of interpretational stocks and the pace of processing of labor items. Their values depend on the time and place in the technological route (the technological position of processing the product). The flow line constantly experiences fluctuations in the flow parameters. The presence of fluctuations in the flow parameters in some cases leads to the stopping of the production process due to the absence of blanks in the interpretational stock before the technological operation or because of the overflow of the interoperable hopper after the technological operation. Since stopping the production process is an unacceptable fact in most cases, ensuring the stability of the functioning of the parameters of the production line relative to the normative unperturbed state is one of the main requirements for the production system. In this regard, an important issue is the definition of criteria or relationships between the flow parameters of the production system, which allow us to predict the stoppage of the production process. In the article the review of the works devoted to methods of research of stability of stream parameters of production lines is given. Methods for investigating the stability of production lines using the decomposition of stream parameters along the technological route into a Fourier series are proposed. The characteristic equation of the production system for the synchronized mode of functioning of equipment along the technological route is recorded in the first approximation and its investigation is carried out. A critical case is considered in detail. Stability criteria for flow parameters in the form of interrelation of flow parameters that determine the modes of uninterrupted operation of the production process are determined.*

*Keywords: kinetic equation, the production line, mass production, work in progress, balance equations, quasi-static process, stochastic process.*

### Постановка проблеми

Вопрос устойчивого функционирования поточных линий является важнейшей теоретической и практической проблемой управления производством [1–3]. Особое значение вопрос устойчивости приобретает в тех случаях, в которых нужна большая точность и скорость управления [3–7]. Незначительные отклонения параметров поточной линии по производству полупроводниковой продукции могут приводить к крупномасштабным отклонениям потоковых параметров [8, С. 9]. Приводимые экспериментальные данные свидетельствуют о том, что об отклонения пропускной способности поточной линии от заданного нормативного значения достигают 20%. Время существования возмущений составляет нескольких недель. При рассмотрении квазистатических моделей производственных процессов подчеркивается, что PDE-уравнения и дополняющее уравнение состояния должны основываться на устойчивом поведении потоковых параметров [9, С. 4590].

Потоковые параметры производственной линии, также, как и параметры механической системы, является устойчивыми, если состояние производственного процесса мало изменяются под действием внутренних и внешних возмущающих воздействий, и наоборот, неустойчивым, если ее состояние сильно изменяются даже под действием очень малых внешних возмущающих воздействий. Если под действием малых внутренних или внешних возмущающих воздействий некоторые из потоковых параметров отклоняются от заданного технологией режима (например, режима синхронизации работы оборудования), то возникает необходимость вернуть их в первоначальное невозмущенное состояние. Перед руководителем производства встает важный вопрос: необходимо ли для этого использовать имеющиеся в распоряжении технологические ресурсы или для поточной линии восстановится исходное состояние параметров самостоятельно, без дополнительных затрат технологических ресурсов?

### Анализ последних исследований и публикаций

Поточная линия постоянно испытывает колебания потоковых параметров [2; 8, С. 9]. Если управляющие воздействия организованы в требуемом объеме, то отклонения от заданного технологией режима будут оставаться малыми. В этом случае поведение потоковых параметров будет устойчиво. Если же этого добиться не удастся, то отклонения потоковых параметров с течением времени могут привести к переполнению межоперационных накопителей или их опустошению, что приведет к остановке поточной линии [11]. Функционирование поточной линии может стать неустойчивым как от внутренних, так и от внешних возмущающих факторов, возникающих внезапно или непрерывно. Отключение подачи электроэнергии, выход из строя теплообменника, компрессора или другого оборудования могут настолько нарушить нормальный режим производства, что производственный процесс станет неустойчивым. Устойчивость функционирования производственной линии является одним из главных требований,

предъявляемых к производственной системе [9, 11]. Основная задача сохранения устойчивости параметров производственного процесса состоит в определении признаков устойчивости или неустойчивости [11–13; 14, С. 1077]. Исследование устойчивости потоковых параметров не представляет серьезных трудностей в тех случаях, когда дифференциальные уравнения возмущенного движения удается проинтегрировать в замкнутой форме [10]. Но такого рода случаи являются исключительными и на практике встречаются редко. Усилия исследователей направлены на то, чтобы разработать методы решения задач устойчивости, не прибегая к интегрированию уравнений движения. При этом используется часто метод линеаризации уравнений в малых возмущениях. Происходит замена нелинейной системы уравнений линейной, то есть замена одной задачи другой. Если правомерность такой замены обоснована, то следующим шагом является получение необходимых и достаточных условия устойчивости по первому приближению [13]. Выяснив условия, при которых задача решается в первом приближении, рассмотрим основные случаи, когда при исследовании устойчивости нельзя ограничиваться рассмотрением первого приближения. Приемы решения задачи устойчивости для параметров производственного процесса могут быть разделены на две категории. К первой категории относятся способы, которые заключаются в определении общего или частного решения дифференциальных уравнений. Решения приходится искать в виде рядов. Можно указать способы решения задачи устойчивости, которые не требуют поиска частных или общих решений уравнений возмущенного движения, а приводят к отысканию некоторых функций от времени и возмущенных переменных. Примером служит теорема Лагранжа об устойчивости равновесия. Устойчивость обеспечивается существованием силовой функции, обладающей специальными свойствами. В основу такого метода положено несколько основных теорем Ляпунова. Эти теоремы оказались настолько эффективными, что при их помощи удалось исключительно просто решить задачу об устойчивости параметров поточной линии в квазистатическом приближении для одного из простых случаев уравнения состояния [12, С. 4588]. Второй метод Ляпунова в настоящее время является основным методом решения задачи устойчивости. Установлена универсальность и эффективность второго метода Ляпунова для широкого круга производственных задач. При исследовании устойчивости параметров производственного процесса первым методом Ляпунова взаимосвязь параметров может быть получена из системы многомоментных балансовых уравнений [15–16]. В качестве невозмущенного решения выбирается, как правило, нормативный режим. В большинстве практических случаев таким режимом является равновесный синхронизированный режим функционирования оборудования [12, С. 4588; 9, 14]. Отклонения от невозмущенного состояния потоковых параметров, которые вызываются возмущающими воздействиями на параметры поточной линии, нежелательны.

**Изложение основного материала исследования**

Пусть потоковые параметры  $[x]_k$  получают случайные малые возмущения:

$$[y]_k = [x]_k - [x]_k^* \tag{1}$$

в окрестности  $[x]_k^*$ . Линеаризуем систему многомоментных уравнений [15] относительно малых возмущений (1) в окрестности невозмущенного состояния  $[x]_k^*$ . Системе уравнений в малых возмущениях с постоянными коэффициентами соответствует характеристическое уравнение [4, 17]. Если корни характеристического уравнения имеют отрицательную реальную часть, то параметры производственного процесса являются устойчивыми. Решение задачи устойчивости для системы уравнений в малых возмущениях усложняется в случае, если коэффициенты не являются постоянными. В данном случае эффективным представляется исследование устойчивости потоковых параметров методом функций Ляпунова [12, С. 4588; 18, С. 39]. Если удастся найти положительно определенную функцию  $V([y]_1, [y]_2, \dots, [y]_k, \dots, [y]_{N_k})$ , такую, что

$$V(0,0,\dots,0,\dots,0) \equiv 0, \quad ([y]_1, [y]_2, \dots, [y]_k, \dots, [y]_{N_k}) > 0, \quad \frac{d}{dt}V([y]_1, [y]_2, \dots, [y]_k, \dots, [y]_{N_k}) \leq 0,$$

тогда параметры производственного процесса устойчивы, причем в случае строгого неравенства – асимптотически. Простейшим случаем, когда теоремы Ляпунова дают возможность установить устойчивость невозмущенного состояния потоковых параметров, является очевидно тот, когда балансовые уравнения допускают аналитическое интегрирование уравнения движения [18, С. 39; 10, 19, 20]. Дополнительные возможности предоставляются при исследовании устойчивости потоковых параметров первым методом Ляпунова с использованием метода собственных функций. Если коэффициенты в уравнении для малых возмущений не зависят от времени, то малое произвольное возмущение можно представить в виде разложения в ряд Фурье:

$$[y]_k = \{y_k\}_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \{y_k\}_j \cdot \sin[k_j \cdot S] + \sum_{j=1}^{\infty} [y_k]_j \cdot \cos[k_j \cdot S], \quad k_j = \frac{2 \cdot \pi \cdot j}{S_d}, \tag{2}$$

где  $\{y_k\}_0, \{y_k\}_j, [y_n]_j$  – коэффициенты разложения малых возмущений  $[y]_k$  параметров  $[\chi]_k$  вдоль технологического маршрута. Подставляя в систему балансовых уравнений вместо  $[y]_k$  их разложения в ряд Фурье (2), получим системы уравнений для коэффициентов разложения малых возмущений  $[y]_k$  параметров  $[\chi]_k$  [15]. Метод собственных функций [19–22] позволяет аналитически получить критерий устойчивости по Ляпунову для потоковых параметров производственного процесса. Если производственной системе можно поставить в соответствии функционал [12, С. 4588]:

$$W = \int_0^{S_d} w(t, S) \cdot dS, \quad \frac{dW}{dt} \leq 0,$$

тогда исследование устойчивости потоковых параметров относительно малых возмущений  $[y]_n$  сводится к исследованию минимума функционала. В работе [12, С. 4588] функционал представлен виде:

$$W = \int_0^1 \left[ (m + \rho(S, t))^3 - (m + \rho_{ss}(S, t))^3 \right]^2 dS,$$

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{1}{3} [\rho(S, t) - \rho_{ss}(S, t)]^4 - \frac{2}{3} [\rho(S, t) + 2\rho_{ss}(S, t) + 3m]^2 [\rho(S, t) - \rho_{ss}(S, t)]^2 \leq 0,$$

где  $m$  – количество единиц технологического оборудования поточной линии,  $\rho(S, t), \rho_{ss}(S, t)$  плотность предметов труда вдоль технологического маршрута в возмущенном и невозмущенном состоянии соответственно. Если подынтегральная функция является первым интегралом движения или их комбинацией, тогда условие  $\frac{dW}{dt} = 0$  переходит в тождество, а исследование устойчивости потоковых параметров относительно малых возмущений  $[y]_n$  сводится к исследованию минимума функционала относительно невозмущенного состояния  $W|_0$ :

$$W - W|_0 = \left( \int_0^{S_d} w \cdot dS - W|_0 \right) = \int_0^{S_d} (w - w|_0) \cdot dS > 0.$$

Из произвольности малых возмущений  $[y]_n$  следует, что подынтегральное выражение должно быть определено положительно в любой точке  $S$ , причем равенство выполняется только для  $[y]_0 = [y]_1 = \dots = [y]_N \equiv 0$ . Рассмотренный подход широко используется при исследовании устойчивости равновесного состояния системы многих тел, получил название энергетического принципа [22, 23].

**Критерии устойчивости потоковых параметров.** Влияние малых возмущающих факторов на состояние потоковых параметров является не одинаковым для разных поточных линий [8]. Для одних поточных линий это влияние незначительно, так как возмущенное состояние потоковых параметров мало отличается от невозмущенного. Напротив, для других влияние возмущений сказывается весьма значительно, как бы ни были малы возмущающие воздействия. Так как возмущающие факторы неизбежно существуют, то задача устойчивости параметров поточных линий приобретает очень важное теоретическое и практическое значение [9, 12, 14]. Под возмущающими факторами потоковых параметров будем понимать воздействия, не учитываемые при описании технологического процесса вследствие их малости по сравнению с основными факторами, влияющими на производство и выпуск продукции. Они могут действовать как мгновенно, так и непрерывно. В первом случае их влияние сведется к малому изменению начального состояния параметров поточной линии. Во втором случае это означает, что составленные уравнения для потоковых параметров отличаются от истинных на некоторые малые поправочные члены.

*а) Условия устойчивости параметров в нулевом приближении по параметру  $Kv \ll 1$  ( $Pm \approx 1$ ) [15].* При исследовании параметров производственного процесса для случая  $Kv \ll 1, Pm \approx 1$  воспользуемся замкнутой системой уравнений балансов в нулевом приближении по малому параметру  $Kv \ll 1$  для 2-х моментного описания [25]. Условием синхронизации производительности технологического оборудования

является  $\frac{\partial[\chi]_{i\psi}}{\partial S} \Big|_0 = 0$ . Будем полагать, что существует невозмущенное решение  $[\chi]_k^* = [\chi]_k^*(t, S)$ . Пусть

параметры  $[\chi]_k$  получают случайные малые возмущения  $[y]_k = [\chi]_k - [\chi]_k^*$  (1). Линеаризованная система

балансовых уравнений в малых возмущениях  $[y]_k$  в окрестности невозмущенного состояния  $[\chi]_k^*$  с учетом условия синхронизации технологического оборудования имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial [y]_0}{\partial t} + \frac{\partial [y]_1}{\partial S} = 0, \quad A = \frac{[\chi]_{1v} - [\chi]_1}{[\chi]_0} \Big|_0, \quad \frac{\partial [\chi]_{1v}}{\partial S} \Big|_0 = 0 \quad B = \frac{[\chi]_{1v}}{[\chi]_0} \Big|_0, \\ \frac{\partial [y]_1}{\partial t} + \frac{\partial [y]_1}{\partial S} \cdot B + [y]_1 \cdot \frac{\partial B}{\partial S} + \frac{\partial [y]_0}{\partial S} \cdot A \cdot B + [y]_0 \cdot \frac{\partial (A \cdot B)}{\partial S} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Символ  $|_0$  обозначает, что разложение осуществлено в окрестности невозмущенного состояния  $[\chi]_k^* = [\chi]_k^*(t, S)$ . Период  $T_v$  существования возмущения потоковых параметров  $[\chi]_k$  составляет от нескольких дней до нескольких недель, в то время как период изменения коэффициентов  $A$  и  $B$  (3) при малых возмущениях  $[y]_k$  определяется стратегическим управлением предприятия и составляет от нескольких месяцев до нескольких лет [8, 12], ( $T_d = 8$  недель [24, С. 445]). В связи с этим будем предполагать, что для коэффициентов  $A$  и  $B$  (3) на протяжении периода  $T_v$  существования возмущения:

$$\frac{A}{T_v} \gg \frac{\partial A}{\partial t}, \quad \frac{B}{T_v} \gg \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (4)$$

и считать, что коэффициенты при малых возмущениях  $[y]_k$  в уравнениях в частных производных (3) зависят только от  $S$ . Разложим малые возмущения  $[y]_k$  потоковых параметров  $[\chi]_k$  в ряд Фурье (2). Подставляя в систему уравнений (3) вместо  $[y]_k$  их разложение в ряд Фурье, получим систему уравнений для коэффициентов разложения малых возмущений  $[y]_k$  потоковых параметров  $[\chi]_k$ :

$$\frac{d\{y_0\}_0}{dt} = 0, \quad \frac{\partial \{y_1\}_0}{\partial t} + \{y_1\}_0 \cdot \frac{\partial B}{\partial S} + \{y_0\}_0 \cdot \frac{\partial (A \cdot B)}{\partial S} = 0 \quad (5)$$

и для последующих слагаемых разложения:

$$\begin{aligned} \frac{d\{y_0\}_j}{dt} - [y_1]_j \cdot k_j = 0, \quad \frac{d[y_0]_j}{dt} + \{y_1\}_j \cdot k_j = 0, \\ \frac{\partial \{y_1\}_j}{\partial t} - [y_1]_j \cdot k_j \cdot B + \{y_1\}_j \cdot \frac{\partial B}{\partial S} - [y_0]_j \cdot k_j \cdot (A \cdot B) + \{y_0\}_j \cdot \frac{\partial (A \cdot B)}{\partial S} = 0, \quad (6) \\ \frac{\partial [y_1]_j}{\partial t} + \{y_1\}_j \cdot k_j \cdot B + [y_1]_j \cdot \frac{\partial B}{\partial S} + \{y_0\}_j \cdot k_j \cdot (A \cdot B) + [y_0]_j \cdot \frac{\partial (A \cdot B)}{\partial S} = 0, \end{aligned}$$

с характеристическими уравнениями:

$$\begin{aligned} \left( \begin{matrix} \mathcal{G}_j & 0 \\ \frac{\partial (A \cdot B)}{\partial S} & \frac{\partial B}{\partial S} + \mathcal{G}_0 \end{matrix} \right) = 0, \quad \left( \begin{matrix} \mathcal{G}_j & 0 & 0 & (-k_j) \\ 0 & \mathcal{G}_j & (k_j) & 0 \\ \frac{\partial (A \cdot B)}{\partial S} & (-k_j \cdot (A \cdot B)) & \left( \mathcal{G}_j + \frac{\partial B}{\partial S} \right) & (-k_j \cdot B) \\ (k_j \cdot (A \cdot B)) & \left( \frac{\partial (A \cdot B)}{\partial S} \right) & (k_j \cdot B) & \left( \mathcal{G}_j + \frac{\partial B}{\partial S} \right) \end{matrix} \right) = 0, \quad (7) \end{aligned}$$

определяющими связь между собственным числом  $\mathcal{G}_j$  и волновым числом  $k_j$ :

$$\mathcal{G}_0 \cdot \left( \frac{\partial B}{\partial S} + \mathcal{G}_0 \right) = 0, \quad \mathcal{G}_j^2 + \mathcal{G}_j \cdot \left( \frac{\partial B}{\partial S} \pm i \cdot B \cdot k_j \right) + \left( k_j^2 \cdot (A \cdot B) \mp i \cdot k_j \cdot \frac{\partial (A \cdot B)}{\partial S} \right) = 0, \quad i = \sqrt{-1}. \quad (8)$$

Система уравнений (3.110) имеет корни:

$$\mathcal{G}_{01} = 0, \quad \mathcal{G}_{1,2j} = -\frac{\left( \frac{\partial B}{\partial S} \pm i B k_j \right)}{2} + \sqrt{\frac{\left( \frac{\partial B}{\partial S} \pm i B k_j \right)^2}{4} - \left( k_j^2 (A \cdot B) \mp i k_j \frac{\partial (A \cdot B)}{\partial S} \right)},$$



$$\mathcal{G}_{02} = -\frac{\partial B}{\partial S}, \quad \mathcal{G}_{3,4,j} = -\frac{\left(\frac{\partial B}{\partial S} \pm iBk_j\right)}{2} - \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial B}{\partial S} \pm iBk_j\right)^2}{4} - \left(k_j^2(A \cdot B) \mp ik_j \frac{\partial(A \cdot B)}{\partial S}\right)} \quad (9)$$

Если корни  $\mathcal{G}_{01}, \mathcal{G}_{02}, \mathcal{G}_{1,2,j}, \mathcal{G}_{3,4,j}$  системы уравнений (9) имеют отрицательную действительную часть, то параметры производственного процесса устойчивы. Система балансовых уравнений (5)–(6) имеет характеристическое уравнение с одним нулевым корнем  $\mathcal{G}_0 \equiv 0$ . Такие системы относятся к критическим случаям исследования устойчивости. Система уравнений (8) в критическом случае относительно малых возмущений  $[y]_0, [y]_1$  имеет решение:

$$\{y_0\}_0 = c_{\{y_0\}_0} = const, \quad \{y_1\}_0 = \exp\left(-\frac{\partial B}{\partial S} \cdot t\right) + \{\tilde{y}_1\}_0.$$

Тривиальное решение  $\{y_0\}_0 = 0$  соответствует нулевому значению постоянной  $c_{\{y_0\}_0} = 0$ . В особом случае одного нулевого корня исследуемое невозмущенное состояние параметров производственного процесса принадлежит к семейству установившихся состояний, которое определяется системой уравнений (9). В особом случае невозмущенное состояние устойчиво, но устойчивость при этом неасимптотическая. Возмущенное состояние, близкое к невозмущенному, при  $t \rightarrow \infty$  стремится к одному из установившихся состояний. Для всякого решения уравнений возмущенного состояния, для которого начальные значения:  $\{y_0\}_0|_{t=0} = c_{\{y_0\}_0}, \{y_1\}_0|_{t=0} = \{\tilde{y}_1\}_0$  достаточно малы, справедливо:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \{y_0\}_0 = c_{\{y_0\}_0}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \{y_1\}_0 = 0.$$

Исследуем условия устойчивости параметров производственного процесса в режиме синхронизации производительности оборудования вдоль технологического маршрута. Данный случай широко распространен в практических и теоретических исследованиях [8, 9, 12]. Принимая во внимание условие синхронизации производительности технологического оборудования, запишем:

$$\frac{\partial B}{\partial S} = \frac{\partial}{\partial S} \left. \frac{[x]_{1\psi}}{[x]_0} \right|_0 \equiv -\frac{[x]_{1\psi}}{[x]_0^2} \cdot \frac{\partial [x]_0}{\partial S} \Big|_0 \equiv -\left( \frac{B}{[x]_0} \cdot \frac{\partial [x]_0}{\partial S} \right) \Big|_0 \frac{\partial [x]_{1\psi}}{\partial S} \Big|_0 = 0.$$

Если отклонения  $[x]_1$  относительно  $[x]_{1\psi}$  является небольшим,  $([x]_{1\psi} - [x]_1) \rightarrow 0$ , то

$$A \cdot B = \frac{[x]_{1\psi} - [x]_1}{[x]_0} \Big|_0 \cdot \frac{[x]_{1\psi}}{[x]_0} \Big|_0 \approx 0, \quad \frac{\partial(A \cdot B)}{\partial S} = B \frac{\partial A}{\partial S} \approx B \cdot \frac{1}{[x]_0} \frac{\partial(-[x]_1)}{\partial S} \Big|_0 \approx 0$$

и, соответственно, характеристические уравнения принимают вид:

$$\begin{pmatrix} \mathcal{G}_0 & 0 & 0 & (-k_j) \\ 0 & \mathcal{G}_j & (k_j) & 0 \\ 0 & 0 & \left( \mathcal{G}_j - \left( \frac{B}{[x]_0} \cdot \frac{\partial [x]_0}{\partial S} \right) \Big|_0 \right) & (-k_j \cdot B) \\ 0 & 0 & (k_j \cdot B) & \left( \mathcal{G}_j - \left( \frac{B}{[x]_0} \cdot \frac{\partial [x]_0}{\partial S} \right) \Big|_0 \right) \end{pmatrix} = 0,$$

определяющие связь между собственным числом  $\mathcal{G}_j$  и волновым числом  $k_j$ :

$$\mathcal{G}_0 \cdot \left( -\left( \frac{B}{[x]_0} \cdot \frac{\partial [x]_0}{\partial S} \right) \Big|_0 + \mathcal{G}_0 \right) = 0 \quad \mathcal{G}_j \cdot \left( \mathcal{G}_j - \left( \frac{B}{[x]_0} \cdot \frac{\partial [x]_0}{\partial S} \right) \Big|_0 \pm i \cdot B \cdot k_j \right) = 0.$$

и позволяющие получить условие устойчивости параметров поточной линии [25, 26] для неустановившегося переходного режима

$$\frac{\partial B}{\partial S} \Big|_0 > 0, \quad \frac{\partial [x]_0}{\partial S} \Big|_0 < 0.$$

Условие устойчивости в виде неравенства  $\frac{\partial[\chi]_0}{\partial S}\Big|_0 < 0$  для установившегося квазистатического установившегося режима получено в [11] и проверено экспериментально при исследовании поточных линий по производству полупроводниковой продукции.

б) Условия устойчивости потоковых параметров технологических процессов в нулевом приближении  $(1/Pm) \ll 1, Kv \approx 1$ . Замкнутая 2-х моментная система [25] в нулевом приближении по малому параметру  $(1/Pm) \ll 1, Kv \approx 1$  принимает вид

$$\frac{\partial[\chi]_0}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial[\chi]_1}{\partial t} - [\chi]_{1\psi}(S) \cdot \frac{\partial}{\partial S} \left( \frac{[\chi]_{1\psi}(S)}{[\chi]_0(S)} \right) = 0.$$

Будем полагать, что данной системе соответствует невозмущенное решение  $[\chi]_k^* = [\chi]_k^*(t, S)$ . Пусть параметры  $[\chi]_k$  поточной линии получают случайные малые возмущения (1). Линеаризуем систему в окрестности  $[\chi]_k^*$ :

$$\frac{\partial[y]_0}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial[y]_1}{\partial t} + \frac{\partial[y]_0}{\partial S} \cdot B^2 + [y]_0 \cdot \frac{\partial B^2}{\partial S} = 0, \quad B = \frac{[\chi]_{1\psi}}{[\chi]_0}\Big|_0.$$

Будем предполагать, что для коэффициентов  $B$  на протяжении периода  $T_v$  существования возмущения справедливо неравенство (4) и коэффициенты при малых возмущениях  $[y]_k$  зависят только от  $S$ . Разложим возмущения  $[y]_k$  параметров  $[\chi]_k$  в ряд Фурье, получим систему уравнений для коэффициентов разложения:

$$\begin{aligned} \frac{d\{y_0\}_0}{dt} &= 0, & \frac{d\{y_1\}_0}{dt} + \{y_0\}_0 \cdot \frac{\partial B^2}{\partial S} &= 0, \\ \frac{d\{y_0\}_j}{dt} - [y_1]_j \cdot k_j &= 0, & \frac{d[y_0]_j}{dt} + \{y_1\}_j \cdot k_j &= 0, \\ \frac{d\{y_1\}_j}{dt} - [y_0]_j \cdot k_j \cdot B^2 + \{y_0\}_j \cdot \frac{\partial B^2}{\partial S} &= 0, & \frac{d[y_1]_j}{dt} + \{y_0\}_j \cdot k_j \cdot B^2 + [y_0]_j \cdot \frac{\partial B^2}{\partial S} &= 0. \end{aligned}$$

с характеристическими уравнениями

$$\begin{vmatrix} \mathcal{G}_0 & 0 \\ \frac{\partial B^2}{\partial S} & \mathcal{G}_0 \end{vmatrix} = 0, \quad \begin{vmatrix} (\mathcal{G}_j) & 0 & 0 & (-k_j) \\ 0 & (\mathcal{G}_j) & (k_j) & 0 \\ \left(\frac{\partial B^2}{\partial S}\right) & (-k_j \cdot B^2) & (\mathcal{G}_j) & 0 \\ (k_j \cdot B^2) & \left(\frac{\partial B^2}{\partial S}\right) & 0 & (\mathcal{G}_j) \end{vmatrix} = 0,$$

определяющими связь между собственным числом  $\mathcal{G}_j$  и волновым числом  $k_j$ :

$$\mathcal{G}_0^2 = 0, \quad \mathcal{G}_j^2 + \left( k_j^2 \cdot B^2 \mp i \cdot k_j \cdot \frac{\partial B^2}{\partial S} \right) = 0, \quad i = \sqrt{-1}.$$

Система уравнений содержит двойной нулевой корень  $\mathcal{G}_0 \equiv 0$  и относится к критическим случаям исследования устойчивости [10, 13]. Если плотность предметов труда  $[\chi]_0$  медленно меняется вдоль технологического маршрута  $\left| \frac{[\chi]_0(t, S)}{\Delta S} \right|_0 \gg \left| \frac{\partial[\chi]_0(t, S)}{\partial S} \right|_0$ , тогда рассмотренная система уравнений принимает вид:

$$\frac{d\{y_0\}_0}{dt} = 0, \quad \frac{d\{y_0\}_j}{dt} - [y_1]_j \cdot k_j = 0, \quad \frac{d[y_0]_j}{dt} + \{y_1\}_j \cdot k_j = 0,$$

$$\frac{d\{y_1\}_0}{dt} = 0, \quad \frac{d\{y_1\}_j}{dt} - [y_0]_j \cdot k_j \cdot B^2 = 0, \quad \frac{\partial [y_1]_j}{\partial t} + \{y_0\}_j \cdot k_j \cdot B^2 = 0.$$

### Выводы

Рассмотрено влияние малых возмущающих факторов на состояние потоковых параметров производственных линий. Показано, что устойчивость потоковых параметров производственной линии является одним из главных требований для обеспечения нормативного режима ее функционирования. Записаны необходимые и достаточные условия устойчивости потоковых параметров производственных линий. Проведен анализ устойчивости потоковых параметров для распространенных режимов функционирования производственных линий и получены критерии устойчивости. Дальнейшие исследования устойчивости параметров производственного процесса необходимо проводить с учетом слагаемых более высокого порядка малости [10, 13].

### Список использованной литературы

1. Власов В.А. Моделирование технологических процессов изготовления промышленной продукции / В.А. Власов, И.А. Тихомиров, И.И. Локтев. – Томск: Изд. ГТТУ, 2006. – 300 с.
2. Азаренков Н.А. Кинетическая теория колебаний параметров поточной линии / Н.А. Азаренков, О.М. Пигнастый, В.Д. Ходусов // Доповіді Національної академії наук України. – 2014. – № 12. – С. 36-43. – doi.org/10.15407/dopovidi2014.12.036
3. Разумов И.М. Организация и планирование машиностроительного производства / И.М. Разумов, Л.Я. Шухгалтер. – М.: Машиностроение, 1974. – 592 с.
4. Пигнастый О.М. К вопросу обеспечения асимптотической устойчивости макропараметров технологического процесса / О.М. Пигнастый // Математическое моделирование. – Днепропетровск: ДГТУ, 2010. – №2 (23). – С. 25-31.
5. Тихонов А.Н. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении / А.Н. Тихонов, В.Д. Кальнер, В.Б. Гласко. – М.: Машиностроение, 1990. – 264 с.
6. Управление гибкими производственными системами. Модели и алгоритмы / Е.Д. Воронина [и др.] ; общ. ред. С.В. Емельянов. – М.: Машиностроение, 1987. – 368 с.
7. Якимович С.Б. Постановка и решение задачи синтеза и оптимального управления технологическими процессами лесозаготовок / С.Б. Якимович. – М: МГУЛ, 2003. – №3. – С. 96-103.
8. Kempf K.G. Simulating Semiconductor Manufacturing Systems: Successes, Failures and Deep Questions / K.G. Kempf // In Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference (Institute of Electrical and Electronics Engineers). – Piscataway, New Jersey, 1996. – P. 3-11.
9. Armbruster D. Continuous models for production flows / D. Armbruster, C. Ringhofer, T. J. Jo // In Proceedings of the 2004 American Control Conference. – Boston, MA, USA, 2004. – P. 4589-4594.
10. Малкин И.Г. Теория устойчивости движения / И.Г. Малкин. – М.: Наука, 1966. – 531 с.
11. Armbruster D. A Continuous Model for Supply Chains with finite Buffers / D. Armbruster, S. Goettlich, M. Herty – 2010. – P. 1-23.
12. Lefeber E. Modeling, Validation and Control of Manufacturing Systems / E. Lefeber, R.A. Berg, J.E. Rooda // Proceeding of the 2004 American Control Conference. – Massachusetts, 2004. – P. 4583-4588.
13. Ляпунов А.М. Общая задача устойчивости движения / А.М. Ляпунов. – М.: Гостехиздат, 1950. – 395 с.
14. Armbruster D. A Scalar Conservation Law with Discontinuous Flux for Supply Chains with Finite Buffers / D. Armbruster, S. Goettlich, M. Herty // SIAM Journal on Applied Mathematics. – 2011. – Vol. 71. – I. 4. – P.1070-1087.
15. Демуцкий В.П. Вопросы устойчивости макроскопических параметров технологических процессов массового производства / В.П. Демуцкий, О.М. Пигнастый // Доп. Нац. академии наук України. – 2006. – № 3. – С. 63-67.
16. Демуцкий В.П. Об устойчивости функционирования процессов массового производства. Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении. / В.П. Демуцкий, О.М. Пигнастый, С.Ю. Мелешенко, Е.Н. Пищик –2005. – С. 206 – 215.
17. Пигнастый О.М. Анализ устойчивости макропараметров технологического процесса производственно-технической системы / О.М. Пигнастый, В.Я. Заруба, С.Н. Новак // Сборник научных трудов УАБС НБУ: Институт экономики НАН Украины, Академия экономических наук Украины. – К.: УАБС НБУ, 2009. – № 27. – С. 199-206.
18. Berg R. Partial Differential Equations in Modelling and Control of Manufacturing Systems / R. Berg. – Netherlands, Eindhoven Univ. Technol., 2004. – 157 p.
19. Мышкис А. Д. Лекции по высшей математике / А.Д. Мышкис. – М.: Наука, 1969. – 640 с.
20. А.М.Будылин. Вариационное исчисление / А.М.Будылин. – СПб.: СПбГУ, 2001. – 197 с.
21. Bramson M. Stability of Queueing Networks / M. Bramson // Probability Surveys. – 2008. – Vol. 5. – P. 169-345.

22. Половин Р.В. Основы магнитной гидродинамики / Р.В. Половин, В.П. Демуцкий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 208 с.
23. Красовский А.А. Статистическая теория переходных процессов / А.А. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 240 с.
24. Пигнастый О. М. Задача оптимального оперативного управления макропараметрами производственной системы с массовым выпуском продукции / О.М. Пигнастый // Доповіді Національної академії наук України. – Київ: Видавничий дім "Академперіодика", 2006. – №5 – С. 79-85. – <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29852.28802>
25. Демуцкий В.П. Теория предприятия: Устойчивость функционирования массового производства и продвижения продукции на рынок / В.П. Демуцкий, В.С. Пигнастая, О.М. Пигнастый. – Х.: ХНУ, 2003. – 272 с.
26. Пигнастый О.М. Статистическая теория производственных систем / О.М. Пигнастый. – Х.: Изд. ХНУ им. Каразина, 2007. – 388 с.

УДК 514.18

А.Н. ХОМЧЕНКО

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

О.І. ЛИТВИНЕНКО, І.О. АСТИОНЕНКО

Херсонський національний технічний університет

**КОНОЇДИ ЕРМИТА-КУНСА ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ**

У роботі розглядаються лінійчаті поверхні (коноїди), в яких використовуються криві Ерміта-Кунса в якості напрямних. Знайдено не поліноміальні аналоги поліномів Ерміта-Кунса третього порядку. Побудовано формули поверхонь для двох варіантів квадратних носіїв:  $(0 \leq x, y \leq 1; -1 \leq x, y \leq 1)$ . Когнітивно-графічний аналіз і тестування поверхонь доводить, що переважна більшість властивостей коноїда успадкована від класичної функції-«пагоди». Маючи багато спільних властивостей, ці поверхні відрізняються гауссовою кривиною. У «пагоди» кривина від'ємна, а у коноїда – нульова.

Ключові слова: коноїд Ерміта-Кунса, функція-«пагода», гармонічність функції, ймовірнісна інтерпретація полінома Ерміта-Кунса, барицентрична задача Мьобіуса, обчислювальні шаблони Ньютона-Котеса (Гаусса).

А.Н. ХОМЧЕНКО

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Е.И. ЛИТВИНЕНКО, И.А. АСТИОНЕНКО

Херсонский национальный технический университет

**КОНОИДЫ ЭРМИТА-КУНСА И ИХ СВОЙСТВА**

В работе рассмотрены линейчатые поверхности (коноиды), в которых используются кривые Эрмита-Кунса в качестве направляющих. Найденны не полиномиальные аналоги полиномов Эрмита-Кунса третьего порядка. Построены формулы поверхностей для двух вариантов квадратных носителей:  $(0 \leq x, y \leq 1; -1 \leq x, y \leq 1)$ . Когнитивно-графический анализ и тестирование поверхностей доказывает, что преимущественное большинство свойств коноида унаследовано от классической функции-«пагоды». Имея много общих свойств, эти поверхности отличаются гауссовой кривизной. У «пагоды» кривизна отрицательная, а у коноида – нулевая.

Ключевые слова: коноїд Эрмита-Кунса, функция-«пагода», гармоничность функции, вероятностная интерпретация полинома Эрмита-Кунса, барицентрическая задача Мёбиуса, вычислительные шаблоны Ньютона-Котеса (Гаусса).

A.N. KHOMCHENKO

Petro Mohyla Black Sea National University

O.I. LITVINENKO, I.O. ASTIONENKO

Kherson National Technical University

**HERMITE-COONS' CONOIDS AND THEIR PROPERTIES**

The ruled surfaces (conoids) in which the Hermite-Koons curves are used as guides are considered in this work. Non-polynomial analogues of Hermit-Koons third order polynomials are found. Surface formulas for 2 variants of square carriers are constructed:  $(0 \leq x, y \leq 1, -1 \leq x, y \leq 1)$ . Cognitive-graphical analysis and testing of surfaces proves that most of the conoid's properties are inherited from the classical "pagoda" function. Having many common properties, these surfaces differ by Gaussian curvature. The "pagoda" has a negative curvature, and the conoid has a zero curvature. This is the fact that became the reason of physical inadequacy of spectrums of node loads of standard higher order serendipic elements (Zienkiewicz paradox).

We construct Hermite-Koons' conoid out of third order curvature (guiding line) and piecewise linear function-“half-lid” (generatrix). Cognitive-graphical analysis and testing of received surfaces proved assumption that Hermite-Koons' conoid inherits almost all properties of the "pagoda" function. Conoid bears testing for harmony on Koebe and Privalov integral criteria. Laplace differential criterion is being executed “upon the average”. Such functions are called quasi-harmonious. They are suitable for recovery of stationary temperature field of disk with Dirichlet conditions on the boundary. All bodies created by Hermite-Koons' conoids are Simpson ones. It is interesting that body capacity does not depend on the way of calculation. The exact integration was compared to the rule of 3 cross-sections (by Simpson) as well as to Newton-Cotes and Gauss cubature. It is very convenient when exact value of volume is determined only by barycentric conoid application. In the hierarchy of finitary surfaces which appear on the basis of symmetrical pairs of functions Hermite-Koons' conoid takes interval

between classical (bilinear) "pagoda" and nonlinear "pagoda". Hermite-Koons' conoids essentially extend the model range of Simpson bodies.

Keywords: Hermite-Koons' conoid, "pagoda" function, harmoniousness of function, probability interpretation of the Hermite-Koons' polynomial, barycentric Möbius problem, Newton-Cotes (Gauss) computational templates.

**Постановка проблеми**

Лінійчаті поверхні (коноїди) відіграють виняткову роль у задачах відновлення функцій двох аргументів. Технологічні особливості формоутворення коноїдів давно приваблюють архітекторів і будівельників. Коноїди мають переважну більшість в базисах стандартних серендипових скінченних елементів. В цих коноїдах напрямна лінія – це графік полінома Лагранжа (коноїди Лагранжа). Цікаво побудувати коноїд на основі кривих Ерміта-Кунса в якості напрямних. Твірною, як завжди, буде пряма лінія. Такі поверхні мають нульову гауссову кривину. Саме цей факт став причиною фізичної неадекватності спектрів вузлових навантажень серендипових стандартних елементів вищих порядків (парадокс Зенкевича).

**Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Вважається, що поліноми Ерміта з'явилися у 1864 р., хоча раніше вони зустрічаються у Лапласа (1810 р.). Спочатку кубічні поліноми Ерміта застосовували в задачах згину пружних елементів [1]. У другій половині ХХ сторіччя Кунс [2] відкрив аеродинамічні властивості кривих Ерміта третього і п'ятого порядків.

**Мета дослідження**

Мета роботи – побудувати коноїди Ерміта-Кунса, які утворюють базис інтерполяції на квадратному елементі з вузлами у вершинах. Показати зв'язок з білінійною інтерполяцією (функція-"пагода"). Встановити, які властивості «пагоди» [3, 4] успадковують коноїди Ерміта-Кунса.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Коноїд Ерміта-Кунса будемо конструювати із кривої третього порядку (напрямна) і кусково-лінійної функції-"напівкришки" (твірна). Спочатку розглянемо канонічний квадрат ( $0 \leq x, y \leq 1$ ) – носій фінітної функції (рис. 1). На рис. 1 (b і c) показані графіки відповідних ліній, які шляхом прямого перемноження відновлюють поверхню коноїда.

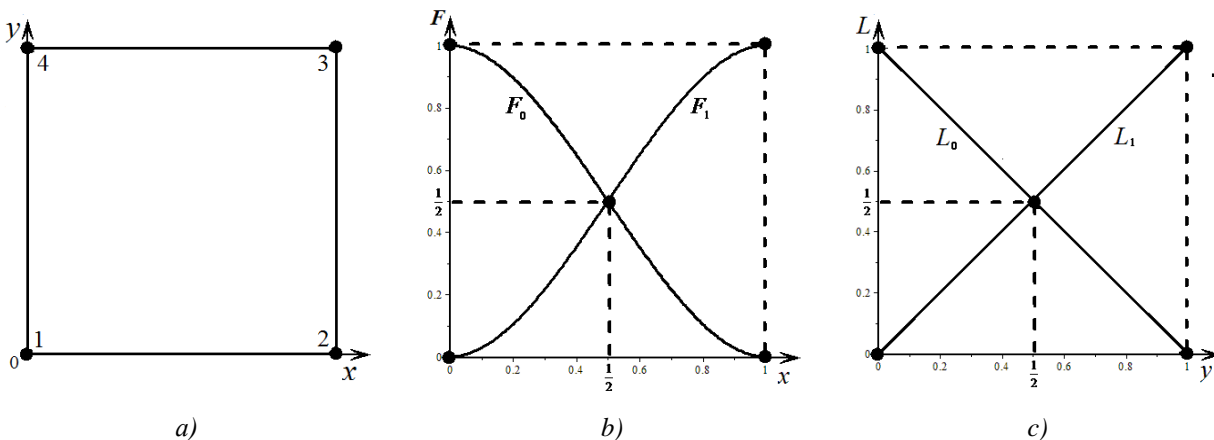


Рис. 1. Канонічний квадрат ( $0 \leq x, y \leq 1$ ) та симетричні пари ліній: напрямні b) і твірні c)

Кубічні поліноми Кунса мають вигляд [2]:

$$F_0(x) = 2x^3 - 3x^2 + 1, \quad F_1(x) = -2x^3 + 3x^2. \tag{1}$$

Лінійні функції-"напівкришки":

$$L_0(y) = 1 - y, \quad L_1(y) = y. \tag{2}$$

Тепер кожній вершині квадрата (рис. 1a) поставимо у відповідність поліном, який має властивості базисної функції і певною мірою узагальнює класичну "пагоду" [3, 4].

Таким чином, на одиничному квадраті рівняння коноїдів мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 N_1(x, y) &= (2x^3 - 3x^2 + 1)(1 - y), \\
 N_2(x, y) &= (-2x^3 + 3x^2)(1 - y), \\
 N_3(x, y) &= (-2x^3 + 3x^2) \cdot y, \\
 N_4(x, y) &= (2x^3 - 3x^2 + 1) \cdot y.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Візуалізація цих коноїдів представлена на рис. 2.

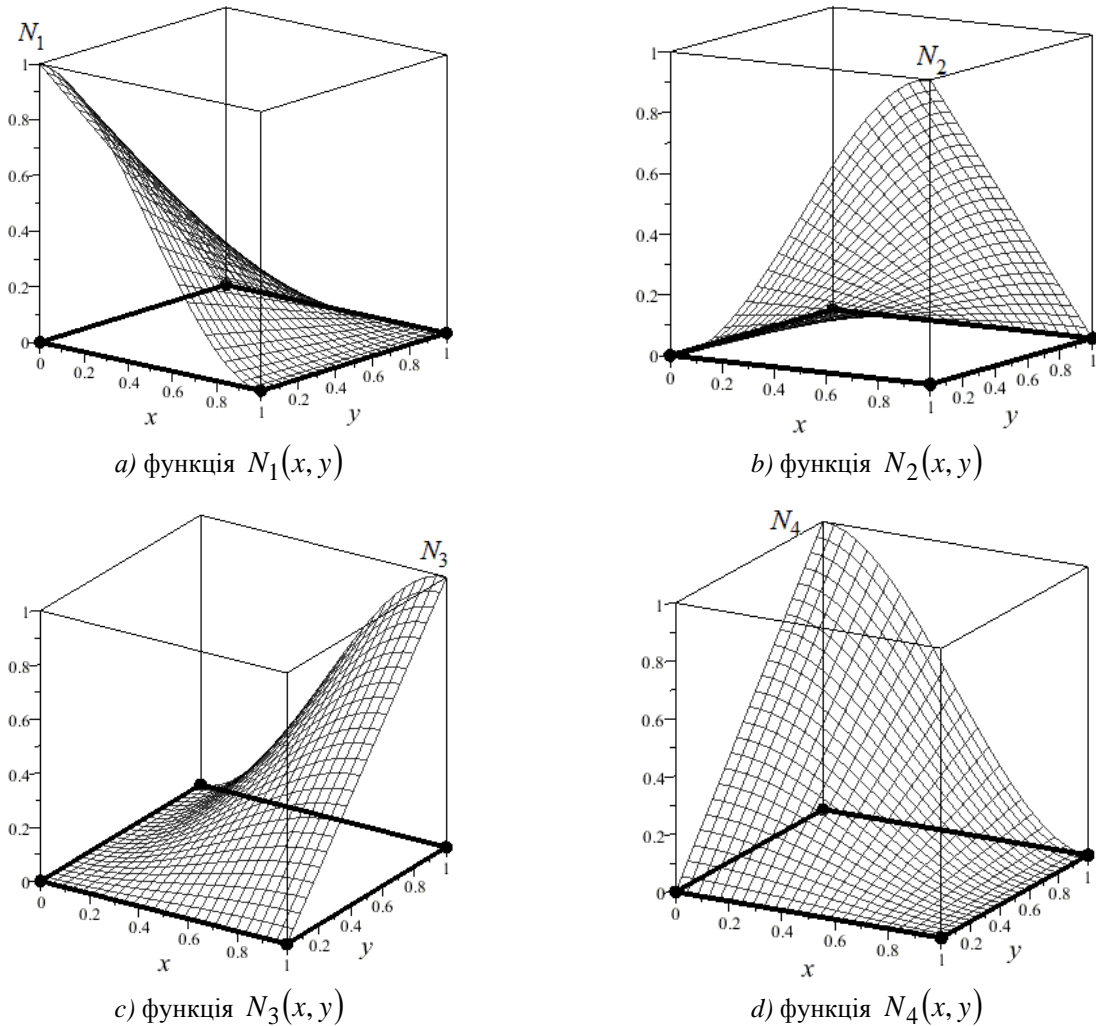


Рис. 2. Візуалізація коноїдів на канонічному квадраті ( $0 \leq x, y \leq 1$ )

У методі скінченних елементів у якості носія фінітних функцій часто використовують інший канонічний квадрат ( $-1 \leq x, y \leq 1$ ).

Якщо виконати розтягування графіків (рис. 1) і паралельне перенесення центра квадрата в (0; 0), отримаємо наступний набір коноїдів:

$$\begin{aligned}
 N_1(x, y) &= \frac{1}{8}(x^3 - 3x + 2)(1 - y), \\
 N_2(x, y) &= \frac{1}{8}(-x^3 + 3x + 2)(1 - y),
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$N_3(x, y) = \frac{1}{8}(-x^3 + 3x + 2)(1 + y),$$

$$N_4(x, y) = \frac{1}{8}(x^3 - 3x + 2)(1 + y).$$

У формулах (4) роль напрямних виконують поліноми Кунса:

$$F_0(x) = \frac{1}{4}x^3 - \frac{3}{4}x + \frac{1}{2}, \quad F_1(x) = -\frac{1}{4}x^3 + \frac{3}{4}x + \frac{1}{2}. \quad (5)$$

Візуалізація коноїдів на квадраті  $(-1 \leq x, y \leq 1)$  представлена на рис. 3.

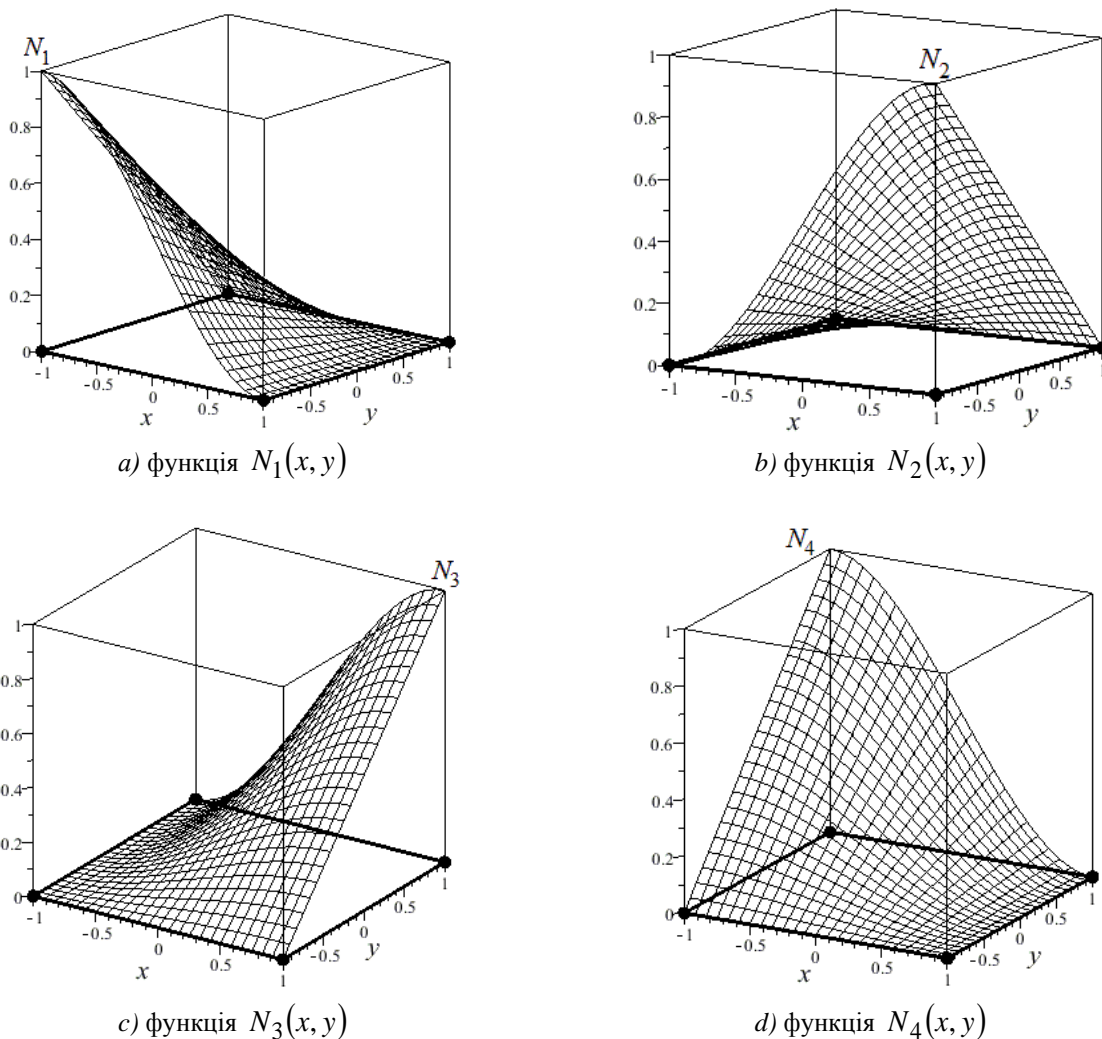


Рис. 3. Візуалізація коноїдів на канонічному квадраті  $(-1 \leq x, y \leq 1)$

Варто зауважити, що існують неpolіноміальні аналоги кубічних поліномів. Наприклад, замість пари (1) можна взяти наступну пару:

$$T_0(x) = \cos^2 \frac{\pi x}{2}, \quad T_1(x) = \sin^2 \frac{\pi x}{2},$$

а замість пари (5):



$$T_0(x) = \cos^2\left(\frac{\pi x}{4} + \frac{\pi}{4}\right), \quad T_1(x) = \sin^2\left(\frac{\pi x}{4} + \frac{\pi}{4}\right).$$

Маючи набір напрямних і твірних ліній, можна експериментувати з коноїдами на квадратних і прямокутних носіях (рис. 4).

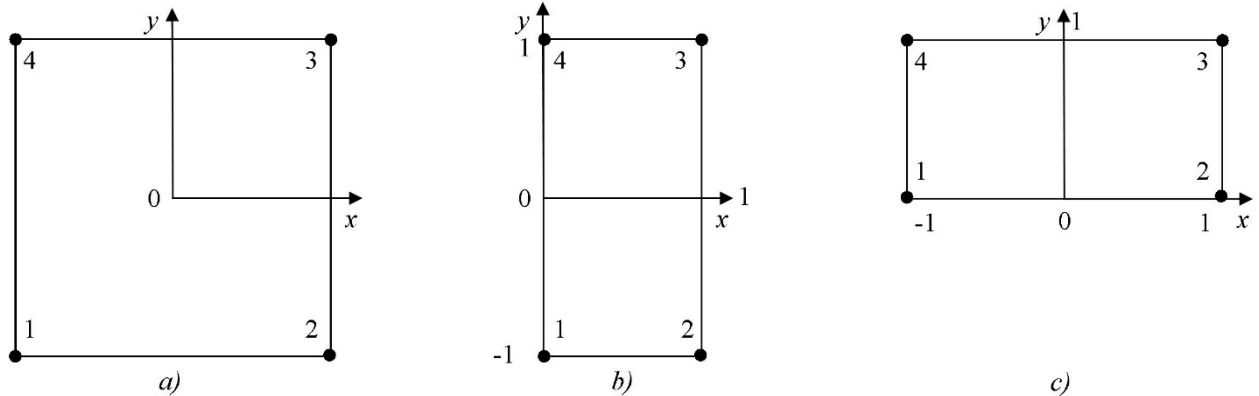


Рис. 4. Канонічний квадрат  $(-1 \leq x, y \leq 1)$  а); прямокутник  $(0 \leq x \leq 1, -1 \leq y \leq 1)$  б); прямокутник  $(-1 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1)$  в)

Когнітивно-графічний аналіз (рис. 2, 3) і тестування поверхонь (3) і (4) підтвердили припущення, що коноїд Ерміта-Кунса успадковує майже усі властивості функції-«пагоди» [3, 4].

**Властивість 1.** Коноїд витримує тестування на гармонічність за інтегральними критеріями Кьобе (1906) і Привалова (1925). Диференціальний критерій Лапласа (1782) виконується «в середньому». Такі функції називають квазігармонічними. Вони цілком придатні для відновлення стаціонарного температурного поля пластини з умовами Діріхле на границі.

**Властивість 2.** Коноїд має чіткий ймовірнісний зміст:

$$0 \leq N_i(x, y) \leq 1, \quad i = \overline{1,4}; \quad \sum_{i=1}^4 N_i(x, y) = 1,$$

де функція  $N_i(x, y)$  – перехідна ймовірність «блукаючої» частинки із випадкового старту  $M(x, y)$  у вузол  $i$ . Таким чином, ми маємо несіткову однокрокову 4-маршрутну схему метода Монте-Карло. Невипадково, що відновлення функції двох аргументів  $f(x, y)$  відбувається за правилом обчислення математичного сподівання:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^4 N_i(x, y) \cdot f_i,$$

де  $f_i$  – відомі аплікати функції у кутах носія.

**Властивість 3.** За допомогою будь-якого із наведених базисів можна розв’язувати барицентричну задачу Мьобіуса про повузловий розподіл одиничної маси пластини із зсунутим барицентром.

**Властивість 4.** Усі тіла, утворені коноїдами Ермета-Кунса є сімпсоновими [6]. Цікаво, що об’єм тіла не залежить від способу обчислення. Точне інтегрування порівнювалося із правилом трьох перерізів (Сімпсона), а також з кубатурами Ньютона-Котеса і Гаусса. На рис. 5 схематично зображено обчислювальні шаблони кубатур.

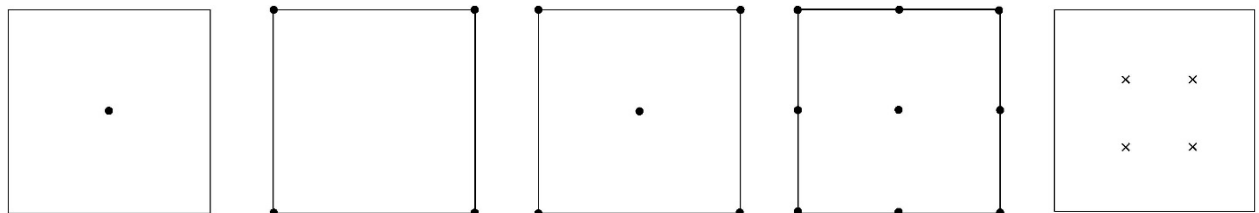


Рис. 5. Обчислювальні шаблони кубатур

Це дуже зручно, коли точне значення об'єму визначає лише барицентрична апліката коноїда.

#### Висновки

В ієрархії фінітних поверхонь, які утворюються на основі симетричних пар функцій, коноїд Ерміта-Кунса займає проміжок між класичною (білінійною) «пагодою» [3, 4] і нелінійною «пагодою» [5]. Коноїди Ерміта-Кунса суттєво подовжують модельний ряд сімпсонових тіл [6].

#### Список використаної літератури

1. Постнов В.А. Численные методы расчета судовых конструкций / В.А. Постнов. – Л. : Судостроение, 1977. – 279 с.
2. Математика и САПР : В 2-х кн. Кн. 2 / П. Жермен-Лакур, П.Л. Жорж, Ф. Пистр, П. Безье. – М. : Мир, 1989. – 264 с.
3. Хомченко А.Н. Функция «пагода»: известная и неизвестная / А.Н. Хомченко // Materials Intern. research and practice conf. «Cutting – edge science – 2015», April 30 – May 7, 2015. – Sheffield : Science and education Ltd. – С. 16–21.
4. Хомченко А.Н. П'ять способів побудови функції-«пагоди» / А.Н. Хомченко, І.О. Астіоненко, Н.О. Козуб // Прикл. геом. та інж. графіка. Праці. Тавр. держ. агротехнол. університету.– Вип. 4. Т. 37. – Мелітополь: ТДАТУ, 2008. – С. 24-31.
5. Хомченко А.Н. Некоторые обобщения функции-«пагоды»: компьютерный анализ когнитивно-графических свойств / А.Н. Хомченко, Е.В. Сиденко // Наукові праці: Науково-методичний журнал. – Вип. 254. Т. 266. Комп'ютерні технології. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. – С. 125–130.
6. Хомченко А. Н. Про серендипові поверхні, які утворюють сімпсонові тіла / А.Н. Хомченко, О. І. Литвиненко // Вісник ХНТУ. – Випуск 3(62), том 2. – Херсон: ХНТУ, 2017. – С. 224–227.

УДК 539.3

Н.О. ЯРЕЦЬКА, А.О. РАМСЬКИЙ  
Хмельницький національний університет**ЗАСТОСУВАННЯ MAPLE ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ КОНТАКТНОЇ ЗАДАЧІ ПРО  
ТИСК ЖОРСТКОГО КІЛЬЦЕВОГО ШТАМПА НА ПІВПРОСТІР З  
ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ**

У рамках лінеаризованої теорії пружності представлено розв'язок контактної задачі про тиск жорсткого кільцевого штампна на півпростір з початковими напруженнями із застосуванням програми Maple. Розроблено алгоритм та комп'ютерну програму чисельного обчислення компонентів напружено-деформованого стану контактуючих тіл з початковими напруженнями при довільній структурі пружного потенціалу. Числова реалізація методу дала змогу графічно відобразити вплив початкових напружень на закон розподілу контактних характеристик тіл, для потенціалів найпростішої структури.

Ключові слова: лінеаризована теорія пружності, початкові (залишкові) напруження, контактна задача, кільцевий штамп, півпростір, Maple.

Н.А. ЯРЕЦКАЯ, А.А. РАМСКИЙ  
Хмельницький национальный университет**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ MAPLE ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ О ДАВЛЕНИИ  
ЖЕСТКОГО КОЛЬЦЕВОГО ШТАМПА НА ПОЛУПРОСТРАНСТВО С НАЧАЛЬНЫМИ  
НАПРЯЖЕНИЯМИ**

В рамках линеаризованной теории упругости представлено решение контактной задачи о давлении жесткого кольцевого штампна на полупространство с начальными напряжениями с использованием программы Maple. Разработан алгоритм и компьютерная программа численного решения компонентов напряженно-деформированного состояния контактирующих тел с начальными напряжениями с произвольной структурой упругого потенциала. Численная реализация метода дала возможность графически отобразить влияние начальных напряжений на закон распределения контактных характеристик тел для потенциалов наипростейшей структуры.

Ключевые слова: линеаризованная теория упругости, начальные (остаточные) напряжения, контактная задача, кольцевой штамп, полупространство, Maple.

N.A. IARETSKA, A.A. RAMSKY  
Khmelnytsky National University**USE OF MAPLE FOR SOLVING THE CONTACT PROBLEM ABOUT PRESSURE OF STIFF  
ANNULAR PUNCH ON THE SEMI-SPACE WITH INITIAL STRESSES**

During the solution of engineering problems, the study of contact interaction of solid deformed bodies takes up an important place. Therefore, the solution of the axisymmetric contact problem of a rigid annular stamp pressure on elastic half-space with initial (residual) stresses without consideration of frictional forces in the case of equal roots of the defining equation is presented in this work. In general, the research was carried out for the theory of great initial (ultimate) and two variants of the theory of small initial deformations within the framework of linearized theory of elasticity with the elastic potential having arbitrary structure. Also the research is carried out within the coordinates of the initial deformed state, which are interrelated with the Lagrangian coordinates. Besides, it is also assumed that the influence of the half-space causes small disorders of the main elastic deformed state. An algorithm and a computer program in the Maple environment are developed for numerical calculation of the components of the stress-strain state of contacting bodies with initial stresses. The influence of initial (residual) stresses on the contact interaction of an elastic half-space and a rigid annular stamp is presented on the example of the harmonic potential and potential of Bartenev-Khazanovich. A developed algorithm for numerical computation of components of the stress-strain state of bodies allows it to be used in engineering calculations and facilitates the complexity of research. Therefore, the algorithm can be used directly for the study of various isotropic, transversally-isotropic or composite materials in the simulation of process equipment, machine parts, columns of buildings and other. Numerical realization of the method allowed to show graphically the influence of initial stresses on the law of distribution of contact characteristics of bodies, for the potentials of the simplest structure.

It was found that the influence of initial (residual) stresses is significant and should be taken into account when calculating the strength in structural details.

Key words: the linearized elasticity theory, initial (residual) stresses, contact problem, annular punch, half-space, Maple.

### Постановка проблеми

Прикладні потреби природознавства, сучасної техніки і новітніх технологій, пов'язані із необхідністю прогнозування контактної поведінки різноманітних конструкцій, стимулювали в останні десятиліття розвиток різних математичних моделей і методів контактної механіки тіл з різними властивостями. А використання інформаційних технологій під час дослідження та розв'язання сучасних задач і проблем механіки та техніки, що постають перед науковцями, дозволяє значно полегшити цей процес.

Так, у механіці суцільних середовищ велика увага приділяється дослідженню контактної взаємодії твердих деформованих тіл, що пов'язано із проблемою визначення їх напружено-деформованих станів. Оскільки контактні задачі формують теоретичну основу для розрахунків на контактну міцність, жорсткість та зносостійкість рухомих і нерухомих з'єднань, а їх дослідження зводяться до одних із найважливіших рівнянь математичної фізики, то їх розв'язання пов'язане із великими математичними труднощами, що вимагає залучення комп'ютерних технологій. Одним з важливих факторів при контактній взаємодії є вплив початкових (залишкових) напружень, які практично завжди присутні в реальних конструкціях і деталях машин, тому розробка ефективних методів розрахунку напружено-деформованого стану з врахуванням початкових деформацій є актуальною і важливою науково-технічною проблемою.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

На даний час з проблем, що мають відношення до контактних задач жорстких штампів, які взаємодіють із пружними тілами отримані результати з широкого кола питань. І вони достатньо відображені у численних публікаціях періодичних видань. Не дивлячись на суттєві досягнення, кількість досліджень з контактної взаємодії тіл з початковими напруженнями все ж таки відносно мала.

Детальний огляд задач контактної взаємодії тіл з початковими напруженнями представлений у роботах [1–3]. Причому у перших роботах з контактної взаємодії тіл з початковими напруженнями розглядаються або пружні потенціали конкретної структури, або задача ставиться в загальному вигляді для стисливих (нестисливих) тіл з потенціалом довільної структури на основі лінеаризованої теорії пружності [3]. Роботи з контактної взаємодії тіл з початковими напруженнями присвячені взаємодії попередньо напружених тіл із жорсткими та пружними штампами без початкових напружень [4]. Розв'язок контактної задачі про тиск жорсткого кільцевого штампа складної конфігурації на пружний півпростір, у якому є залишкові деформації, зумовлені наявністю потенціалу лише гармонічного типу розглянуто у [5]. Існує також ряд інших публікацій, що повністю або частково пов'язані із тематикою даної статті [6–9].

### Мета дослідження

Метою роботи є: 1) Розв'язання осесиметричної статичної задачі про тиск жорсткого циліндричного кільцевого штампа на пружний півпростір з початковими (залишковими) напруженнями без врахування сил тертя в межах лінеаризованої теорії пружності у випадку рівних коренів визначального рівняння [6] ( $n_1=n_2$ ) в загальному вигляді для теорії великих початкових деформацій та двох варіантів теорії малих початкових деформацій при довільній структурі пружного потенціалу;

2) Врахування залишкових напружень під час контактної взаємодії жорсткого кільцевого штампа та пружного півпростору на закон розподілу тиску в місцях їх дотику за допомогою інформаційних технологій, що дозволить більш ефективно враховувати зносостійкість матеріалів шляхом правильної оцінки запасів міцності та знижувати їх матеріалоемність, зберігаючи в цілому потрібні функціональні характеристики;

3) Розробка алгоритму та комп'ютерної програми, що принципово спрощуватиме процес отримання числових і графічних результатів досліджень.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Нехай скінченний жорсткий кільцевий штамп з плоскою основою, геометрична вісь симетрії якого співпадає з віссю  $u_3$  циліндричної системи координат, що напрямлена в середину півпростору (рис.1), втискається у півпростір з силою  $P$ , після виникнення там початкового деформованого стану.  $R_1, R_2$  – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси штампа. Будемо вважати, що зовнішнє навантаження прикладене тільки до вільного торця пружного штампа, під дією якого всі точки торця штампа переміщуються у напрямку осі симетрії  $u_3$  на одну і ту ж саму величину  $\varepsilon$ . Вважатимемо, що поверхні поза ділянкою контакту залишаються вільними від впливу зовнішніх сил, а в зоні контакту переміщення та напруження – неперервні. Розрізнятимемо три стани півпростору з початковими напруженнями: природний, коли у ньому відсутні напруження; початковий стан, та збурений стан, всі величини якого складаються з суми відповідних величин початкового стану та збурень. Вважаючи збурення набагато меншими відповідних величин початкового стану, дослідження проводимо в рамках лінеаризованої теорії пружності [1–4, 6–8]. Для дослідження введемо лагранжеві координати  $(x_1, x_2, x_3)$ , які в початковому стані співпадають з декартовими координатами  $(y_1, y_2, y_3)$ . Вважаємо, що початковий напружено-деформований стан у півпросторі є однорідним, а пружні потенціали – двічі неперервно-диференційовані функції алгебраїчних інваріантів тензора деформацій Гріна [2]. Матеріали тіл, що контактують будемо вважати ізотропними стисливими або нестисливими з довільною структурою пружного потенціалу. У випадку ортотропних матеріалів приймається, що пружно-еквівалентні напрямки співпадають з напрямками осей координат.

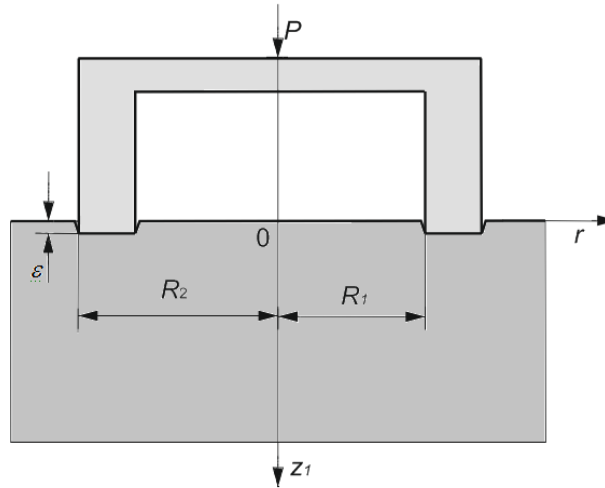


Рис. 1. Тиск жорсткого кільцевого штампа на пружний півпростір з початковими (залишковими) напруженнями

У системі кругових циліндричних координат  $(r, \theta, z_1)$ , де  $z_1 = v_1^{-1} y_3$ ,  $v_1 = n_1^{0.5}$ ,  $n_1 = n_2$  (корені визначального рівняння [6]) такій постановці відповідають граничні умови:

$$U_z = \varepsilon, \quad R_1 < r < R_2 \tag{1}$$

$$Q_{zz} = 0, \quad 0 < r < R_1, \quad R_2 < r < \infty \tag{2}$$

$$Q_{rz} = 0, \quad 0 < r < \infty \tag{3}$$

$$U_z = 0, \quad 0 < r < R_1, \quad R_2 < r < \infty \tag{4}$$

$$Q_{zz} = -\sigma_z^0, \quad R_1 < r < R_2 \tag{5}$$

де  $\sigma_z^0 = 8\varepsilon\omega_3(\pi\sqrt{1-r^2})^{-1}$ , при  $R_1 < r < R_2$  та  $\sigma_z^0 = 0$ , при  $0 < r < R_1$ ,  $R_2 < r < \infty$ ;  $\omega_3 = C_{44}(1+m_1)l_1(s-s_0)$ ,  $s_0 = (1+m_2)(1+m_1)^{-1}$ ,  $s = s_0 l_2 l_1^{-1}$ . Значення коефіцієнтів  $m_k, c_{44}, l_k, (k=1, 2)$  залежать від характеру пружного потенціалу і подані в [2].

Умова рівноваги, що встановлює зв'язок між осіданням торця і рівнодійною навантаження  $P$  має вигляд:

$$P = -2\pi \int_{R_1}^{R_2} r Q_{zz}(0, r) dr \tag{6}$$

Методика розв'язання поставленої задачі поділяється на два етапи: аналітичний, який у повній мірі висвітлений у працях [6, 8], та чисельний. Алгоритм чисельного розв'язання реалізований у вигляді програми [9] в пакеті Maple 15 і базується на наступних кроках:

1. Вводимо усі необхідні параметри, що стосуються характеристик конкретного пружного потенціалу та даних задачі:

```
>restart;
>with(DEtools):
>R2:=2:R1:=1: e:=0.00001: lambda:=[0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3]:
>pi:=Pi: sigma:=0.47: E:=3.92: mu0:=E/3: C[10]:=mu0/2:
>series(BesselJ(0,R2*x/R1)*Bessely(0,x)-BesselJ(0,x)*Bessely(0,R2*x/R1),
x,7): T[2]:=convert(%,polynom): gn:=[fsolve(T2,x,complex)]: g1:=gn[1]:
```

2. Визначаємо невідомі коефіцієнти:

```
>Ln:=BesselJ(0,g1*r/R1)* Bessely(0,g1)-BesselJ(0,r)* Bessely(0,g1*r/R1):
>Fn:=int(r*Ln*BesselJ(0,h*r),h=R1..R2):
>Gn:=g1*h^2/(g1^2-(h*R1)^2)*(R2/R1*(BesselJ(1,g1*R2/R1)*Bessely(0,g1)-
BesselJ(0,g1)*Bessely(1,g1*R2/R1))*BesselJ(0,h*R2)-
(BesselJ(1,g1)*Bessely(0,g1)-BesselJ(0,g1)*Bessely(1,g1))* BesselJ(0,h*R1):
>I1:=int(Gn*BesselJ(0,h*r),h=0..infinity):
>N1:=- (3.062510700*h^2*((0.2936256080+2.*10^(-
10)*I)*convert(series(BesselJ(0,2*h),h,2),polynom)+0.2078751178*convert(serie
s(BesselJ(0,h),h,2),polynom)))/(9.378971788-h^2):
```

```
>I2:=int(N1*convert(series(BesselJ(0,h*r),h,7),polynom),h=0..3):
```

3. Напружено-деформований стан у півпросторі з початковими (залишковими) напруженнями визначимо для рівних коренів, врахувавши (1)–(5) та  $z_1 = 0$ . Представимо його компоненти у вигляді [2, 6]:

$$Q_z = \omega_3 R_0^{-1} \int_0^\infty F(\eta) J_0(\eta r) d\eta, \quad U_z = -\omega_2^{-1} \int_0^\infty \frac{F(\eta)}{\eta} J_0(\eta r) d\eta, \quad U_r = \omega_1 \int_0^\infty \frac{F(\eta)}{\eta} J_1(\eta r) d\eta, \quad (7)$$

де  $R_0 = R_1/R_2$ ,  $\omega_2 = \nu_1 m_1^{-1} (s_0 - s_1)^{-1}$ ,  $s_1 = (m_1 - 1) m_1^{-1}$ ,  $\omega_1 = s_0 - 1$ ,  $J_\nu(x)$  – функція Бесселя дійсного аргументу,  $F(\eta)$  – шукана функція.

Задовольнивши умову (2) отримаємо:

$$\omega_3 R_0^{-1} \int_0^\infty F(\eta) J_0(\eta r) d\eta = 0, \quad 0 < r < R_1, \quad R_2 < r < \infty. \quad (8)$$

Введемо неперервну невідому функцію  $f(r)$ ,  $R_1 < r < R_2$ , що визначатиме розподіл контактних напружень під жорстким штампом. Та продовжимо (8) на проміжок  $0 < r < \infty$  [5, 6]:

$$\omega_3 R_0^{-1} \int_0^\infty F(\eta) J_0(\eta r) d\eta = f(r) (\delta(r - R_1) - \delta(r - R_2)), \quad 0 < r < \infty, \quad (9)$$

де  $\delta(r)$  – функція Хевісайда.

Враховуючи неперервність функції  $f(r)$ , а також  $f(r) = 0$  при  $r = R_1$  та  $r = R_2$ , представимо її у вигляді:

$$f(r) = \sum_{m=1}^\infty f_m J_0(\mu_m R_0^{-1} r) \quad (10)$$

де  $f_m$  – невідомі коефіцієнти,  $\mu_m$  – розв’язки рівняння  $J_1(\mu_k) = 0$ .

Застосувавши формулу обернення інтегрального перетворення Ханкеля до (10), одержимо

$$F(\eta) = R_0 \omega_3^{-1} \sum_{m=1}^\infty f_m \int_{R_1}^{R_2} r J_0(\mu_m R_0^{-1} r) J_0(\eta r) dr, \quad 0 < r < \infty. \quad (11)$$

З другої формули (7), (11) та (1) отримаємо

$$\sum_{m=1}^\infty f_m \int_0^\infty T_m(\eta) \eta^{-1} J_0(\eta r) d\eta = -\varepsilon \omega_3 \omega_2 R_0^{-1}, \quad (12)$$

де  $T_m(\eta) = R_1^{-1} (a_m^1 J_0(R_1 \eta) - a_m^2 J_1(R_1 \eta) \eta - a_m^3 J_0(R_2 \eta) + a_m^4 J_1(R_2 \eta) \eta) (\eta^2 - \mu_m^2 R_0^{-2})^{-1}$ ,

$a_m^1 = R_1 R_2 \mu_m J_1(R_2 \mu_m)$ ,  $a_m^2 = R_1^2 J_0(R_2 \mu_m)$ ,  $a_m^3 = R_2^2 \mu_m J_1(R_2 R_1^{-1} \mu_m)$ ,  $a_m^4 = R_1 R_2 \mu_m J_0(R_2 R_1^{-1} \mu_m)$ .

Проінтегруємо (12) по  $r J_0(\mu_m R_0^{-1} r)$  від  $R_1$  до  $R_2$ :

$$\sum_{m=1}^\infty f_m \int_0^\infty T_m(\eta) \eta^{-1} T_k(\eta) d\eta = -\varepsilon \omega_3 \omega_2 R_0^{-1} S_k, \quad (k = \overline{1, m}), \quad (13)$$

де  $S_k = -\mu_k^{-1} R_0 (R_1 J_1(\mu_k R_2) - R_2 J_1(\mu_k R_2 R_1^{-1}))$ .

Після визначення  $f_m$  із системи (13), можна обчислити напружено-деформований стан у пружному півпросторі за формулами (7), (9) – (11). А зв’язок (6) між осіданням торця та рівнодіючою навантаження  $P$ , матиме вигляд  $P = -4\omega_3 \omega_2 \varepsilon R_0$ .

Частина програми, що відображає даний крок, представлена нижче.

```
>Q33:=array(1..6):Ur:=array(1..6):
>for I to 6 do L:=lambda[i]; e:=0.00001: n2:=n1: v1:=sqrt(n1):
v2:=sqrt(n2): s0:=(1+m2)/(1+m1): s1:=(m1-1)/m1: s2:=m2/m1*v1/v2:
s3:=s0*v1/v2: s:=s0*l2/l1: k1:=-R1/R2*m1*(s2-s3)/(c44*(1+m1)*l1*(s-s3)*v1):
a1:=e/(k1*l2): fr:=a1*Ln: Fr:=convert(series(fr,r,5),polynom):
Fr0p1:=coeff(Fr,ln(r),0): Fr0p2:=coeff(Fr0p1,csgn(1.5312553501r),0):
Fr0p:=coeff(Fr0p2,I,0): r0:=evalf(R1/(2*R2)): Fr01:=evalf(subs(r=r0,Fr0p)):
Fr1:=subs(r=r-r0,-abs(Fr0p)): Fr2:=|Fr01|+Fr1:
```

```

Q33[i]:=Fr2: plot(Fr2,r=0..0.5,color=black,thickness=1);
series(BesselJ(0,R2*x/R1)*Bessely(0,x)-BesselJ(0,x)*Bessely(0,R2*x/R1),x,7):
T2:=convert(% ,polynom): gn:=[fsolve(T2,x,complex)]: g1:=gn[1]:
Gn:=g1*h^2/(g1^2-(h*R1)^2)*(R2/R1*(BesselJ(1,R2*g1/R1)*Bessely(0,g1)-
BesselJ(0,g1)*Bessely(1,R2*g1/R1))*BesselJ(0,h*R2)-
(BesselJ(1,g1)*Bessely(0,g1)-BesselJ(0,g1)*Bessely(1,g1))*BesselJ(0,h*R1)):
Fh:=R1/(R2*c44*11*(1+m1)*(s-s3))*a1*Gn*h:
Ur[t]:=(s3-1)*int(Fh/h*BesselJ(1,h*r),h=0..1):
plot(Ur[i], r=0..0.5, color=black,thickness=1):
U3:=(s3-s2)*m1/v1*int(Fh/h*BesselJ(0,h*r),h=0..infinity); od;
    
```

4. Будемо графіки в безрозмірних координатах для потенціалів конкретної структури, таких як: гармонічний потенціал (рис. 2) та потенціал Бартенєва-Хазановича (рис. 3, 4).

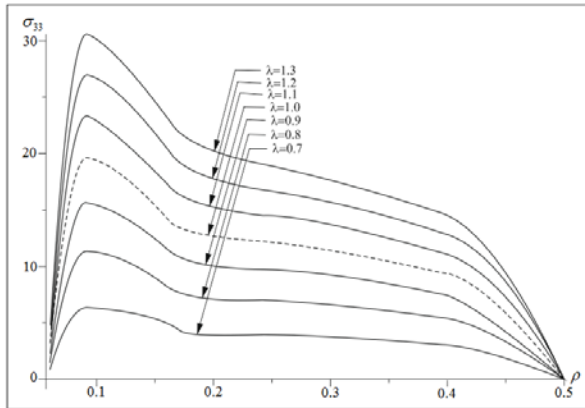


Рис.2. Контактні напруження. Гармонічний потенціал.

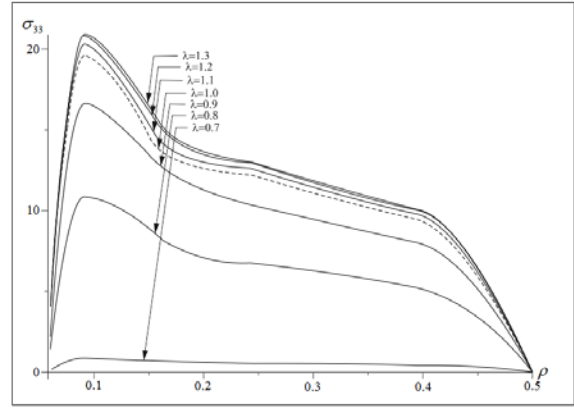


Рис.3. Контактні напруження. Потенціал Бартенєва-Хазановича

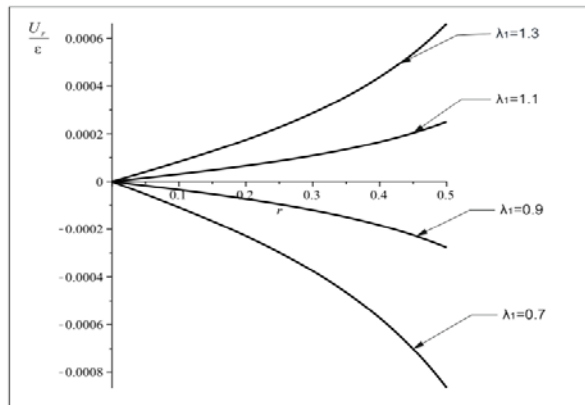


Рис.4. Контактні переміщення.

На рис. 2-4 пунктирні лінії описують випадок без початкових напружень ( $\lambda_1=1$ ), суцільні – з початковими (залишковими) напруженнями. Початок координат на рис. 2-4 відповідає точці з координатами  $(R_1;0;\epsilon)$  (рис.1).

5. Аналізуємо отримані результати. На основі чисельного аналізу можна побачити, що максимальні за модулем значення контактних напружень досягаються у точках дещо ближчих до внутрішньої межі контакту. А вплив початкових напружень полягає у тому, що стисливі початкові напруження ( $\lambda_1 < 1$ ) в півпросторі призводять до зменшення напружень, а розтягуючі ( $\lambda_1 > 1$ ) – до їх збільшення.

Кількісні характеристики впливу початкових напружень (у відсотках) по відношенню до півпростору без початкових напружень представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Вплив початкових напружень на контактну взаємодію пружного півпростору та жорсткого кільцевого штампа

$\sigma_{33} / \sigma_0$	Зменшення, %				Збільшення, %		
$\lambda_1$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
Гармонічний потенціал	67.57	42.18	20.09	0	18.95	37.42	55.91
Потенціал Бартенєва-Хазановича	75.59	44.61	15.24	0	3.48	6.12	6.51

Отже, виявлений вплив початкових напружень є суттєвим і повинен враховуватися при розрахунках на міцність у деталях конструкцій.

#### Висновки

Отже, з отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

1. У статті представлені результати дослідження впливу початкових напружень на контактну взаємодію жорсткого циліндричного кільцевого штампа та попередньо напруженого півпростору. За допомогою пакету прикладних програм (Maple 15) чисельний аналіз подано для потенціалу Бартенева-Хазановича та гармонічного потенціалу.

2. Розроблено алгоритм числового обчислення компонентів напружено-деформованого стану контактуючих тіл з початковими напруженнями при довільній структурі пружного потенціалу. Це дозволяє використовувати його при інженерних розрахунках та полегшує складність проведених досліджень. Запропонований алгоритм може безпосередньо використовуватись для дослідження різноманітних ізотропних, трансверсально-ізотропних або композитних матеріалів при проектуванні технологічного обладнання, деталей машин, колон будівель та іншого.

3. Розроблена комп'ютерна програма "Розрахунок компонентів напружено-деформованого стану для контактної задачі про тиск жорсткого кільцевого штампа на півпростір з початковими (залишковими) напруженнями" ("JKS\_PZPN\_RK"), що спрощує процес отримання числових і графічних результатів досліджень [9].

4. Числова реалізація дала змогу графічно відобразити вплив початкових напружень на закон розподілу контактних характеристик попередньо напружених тіл для потенціалів найпростішої структури.

Виявлено, що початкові напруження при стиску призводять до зменшення сили напружень у півпросторі, а при розтягненні – до їх збільшення. А для переміщень все відбувається навпаки, а саме: при стиску початкові напруження у півпросторі призводять до збільшення переміщень по абсолютній величині, а у випадку розтягу – до їх зменшення. Більш суттєво, у кількісному плані, початкові напруження діють у високо еластичних матеріалах у порівнянні із більш жорсткими, але якісно їхній вплив зберігається.

#### Список використаної літератури

1. Гузь А.Н. Смешанные задачи для упругого основания с начальными напряжениями / А.Н. Гузь, С.Ю. Бабич, Ю.П. Глухов. – Германия: Saarbrücken LAPLAMBERT Academic Publishing, 2015. – 468 с.
2. Гузь А.Н. Основы теории контактного взаимодействия упругих тел с начальными (остаточными) напряжениями / А.Н. Гузь, В.Б. Рудницкий. – Хмельницкий: вид. ПП Мельник, 2006. – 710 с.
3. Гузь А.Н. Контактное взаимодействие упругих тел с начальными (остаточными) напряжениями / А.Н. Гузь, С.Ю. Бабич, В.Б. Рудницкий // Развитие идей Л.А. Галина в механике. – М.–Ижевск. Институт компьютерных исследований, 2013. – 480 с.
4. Babich S.Yu. Contact problems for prestressed elastic bodies and rigid and elastic punches / S.Yu. Babich, A.N. Guz, V.B. Rudnitsky // Int. Appl. Mech. – 2004. – 40, №7. – P. 744-765.
5. Шелестовський Б. Контактна взаємодія кільцевого штампа із попередньо напруженим півпростором / Б. Шелестовський, І. Габрусєва // Вісник ТДТУ. – 2009. – Т. 14. – № 3. – С. 48-53.
6. Ярецька Н.О. Тиск жорсткого циліндричного кільцевого штампа на півпростір з початковими (залишковими) напруженнями / Н.О. Ярецька // Вісник Запорізького національного університету за фахом "Фізико-математичні науки". – 2017. – №1. – С. 374-380.
7. Діхтярук М.М. Контактна взаємодія нескінченного стрингера з однією та двома попередньо напруженими смугами / М.М. Діхтярук, Н.О. Ярецька // Актуальные научные исследования в современном мире: сб. научных трудов. – Переяслав-Хмельницкий, 2018. – Вып. 2(34), Ч. 1. – С. 75-83.
8. Yaretskaya N.A. Three-Dimensional Contact Problem for an Elastic Layer and a Cylindrical Punch with Prestresses / N.A. Yaretskaya // International Applied Mechanics. – 2014. – 50, №4. – P. 378-388.
9. А. с. JKS\_PZPN\_RK. Комп'ютерна програма "Розрахунок компонентів напружено-деформованого стану для контактної задачі про тиск жорсткого кільцевого штампа на півпростір з початковими (залишковими) напруженнями" / Н. О. Ярецька. – № 74505 ; заявл. 03.11.2017 ; опубл. 26.01.2018, Бюл. №47, 2018 р.



## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.272

Н.Г. АКСАК

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

**КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ  
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ**

*Разработан методологический подход для решения трудоемких и плохо формализуемых задач с экстренным реагированием на критическое изменение состояния исследуемого объекта в распределенной среде. В рамках построения методологии решены: задача предоставления сервиса; задача диагностики и мониторинга исследуемого объекта на основе обработки его изображений и получаемой информации от подключенных к объекту разнообразных измерительных приборов; задача согласования действий для адекватного принятия решений за счет использования организационной мультиагентной структуры; задача персонализации веб-ресурса, осуществляемая путем подстройки контента под предпочтения пользователей; задача оперативного реагирования на критическое изменение состояния исследуемого объекта с использованием высокопроизводительных вычислений. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность моделей и методов, на основе которых реализована совокупность заданий предложенной методологии.*

*Ключевые слова: диагностика, нейросетевая классификация, удаленный мониторинг, организационная мультиагентная система, персонализация веб-ресурса.*

Н.Г. АКСАК

Харківський національний університет радіоелектроніки

**КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ РОЗПОДІЛЕННІ  
НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ ОБРОБКИ ВЕЛИКИХ ДАНИХ**

*Розроблено методологічний підхід для вирішення трудомістких і погано формалізованих задач з екстремним реагуванням на критичну зміну стану досліджуваного об'єкта в розподіленому середовищі. В рамках побудови методології вирішені: задача надання сервісу; задача діагностики та моніторингу досліджуваного об'єкта на основі обробки його зображень та одержуваної інформації від підключених до об'єкту різноманітних вимірювальних приладів; задача узгодження дій для адекватного прийняття рішень за рахунок використання організаційної мультиагентної структури; задача персоналізації веб-ресурсу, що здійснюється шляхом підстроювання контенту під переваги користувачів; задача оперативного реагування на критичну зміну стану досліджуваного об'єкта з використанням високопродуктивних обчислень. Проведені експерименти підтвердили працездатність моделей і методів, на основі яких реалізована сукупність завдань запропонованої методології.*

*Ключові слова: діагностика, нейромережева класифікація, віддалений моніторинг, організаційна мультиагентна система, персоналізація веб-ресурсу.*

N.G. AXAK

Kharkiv National University of Radio Electronics

**CONCEPT OF CONSTRUCTION OF MULTIAGENT SYSTEMS OF DISTRIBUTED NEURAL  
NETWORK PROCESSING OF BIG DATA**

*Objective – development of a multi-agent, rapid response system based on distributed neural network processing of big data, which allows, by remote monitoring, to make emergency decisions related to a critical change in the state of the object under study.*

*Method. The methodological approach was developed to solve laborious and poorly formalized problems with an emergency response to a critical change in the state of the object under study in a distributed environment. The proposed approach allows creating a multi-agent rapid response system based on distributed neural network processing of big data, the work of which is based on the use of the following technologies: mobile communication technologies, data collection, transmission and presentation; technology of parallel and distributed computing; Big Data technologies; neural network technologies; agent-based technologies; cloud computing technologies.*

*The model of the process of prompt response to the change of the investigated object is proposed, which describes the interaction of the web interface, the procedural block, the agent block, the accumulation unit and the experience analysis. Such interaction is accomplished due to a combination of distributed neural network classification of data for solving the problems by providing services, personalizing the web resource, coordinating*

actions for adequate decision making. This allows improving the quality of service, responding urgently to a critical change in the state of the object under study, increasing the speed with which to solve complex tasks, and also keeping customers longer for users' preferences.

*Results.* For the proposed methodological approach, an experimental cluster, a software and a web resource are developed. They are used in realization computing experiments for verification of models, valuation of the adequacy and study the properties of models and methods.

*Application area.* The application of the methodological approach can be used to improve the coordination of users' actions and various systems for an adequate and prompt response to the ongoing changes in the status of the object under study in real time, as well as to provide quality service and business development.

*Conclusions.* The conducted experiments confirmed the working capacity of models and methods, on the basis of which the set of tasks of the proposed methodology was implemented.

*Keywords:* diagnostics, neural network classification, remote monitoring, organizational multi-agent system, personalization of web-resource.

### Постановка проблемы

Наступила эра совершенно нового взаимодействия людей и различных систем, от которых ожидается оперативная реакция на возникающие преобразования в настоящем времени, что напрямую связано:

**Во-первых**, с принятием продуманных решений. Для принятия решений существует огромное разнообразие всевозможных методов с различным уровнем сложности. Обеспечить хорошее решение для распределенного управления позволяет вычислительная парадигма с использованием мультиагентных систем (МАС). Для таких систем ключевым понятием является агент, постоянная деятельность которого интерпретируется как принятие решений, при этом он обладают автономностью, целенаправленностью и активностью. В разных сферах деятельности мотивация применения МАС различна, однако можно выделить основные преимущества применения мультиагентных систем:

- субъекты принимают во внимание особенности приложения и окружающей среды;
- имеется возможность моделирования и исследования взаимодействия между субъектами;
- отдельные компоненты системы моделируются на разных уровнях.

Следовательно, использование мультиагентных систем предоставляет возможность качественного распределенного управления. Стратегически спланированные действия агентов, учитывающие поведение других агентов и имеющие возможность общаться, сотрудничать и вести переговоры, позволяют принять согласованные решения, что требует разработки новых методов и моделей, а также соответствующих механизмов взаимодействия.

**Во-вторых**, с решением трудно формализуемых задач, для чего хорошо себя зарекомендовали искусственные нейронные сети. Применение нейронных сетей (НС) имеет практическое значение в любой предметной области и обладает следующим рядом преимуществ перед традиционными математическими методами:

- когда задача не может быть формализована традиционными математическими методами;
- когда задача формализуема, но на настоящее время отсутствует аппарат для ее решения;
- когда для хорошо формализуемой задачи существует соответствующий математический аппарат, но реализация вычислений с его помощью на базе имеющихся вычислительных систем не удовлетворяет требованиям получения решений по времени, размеру, весу, энергопотреблению и др.

Однако, с увеличением размерности входных сигналов структура нейронной сети становится более сложной, что в свою очередь ведет к более длительному времени обучения, к замедлению скорости сходимости. В то же время, нейронная сеть является высокопроизводительным вычислителем, поэтому алгоритмы, предназначенные для работы на такой сети, являются параллельными.

Следовательно, с помощью нейронных сетей можно ускорить решение трудоемких задач.

**В-третьих**, с накоплением и обработкой огромного количества информации, что в свою очередь затрагивает концепцию больших данных. С помощью феномена больших данных можно получить ряд полезных вещей, таких как извлечение полезных шаблонов, выявление мошенничества, управление факторами риска, снижение затрат на охрану здоровья и многое другое.

Следовательно, огромное количество данных с вариациями поможет разработать эффективную прогностическую модель, которая будет построена не на предположениях, а на основе имеющихся реальных данных. Одновременно с этим мы сталкиваемся с множеством проблем, таких как сбор, хранение, управление, анализ и безопасность данных. Обработку больших данных невозможно осуществлять традиционными методами из-за сложности и размера данных.

Таким образом, существует потребность в разработке принципов и технологий построения распределенных систем, которые в реальном времени поддерживают решение сервис-ориентированных задач, позволяющих обрабатывать колоссальные объемы разнородной информации, полученной из разнородных источников различными устройствами. Одной из основных задач таких систем является предоставление сервиса наибольшему числу пользователей.

**Анализ последних исследований и публикаций**

Агентно-ориентированные модели активно применяются в разных областях [1], начиная от моделирования роста опухоли и иммунных систем до моделей социальных сетей, компьютерной и мобильной самоорганизации и др. Планирование крупных систем, требующее значительных временных затрат рассмотрено в [2]. Для больших систем с огромным количеством работ рекомендуется распараллеливать некоторые вычисления и использовать теорию мультиагентных систем. В [3] показан многоагентный подход для управления распределенными вычислениями в кластерной грид-системе. Приведены архитектура и принципы работы МАС. Выделен ряд важных технологических особенностей данного подхода. Многоагентный подход для координации зарядки электромобилей с переменной скоростью предлагается в [4]. При таком подходе сочетаются преимущества децентрализованного подхода к принятию решений с помощью механизма управления сверху вниз, основанного на ценовых функциях.

Возрождение интереса к многоагентному подходу возникло отчасти благодаря успеху глубинных нейронных сетей. В [5] каждый агент рассматривает весь свой опыт как часть своей нестационарной среды. Приведен мета-алгоритм, основанный на наилучших ответах, созданных с использованием глубокого обучения, эмпирического анализа игр для вычисления мета-стратегий выбора политик. Однако МАС с интеллектуальными и автономными агентами не получили широкого распространения для мобильных устройств, позволяющих воспользоваться необходимой информацией удаленно.

Нейронные сети стали многодисциплинарным научным контекстом [6]. Практические приложения, использующие нейросетевое программное обеспечение, обеспечивают наилучший результат во многих прикладных областях. Многие современные методы диагностики основаны на использовании нейронных сетей. С целью обеспечения устойчивости промышленной и бытовой техники нейронная сеть применяется для автоматической диагностики неисправностей подшипников на основе вибрационных сигналов [7]. Метод диагностики неисправностей для фотогальванических систем на основе НС описан в [8].

Современным аналитическим методам, базирующимся на больших данных, посвящено достаточно много работ. Наибольшее цитирование определения больших данных включает пять характеристик: объем, разнообразие, скорость, достоверность и ценность. Информация в здравоохранении является ярким примером больших данных, так как удовлетворяет всем этим функциям [9,10]. Проблемы обработки больших данных, связанные с их многообразием, со сложностями сбора, хранения, управления и анализа, объемом памяти и скоростью вычислений рассмотрены в [11,12]. Описаны методики и алгоритмы, используемые для управления большими наборами данных.

**Цель исследования**

Целью работы является построение многоагентной системы оперативного реагирования на основе распределенной нейросетевой обработки больших данных, позволяющей путем дистанционного мониторинга экстренно принимать решения, связанные с критическим изменением состояния исследуемого объекта. Для достижения поставленной цели необходимо разработать методологический подход для решения трудоемких и плохо формализуемых задач экстренного реагирования в распределенной среде.

**Изложение основного материала исследования**

**Технология разработки многоагентной системы оперативного реагирования на основе распределенной нейросетевой обработки больших данных**

С целью обеспечения эффективного доступа к веб-порталу, предоставляющего сервисы наибольшему числу пользователей с использованием всевозможных датчиков и мобильных устройств, предлагается методологический подход, позволяющий создать многоагентную систему оперативного реагирования на основе распределенной нейросетевой обработки больших данных (МАСрНСоБД), работа которой строится на использовании ряда технологий (рис.1).

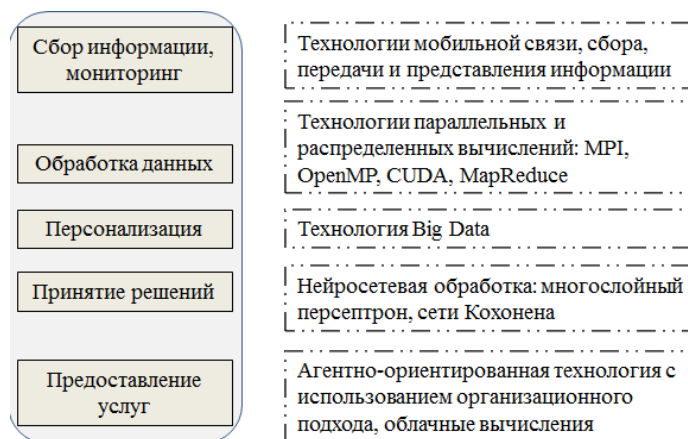


Рис.1. Используемые технологии реализации многоагентной системы оперативного реагирования на основе распределенной нейросетевой обработки больших данных

Пользователям и приложениям предоставляется полный набор услуг по доступу к сервисам системы (рис. 2).



Рис.2. Структура интерфейсов многоагентной системы распределенной нейросетевой обработки больших данных

Пусть имеются:

- регистрационная информация исследуемого объекта, а также данные датчиков и измерительных приборов  $\{R_1, R_2, \dots, R_T\}$ ;
- изображения с камер видеонаблюдения, у которого значения яркости элементов обозначаются  $h_{kj}$  ( $h_{kj} = 0; 255$ ;  $k = \overline{1, m}$ ;  $j = \overline{1, n}$ );
- доступная информация о  $U(i)$ -ом ( $i = \overline{1, M}$ ) пользователе сервис-ориентированного веб-портала Res (имя браузера, номер версии, язык, платформа, встроенные расширения, адрес предыдущей страницы, часовой пояс, время посещения страницы, информация о мониторе и т.п.)  $C(i) = [C^1(i), C^2(i), \dots, C^k(i)]$ .

Тогда разрешение проблемы оперативного реагирования на критическое изменение состояния исследуемого объекта на основе анализа изображений и показаний всевозможных датчиков состоит в разработке методологического подхода, включающего совокупность следующих заданий:

1. Решение задачи предоставления сервиса  $D_H$  заключается в разработке:
  - модели процесса нейросетевой диагностики и мониторинга  $\Xi$ , ее составных компонентов и их взаимодействия;
  - методов обработки изображений исследуемого объекта как в состоянии покоя, так и в состоянии движения.
2. Решение задачи распределения работ и ролей между агентами мультиагентной системы оперативного реагирования заключается в разработке:
  - мультиагентной организационной структуры компонентов обобщенной модели процесса нейросетевой диагностики и мониторинга и описать их взаимодействие;
  - методов планирования и координирования групповых действий агентов, проведения переговоров и выбора оптимального решения для достижения поставленной цели.
3. Решение задачи персонализации  $D_P$  веб-ресурса Res при ограниченном количестве образов веб-интерфейсов  $\Omega$  заключается в разработке:
  - модели персонализации  $V_R$ , ее составных компонентов и их взаимодействия;
  - объектной модели документов Интернет-ресурса в виде графа Res;
  - метода персонализации веб-портала, позволяющего для каждой  $R(n)$ -ой категории пользователей ( $n = \overline{1, L}$ ) адаптировать информационное наполнение страниц  $\bar{X}_k \in Res$  и  $Res \subset Res(k < \Delta)$ , где  $\Delta$  – количество вершин графа Res.
4. Решение задач ускоренной обработки больших данных заключается в разработке:
  - моделей параллельной нейрообработки данных;
  - методов ускоренного обучения и функционирования многослойной нейронной сети прямого распространения в компьютерных кластерах с различными топологиями передачи данных;

- методов равномерного распределения нейросетевой обработки данных в гетерогенной вычислительной среде;
- cloud-fog-dew архитектуры для персонализированных сервис-ориентированных систем.

В общем виде процесс оперативного реагирования на изменения состояния зарегистрированного пользователя веб-ресурса, предоставляющего сервисные услуги, описывается моделью (1), которая включает следующие компоненты [13]: Web-интерфейс, процедурный блок, агентский блок, а также блок накопления и анализа опыта (рис. 3). Модель процесса оперативного реагирования на изменение исследуемого объекта выражается как преобразование входных значений  $H$  в выходные величины  $Y$ :

$$\Xi \subset H \times Y, \tag{1}$$

где  $H(i) = \{H_D(i), H_P(i)\}$ , ( $i = \overline{1, M}$  – матричное представление входных данных,  $Y = \{Y_D, Y_P\}$ ,  $(Y \square Y)$  – множество формализованных свойств.

Таким образом, пространство (универсум)  $\Sigma = X \times Y$  включает  $\Xi \subset H \times Y$ , это означает, что существует такое подмножество  $H$ , ( $H \subset X$ ) и отношений между ними, на которых строится модель  $\Xi$ , ( $\Xi \subset \Sigma$ ). Для выходных величин  $Y_D$  построено множество заданий, решение которых принадлежит множеству  $D_H = \{D_{Hr}, D_{Hst}, D_{Hdn}\}$ , где  $D_{Hr} = \{\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_r\}$  – задача обработки регистрационной информации и показателей датчиков,  $D_{Hst} = \{M_1, M_2, \dots, M_{st}\}$  – задача обработки изображений объектов в состоянии покоя ( $M_1$  – выделение области интереса,  $M_2$  – бинаризация,  $M_3$  – скелетонизация, ...),  $D_{Hdn} = \{D_1, D_2, \dots, D_{dn}\}$  – задача обработки изображений объектов в состоянии движения (прямолинейного, вращательного, поступательного, равноускоренного и других видов). Для выходных величин  $Y_P$  построено множество заданий, решение которых принадлежит множеству  $D_P = \{D_{JSM}, D_{behavior}, D_{SOM}\}$ , где  $D_{JSM}$  – задача порождения гипотез о наличии или отсутствии определенных свойств пользователя  $U(i)$ ,  $D_{behavior}$  – задача анализа поведения пользователя;  $D_{SOM}$  – задача кластеризации пользователей с помощью сети Кохонена.

Отображение  $T: H_D \rightarrow Y_D$  позволяет для каждого  $H_D(i)$  найти такое  $Y_j \in Y_D$  ( $j = \overline{1, Q}$ ,  $Q$  – количество классов), которое является решением задачи  $D_H$ . Значения  $Y_j \in Y_D$  используются для диагностики с помощью нейросетевого классификатора и выработки дальнейшей тактики поведения.

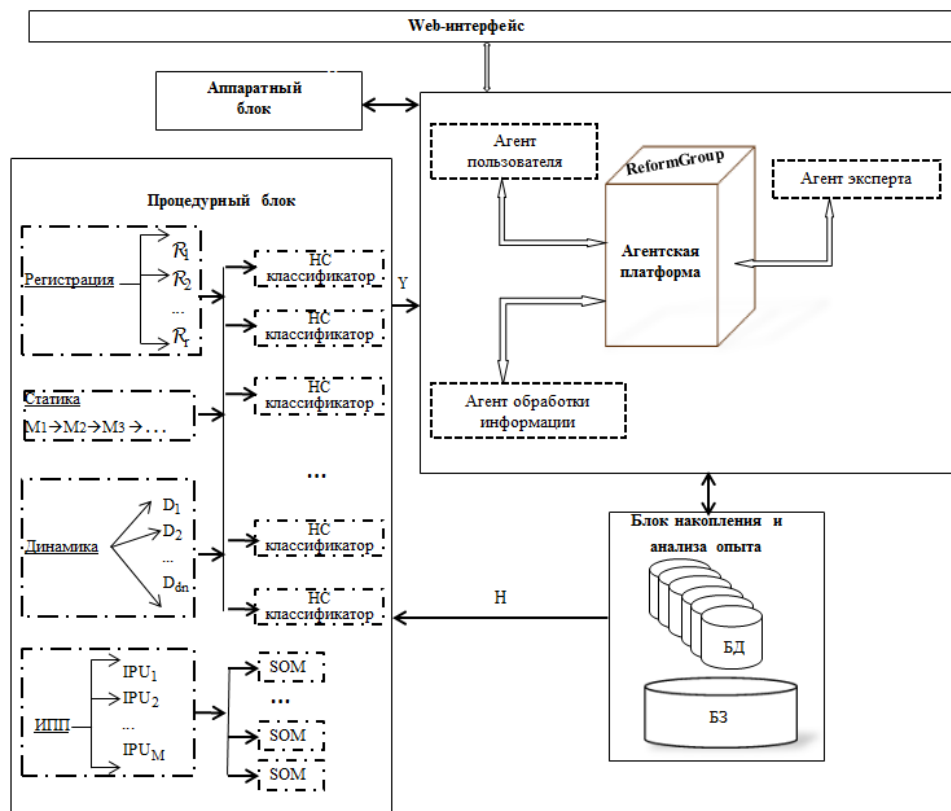


Рис. 3. Обобщенная модель многоагентной системы оперативного реагирования на основе распределенной нейросетевой обработки больших данных

Отображение  $\Pi : H_P \rightarrow Y_P$  позволяет для каждого  $H_P(i)$  получить такое  $y_j \in Y_P$  ( $j = \overline{1, \Omega}$ ,  $\Omega$  – количество интерфейсов), которое является решением задачи  $D_P$ , полученное в виде графовой модели (2) иерархического представления адаптированного Интернет-ресурса

$$\overline{Res} = \langle \overline{X}, \Gamma^{-n}, Y_P \rangle, \tag{2}$$

где  $\overline{X} = \{ \overline{X}_k \}$  – множество адаптированных страниц ( $k < \Delta$ ), сформированных в результате отображения  $\overline{X}_k = \Gamma^{-k}(x_m)$  множества интересного для пользователя информационного наполнения  $x_m \subset x$  ( $\Gamma^{-k}(x_m)$  обозначает обратное соответствие, показывающее для каких вершин графа  $Res$  вершина  $\overline{X}_k$  является конечной).

В общем виде принцип функционирования МАСрНСоБД для оперативного реагирования на изменения состояния исследуемого объекта выглядит следующим образом.

Пользователь, желающий получить сервисные услуги, после регистрации на сервис-ориентированном Web-ресурсе получает уникальный идентификатор и на его мобильное устройство устанавливается специальное приложение.

Датчики аппаратного блока (измерительные приборы, камеры видеонаблюдения, фотокамеры и т.п.) отправляют информацию через Bluetooth к мобильному устройству, которое пересылает полученные данные "Агенту пользователя"  $A_{user}$ , а он агрегирует и переводит показания устройств в форму, пригодную для дальнейшей обработки.

"Агент обработки информации"  $A_{data}$  определяет, какие задания  $D_{Hr}$ ,  $D_{Hst}$ ,  $D_{Hdn}$  или/и  $D_{SOM}$ ,  $D_{IPU}$  будут выполняться в процедурном блоке, передает/принимает информацию блоку накопления и анализа информации.

В процедурном блоке параллельно решаются задачи предоставления сервиса и персонализации веб-ресурса.

"Агент эксперта"  $A_{expert}$  собирает информацию от "Агента пользователя"  $A_{user}$ , "Агента обработки данных"  $A_{data}$  и дает рекомендации по использованию услуг.

В то же время "Агент пользователя"  $A_{user}$  собирает информацию о пользователе и посылает ее "Агенту обработки данных"  $A_{data}$ . По результатам решения задачи категоризации пользователей  $D_{SOM}$  "Агент пользователя"  $A_{user}$  для каждого кластера вырабатывает оптимальную стратегию, позволяющую учитывать предпочтения пользователей, и настраивает соответствующий контент.

Агентский блок [16] представлен следующими множествами  $MAS = \{A, E, Res\}$ . Множество адаптивных агентов  $A$  может быть представлено в виде  $A = \{A_{user}, A_{expert}, A_{data}\}$ , среда  $E$  представляет собой программную платформу для выполнения агентов и предоставляет функциональность для создания/уничтожения агентов, для приема/передачи сообщений;  $Res$  – объектная модель документов в виде графа (3):

$$Res = \langle X, Arc, Y_P \rangle, \tag{3}$$

где  $X = \{X_a\}$  – множество вершин графа, представляющее страницы сайта, каждая страница  $X_a = \{x\}$  представлена множеством информационных элементов: текстовые блоки, меню, ссылки, графические элементы и т.д. ( $x = \{1, \dots, |x|\}$ ),  $Arc$  – множество дуг графа, при этом дуга  $arc = (a, b)$  принадлежит графу только, если направление предполагается заданным от вершины  $a$  к вершине  $b$  ( $a, b = 1, \dots, \Delta$  – количество вершин графа  $Res$ ),  $Y_P = \{y_c\}$  – множество интерфейсов веб-ресурсов  $Res$ ,  $c = 1, \dots, \Omega$  – количество образов веб-интерфейсов.

Блок накопления и анализа информации включает базу данных (БД), хранящую множества  $C = [C^1, C^2, \dots, C^k]$ , множество Интернет-пользователей  $U$ , целевые свойства  $O$ , множество информационных портретов пользователей  $IPU$ , а также базу знаний (БЗ), содержащую общие закономерности о возможных причинах наличия (отсутствия) целевых свойств и информацию, являющуюся результатом накопленного опыта.

Для моделирования полученных теоретических результатов предложенного методологического подхода использована компьютерная сеть Fast Ethernet с физической топологией «звезда» со скоростью передачи 100 Мбит, которая состоит из 10 четырехядерных вычислителей Intel Core 2 Quad CPU Q8200 @2.33GHz с видеокартой GeForce GTX 460. Распараллеливание выполнено с помощью технологий CUDA, OpenMP и MS MPI на языке программирования C++ в операционной системе Microsoft Windows Compute Cluster Server 2003. Создан экспериментальный кластер Hadoop (версия 2.7.5), состоящий из 5 компьютеров (Intel Core 2 Quad CPU Q8200 @2.33GHz, ОС Microsoft Windows 10) с физической топологией "звезда", где 4 узла являются Datanodes, один – Namenode. Задачи управлялись менеджером YARN. Веб-интерфейс реализован с помощью языка гипертекстовой разметки HTML, каскадных таблиц стилей CSS и скриптового языка JavaScript. Программное обеспечение для мобильных агентов реализовано на платформе .NET Framework с использованием языка C#. Для хранения информации о пользователях выбрана база данных MS SQL Server. Подключение к базе данных осуществляется с помощью ORM (Object-Relational Mapping). Результаты проведенных экспериментов опубликованы в [13–17].

#### Выводы

В работе решена актуальная задача оперативного реагирования на критическое изменение состояния исследуемого объекта на основе анализа изображений и показаний всевозможных датчиков.

Предложен методологический подход как основа построения и применения способов согласования действий пользователей и разнообразных систем для адекватного и оперативного реагирования на происходящие изменения состояния исследуемого объекта в реальном времени путем сочетания различных технологий с учетом особенностей сервис-услуг (технологии мобильной связи, сбора, передачи и представления информации; технологии параллельных и распределенных вычислений; технологии Big Data; нейросетевые технологии; агентно-ориентированные технологии; технологии облачных вычислений). Методология базируется на системном подходе, который охватывает основные этапы жизненного цикла предоставления сервис-услуг.

Разработана обобщенная модель многоагентной системы оперативного реагирования на основе распределенной нейросетевой обработки больших данных, которая в отличие от существующих, описывает взаимодействие веб-интерфейса, процедурного блока, агентского блока, блока накопления и анализа опыта, благодаря сочетанию распределенной нейросетевой классификации данных для решения задач предоставления сервиса за счет динамического перераспределения работ между вычислителями кластера, персонализации веб-ресурса, осуществляемой путем подстройки контента под предпочтения пользователей, согласования действий для адекватного принятия решений за счет использования организационной мультиагентной структуры в зависимости от предоставляемого сервиса, что позволяет улучшить качество обслуживания, экстренно реагировать на критическое изменение состояние исследуемого объекта, повышает быстродействие при решении сложных задач, а также дольше удерживать клиентов за счет учета предпочтений пользователей.

#### Список использованной литературы

1. Niazi M. A. Verification & validation of agent based simulations using the VOMAS (virtual overlay multi-agent system) approach / M.A. Niazi, A. Hussain, M. Kolberg // Proceedings of the Third Workshop on Multi-Agent Systems and Simulation'09 (MASS '09) (Torino, Italy, September 7-11, 2009). – Torino, 2009. – P. 142-149.
2. Oleinikova S.A. et al. Mathematical and software of the distributed computing system work planning on the multiagent approach basis / S.A. Oleinikova et al. // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Т. 11. – №. 4. – P. 2872-2878.
3. Bogdanova V.G. et al. Multiagent approach to controlling distributed computing in a cluster Grid system / V.G. Bogdanova et al. //Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – Т. 53. – №. 5. – P. 713-722.
4. Valogianni K. A Multiagent Approach to Variable-Rate Electric Vehicle Charging Coordination / K. Valogianni, W. Ketter, J. Collins // Proceedings of the 2015 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (Istanbul, Turkey, May, 4-8, 2015). – New York: ACM, 2015. – P. 1131-1139.
5. Lanctot M. et al. A Unified Game-Theoretic Approach to Multiagent Reinforcement Learning / M. Lanctot et al. // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – P. 4190-4203.
6. Samarasinghe S. Neural Networks for Applied Sciences and engineering: from Fundamentals to Complex Pattern Recognition / S. Samarasinghe. – Boston: Auerbach publications, 2016. – 570 p.

7. Ali J.B. et al. Linear feature selection and classification using PNN and SFAM neural networks for a nearly online diagnosis of bearing naturally progressing degradations / J.B. Ali et al. // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2015. – Т. 42. – P. 67-81.
8. Chine W. et al. A novel fault diagnosis technique for photovoltaic systems based on artificial neural networks / W. Chine et al. // *Renewable Energy*. – 2016. – Т. 90. – P. 501-512.
9. Dembosky A. Data prescription for better healthcare / A. Dembosky // *FinancTimes*. – 2012. – № 12. – P. 19-22.
10. Burghard C. Big Data and Analytics Key to Accountable Care Success. IDC health insights. 2012.
11. Zerhari B. 'Big data clustering: Algorithms and challenge' / B. Zerhari, A. A. Lahcen, S. Mouline // *Proc. of Int. Conf. on Big Data, Cloud and Applications (BDCA'15) (Tetuan, Morocco, May 25-26, 2015)*. – 2015. – 6 p.
12. Kurasova O. Strategies for big data clustering / O. Kurasova et al. // *2014 IEEE 26th International Conference on Tools with Artificial Intelligence*. – IEEE, 2014. – С. 740-747. – DOI: 10.1109/ICTAI.2014.115.
13. Аксак Н.Г. Мультиагентная система нейро-сетевой диагностики и удаленного мониторинга пациента / Н.Г. Аксак // *Інформаційні технології: проблеми та перспективи: Монографія / под ред. В.С. Пономаренко*. – Харків: Вид. Рожко С. Г., 2017. – С. 325-340.
14. Axak N.G. Development of Multi-Agent System of Neural Network Diagnostics and Remote Monitoring of Patient / N.G. Axak // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 4. – № 9(82). – P. 4-11.
15. Аксак Н.Г. Параллельная нейрообработка больших данных в распределенной среде на основе MapReduce / Н.Г. Аксак // *Інформаційні технології: сучасний стан та перспективи: Монографія / за заг. ред. В.С. Пономаренка*. – Х. : ТОВ "ДІСА ПЛЮС", 2018. – С. 330–345.
16. Аксак Н.Г. Разработка системы персонализации специализированного веб-портала / Н.Г. Аксак // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2018. – № 1. – С. 91-99.
17. Axak N. Cloud-Fog-Dew Architecture for Personalized Service-Oriented Systems / N. Axak, D. Rosinskiy, O. Barkovska, I. Novoseltsev // *The 9th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT'2018, Kyiv, Ukraine, 2018*. – P.80-84.



УДК 004.93

Л.Г. АХМЕТШИНА, А.А. ЕГОРОВ  
Днепровский национальный университет имени Олеса Гончара**ПОВЫШЕНИЕ КОНТРАСТА ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ И АНАЛИЗА НЕЗАВИСИМЫХ КОМПОНЕНТ**

*Данная работа посвящена описанию метода повышения контраста цветных изображений на основе применения анализа независимых компонент к результатам нечеткой кластеризации в композиции с исходными данными. Предложенный метод позволяет обеспечить сохранение исходной цветопередачи снимков. Формирование конечного результата производится на основе автоматизации анализа и отбора наиболее значимых составляющих матрицы независимых компонент. Представлены алгоритм и результаты экспериментальных исследований на примере реального дерматоскопического медицинского изображения.*

*Ключевые слова: обработка цветных изображений, повышение контраста, нечетка кластеризация, анализ независимых компонент.*

Л.Г. АХМЕТШИНА, А.О. ЄГОРОВ  
Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара**ПОКРАЩЕННЯ КОНТРАСТУ КОЛЬОРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ТА АНАЛІЗУ НЕЗАЛЕЖНИХ КОМПОНЕНТІВ**

*Ця робота присвячена опису методу підвищення контрасту кольорових зображень на основі застосування аналізу незалежних компонентів стосовно результатів нечіткої кластеризації в композиції з вхідними даними. Запропонований метод дозволяє забезпечити збереження кольорового балансу у порівнянні з вхідними знімками. Формування кінцевого результату виконується на основі автоматизації аналізу та відбору найбільш вагомих стовпців матриці незалежних компонентів. Наведено алгоритм та результати експериментальних досліджень на прикладі обробки реального дерматоскопічного медичного зображення.*

*Ключові слова: обробка кольорових зображень, підвищення контрасту, нечітка кластеризація, аналіз незалежних компонентів.*

L.G. AKHMETSHINA, A.A. YEGOROV  
Dneprovsk National University named by Oles Honchar**COLOR IMAGES CONTRAST ENHANCEMENT BASED ON FUZZY CLUSTERING AND INDEPENDENT COMPONENTS ANALYZING**

*This article is devoted to description of color images contrast enhancement method based on segmentation, which are made by using fuzzy clustering with consequent visualizing its result by performing independent component analyzing of initial image and fuzzy membership function.*

*Proposed algorithm includes next steps: fuzzy clustering of initial color image, merging initial image with fuzzy membership function (obtained as fuzzy clustering results) and using this matrix for independent components analyzing (based on FastICA algorithm), automatic determining the most important columns of independent components matrix (based on coefficients, that are calculated by using mixing and separating matrices obtained as a results of FastICA algorithm) and forming matrix with the same dimensions as initial image based on most important columns of independent components matrix. Resulting color image is formed by merging initial image with matrix obtained on previous step. It allows saving color balance in compare to initial image.*

*The experimental researches of the proposed algorithm on the example of real dermatoscopical medical image processing are shown.*

*After analyzing of obtained experimental results next conclusions may be made: proposed algorithm provides color images contrast enhancement with saving color balance in compare to initial image; described algorithm can't be used for dark image processing; the type of nonlinearity for FastICA algorithm makes significant influence on the resulting image (the choice of this parameter depends on initial image and processing tasks) and it is the only control parameter for fuzzy clustering results visualizing. Unfortunately, for some nonlinearity types algorithm FastICA may not provide convergence, that leads to absence of final result.*

*Keywords: color image processing, contrast enhancement, fuzzy clustering, independent components analyzing.*

**Постановка проблемы**

Низкий контраст – наиболее распространенный дефект изображений, используемых в самых различных областях деятельности человека (медицина, геология, мониторинг земной поверхности и т.п.). Улучшение контраста предполагает перераспределение исходных яркостных характеристик, обеспечивающее повышение достоверности выявления объекта/областей интереса. При этом из-за существенных различий в характеристиках исходных изображений, разнообразия методов дальнейшего использования результата обработки (в разнообразных системах визуального или автоматического анализа) не существует универсальных алгоритмов повышения контраста [1].

**Анализ последних публикаций по теме исследования**

Одним из перспективных подходов для решения задачи повышения контраста может служить процедура сегментации исходного изображения. Это, с одной стороны, позволяет выделить различные области на исходном снимке, а с другой стороны – улучшить их восприятие для человека или последующего компьютерного анализа.

Задача сегментации может быть решена с помощью выполнения кластеризации с последующей визуализацией ее результатов. В настоящее время популярным методом выполнения кластеризации является применение нечетких алгоритмов, например, FCM (Fuzzy C-Means), который позволяет учесть неопределенность, присутствующую в изображении, путем определения и дальнейшего анализа функций принадлежности объектов к различным классам. Недостатком данного подхода является неоднозначность процесса дефаззификации, которая, в свою очередь, порождает сложности с визуализацией конечного результата.

В работах [2–3] было предложено использование сингулярного разложения и анализа независимых компонент, соответственно, для автоматического определения значимых столбцов нечеткой функции принадлежности, получаемой в результате нечеткой кластеризации, при решении задачи сегментации полутоновых изображений.

**Цель исследования**

В данной работе предложен метод повышения контраста цветных снимков на основе выполнения анализа независимых компонент цветного изображения и матрицы функций принадлежности, полученной в результате его нечеткой кластеризации, с автоматическим отбором наиболее значимых столбцов матрицы независимых компонент и композицией с исходным снимком, что позволяет сохранить цветовой баланс.

**Изложение основного материала исследования**

Предложенный в данной работе алгоритм состоит из следующих шагов.

1. Выполняется нечеткая кластеризация исходного цветного изображения  $I$  размерности  $dy \times dx \times di$  ( $dy$  и  $dx$  – размерность снимка по вертикали и горизонтали, соответственно,  $di$  – количество цветовых/спектральных компонент) в результате чего формируется нечеткая функция принадлежности  $U$  размерности  $n \times c$  ( $n = dy \cdot dx$ ,  $c$  – количество нечетких кластеров, причем  $c : c > p$ , где  $p$  – количество оцениваемых скрытых переменных), что обеспечивает переход в многомерное пространство признаков.
2. Формируется матрица  $I^1$  с размерностью  $n \times (di + c)$ , содержащая матрицы  $I$  и  $U$ .
3. Полученная матрица  $I^1$ , подвергается разложению на основе анализа независимых компонент, который производится с использованием алгоритма FastICA [4]. В результате такого разложения формируются матрицы  $A$  и  $U_{ica}$ , удовлетворяющие выражению:

$$I^1 = AI_{ica}^1 \tag{1}$$

В результате работы алгоритма FastICA также формируется разделяющая матрица  $W$ . Размерность матрицы  $I_{ica}^1 - c_{ica} \times n$ , где  $c_{ica}$  – количество полученных независимых компонент. Размерности матриц  $A - c \times c_{ica}$ , а  $W - c_{ica} \times c$ , соответственно.

4. Вычисляется вектор коэффициентов  $C_{ica}$  по формуле:

$$(C_{ica})_i = \left| \sum_{j=1}^c W_{i,j} \right| \cdot \sum_{j=1}^c A_{j,i}, i \in [1, c_{ica}]. \tag{2}$$

5. Формируется вектор  $C_{ica}^{max}$ , который содержит упорядоченные по убыванию неотрицательные элементы вектора  $C_{ica}$ . Также формируется вектор  $V$ , содержащий индексы элементов в векторе  $C_{ica}$ .
6. Создается вектор  $C_{ica}^0$ , являющийся копией вектора  $C_{ica}^{max}$ . На основании этого вектора рассчитываются коэффициенты, необходимые для формирования выходного изображения путем

слияния матриц  $I$  и  $I^2$ . Поэтому необходимо отмасштабировать все элементы этого вектора так, чтобы их значения не превышали 1. Если векторе  $C_{ica}^0$  существуют элементы, большие 1, то выполняются следующие преобразования:

$$\begin{cases} (C_{ica}^0)_j = (C_{ica}^0)_j / \left( \sum_{k=1}^{n_v} (C_{ica}^0)_k + \max(C_{ica}^0) \right), j: (C_{ica}^0)_j > 1 \\ (C_{ica}^0)_j = (C_{ica}^0)_j / \left( \sum_j (C_{ica}^0)_j + \max((C_{ica}^0)_j) \right), j: (C_{ica}^0)_k < 1 \end{cases} \quad (3)$$

7. Значения вектора  $C_{ica}^{\max}$  масштабируются на отрезок  $[0,1]$  по формуле:

$$(C_{ica}^{\max})_j = (C_{ica}^{\max})_j / \max(C_{ica}^{\max}), j \in [1, n_v], \quad (4)$$

где  $n_v$  – количество элементов векторов  $C_{ica}^{\max}$  и  $V$ .

8. Матрица  $I_{ica}^1$  преобразуется к размерности  $dy \times dx \times c_{ica}$ ,  $dy$  и  $dx$  – количества пикселей по вертикали и горизонтали, соответственно, и интерпретируется, как совокупность полутоновых изображений. Изображения с индексами, входящими в вектор  $V$ , масштабируются на отрезок  $[0,1]$ .

9. Формируется матрица  $I^2$  размерностью  $dy \times dx \times di$  по следующим формулам:

$$(I^2)_{y,x,1} = (I_{ica}^1)_{y,x,V_1} \cdot (C_{ica}^{\max})_1 + \sum_{i=di+1}^{n_v} (I_{ica}^1)_{y,x,V_i} \cdot (C_{ica}^{\max})_i, y \in [1, dy], x \in [1, dx], \quad (5)$$

$$(I^2)_{y,x,i} = (I_{ica}^1)_{y,x,V_i} \cdot (C_{ica}^{\max})_i, y \in [1, dy], x \in [1, dx], i \in [2, di]. \quad (6)$$

Для обеспечения цветового соответствия с исходным снимком, цветовые каналы выходного изображения  $I^{out}$  формируются по следующим формулам:

$$I_{y,x,1}^{out} = I_{y,x,1}^2 \cdot K_R + I_{y,x,1} \cdot (1 - K_R), y \in [1, dy], x \in [1, dx], \quad (7)$$

$$K_R = (C_{ica}^0)_1^{1+(C_{ica}^0)_1/1.5}, \quad (8)$$

для красного цветового канала и для зеленого и синего, соответственно:

$$I_{y,x,i}^{out} = (I_{y,x,i}^2) \cdot K_i + I_{y,x,i} \cdot (1 - K_i), y \in [1, dy], x \in [1, dx], i \in [2, di], \quad (9)$$

$$K_i = \left( (C_{ica}^0)_i^{-K_R/2} + K_R \right) / 2, i \in [2, di] \quad (10)$$

**Экспериментальные результаты.** Предложенный в этой статье алгоритм был применен при обработке различных цветных изображений, примером которых может служить медицинский снимок, представленный на рис. 1 а. Это цветное медицинское фотоизображение, представляющее собой результаты дерматоскопии, проведенной с целью диагностирования меланомы по визуальным признакам, среди которых основными являются наличие бело-синих структур и пятен неправильной формы. На рис. 1 б – 1 г представлены цветовые каналы этого изображения, а на рис. 2 а – 2 в – их гистограммы.

При проведении экспериментов был использован алгоритм нечеткой кластеризации sFCM [5]. При его применении динамическое сжатие и обработка нечеткой функции принадлежности не использовались. Перед применением карты Кохонена число нечетких кластеров увеличивалось в 4 раза, а также осуществлялось упорядочение центроидов на основе матрицы Евклидовых расстояний. Выбор исходного числа нейронов после обучения карты Кохонена осуществлялся на основе максимального соответствия. Количество нечетких кластеров  $c = 6$ . При использовании алгоритма FastICA применялась квадратичная нелинейность. Выбор этого параметра зависит от исходного изображения и параметров кластеризации и оказывает существенное влияние на полученные результаты.

Применение предложенного метода к изображению на рис. 1 а (рис. 3 а) обеспечивает повышение контраста в области интереса (обведена прямоугольником), что позволяет диагностировать наличие меланомы на основании присутствия бело-синих структур. При этом, несмотря на некоторые искажения, цветовой баланс сохраняется. Это можно увидеть при сравнении цветовых каналов полученного изображения (рис. 3 б – 3 г) и их гистограмм, приведенных на рис. 4 а – 4 в, с цветовыми каналами (рис. 1 б – 1 г) и их гистограммами (рис. 2 а – 2 в) у исходного снимка. Визуализация результатов нечеткой кластеризации на основе сравнения с исходными данными [5] (рис. 5 г), хоть и позволяет обнаружить

наличие бело-синих структур, но приводит к нарушению цветового баланса, что затрудняет визуальное определение области распространения меланомы.

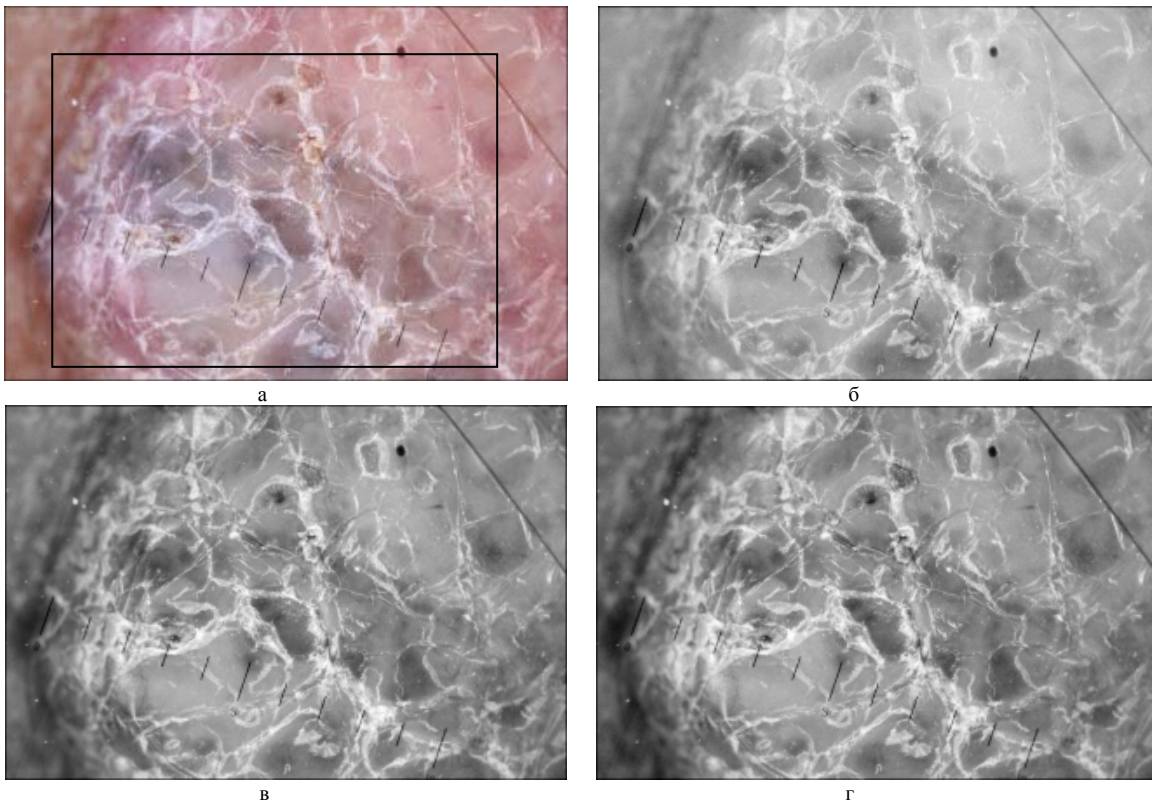


Рис. 1. Цветное медицинское изображение (323x215): а – исходный снимок; цветные каналы: б – красный, в – зеленый, г – синий

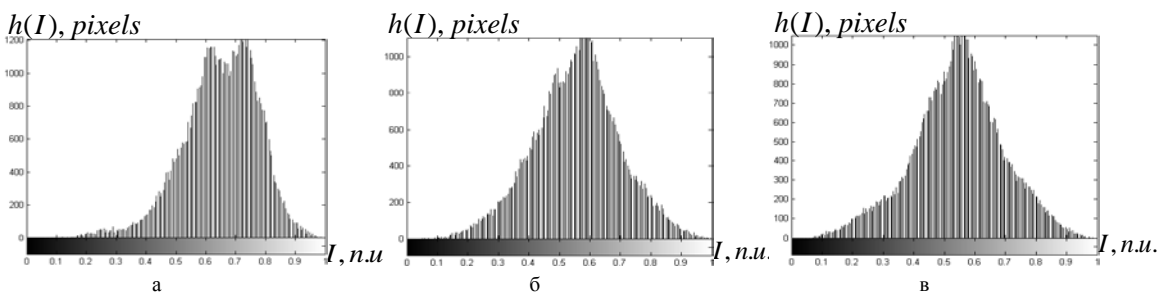


Рис. 2. Гистограммы цветных каналов изображения рис. 1а: а – красного; б – зеленого; в – синего

### Выводы

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный в данной работе алгоритм:
  - позволяет обеспечить повышение контраста при выполнении сегментации изображения, сохраняя при это цветовой баланс в сравнении с исходным снимком;
  - не требует выполнения оконных преобразований, что обеспечивается более высокий уровень быстродействия;
  - тип нелинейности при использовании алгоритма FastICA оказывает существенное влияние на полученные результаты и, по сути, является единственным управляющим параметром при осуществлении визуализации результатов нечеткой кластеризации.
  - при обработке темных изображений предложенный алгоритм не обеспечивает достаточного для визуального анализа уровня повышения яркости.
  - алгоритм FastICA для некоторых данных и типа нелинейности может не обеспечивать сходимость, что не позволяет получить конечный результат.
2. Перспективным направлением исследований является поиск более эффективного способа повышения яркости при обработке темных изображений, а также стабилизация формирования конечного результата при применении алгоритма FastICA.

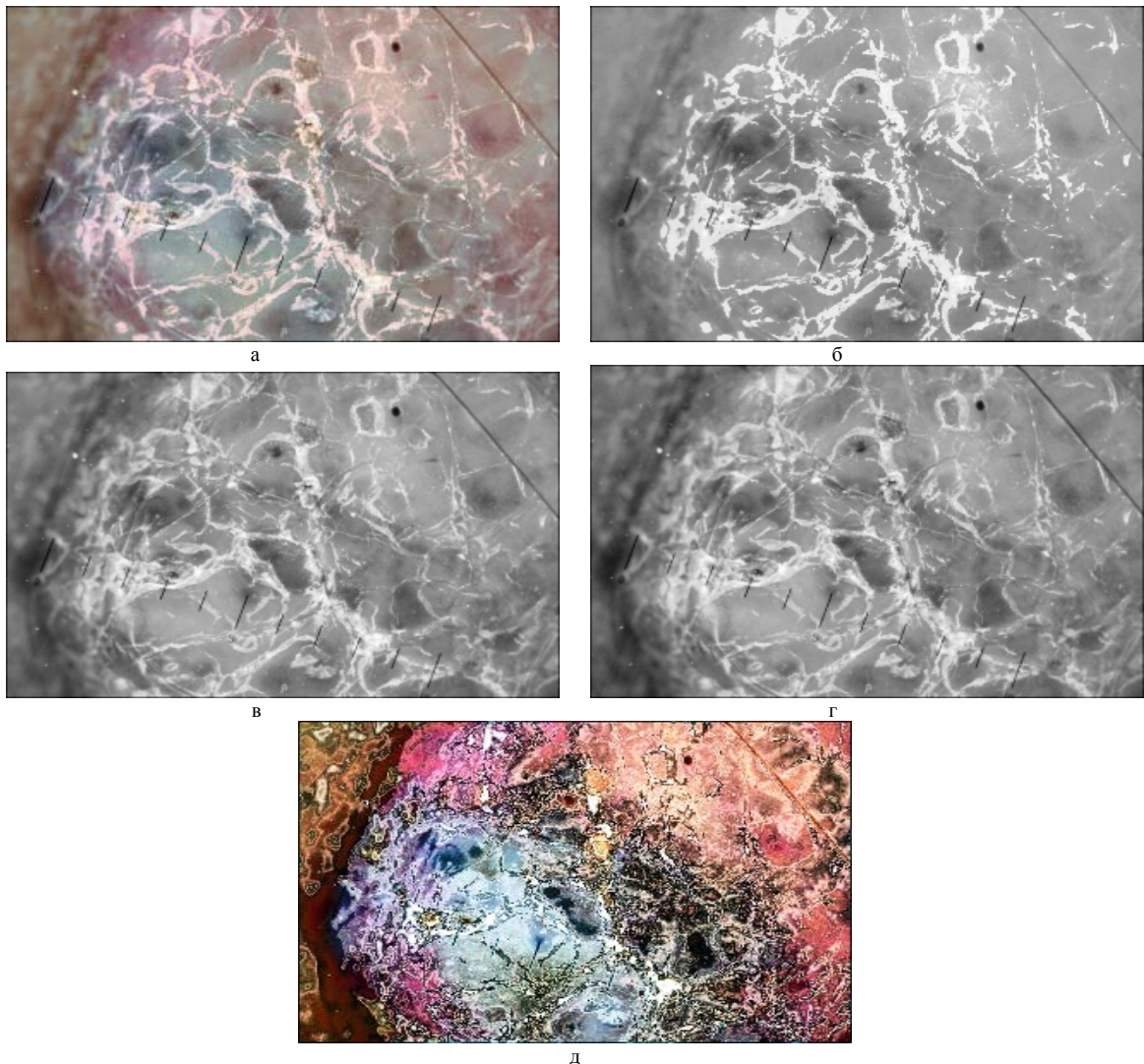


Рис. 3. Повышение контраста изображения рис. 1а: а – результирующее цветное изображение; его цветовые каналы; б – красный, в – зеленый, г – синий; д – визуализация на основе сравнения с исходными данными (цветное изображение)

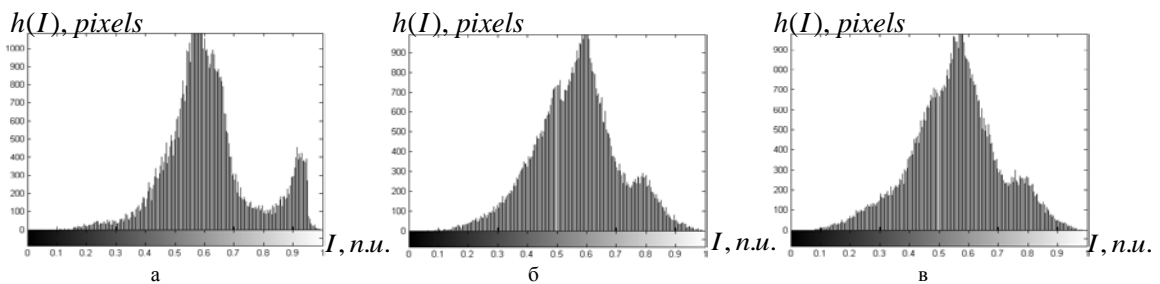


Рис. 4. Гистограммы цветных каналов изображения рис. 3а: а – красного; б – зеленого; в – синего

**Список использованной литературы**

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; [пер. с англ. под ред. П.А. Чочиа]. – М.: Техносфера, 2006. – 1070 с.
2. Ахметшина Л.Г. Визуализация результатов нечеткой кластеризации изображений на основе сингулярного разложения / Л.Г. Ахметшина, А.А. Егоров // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – № 3(54). – С. 198-202.
3. Ахметшина Л.Г. Независимый компонентный анализ одномерных цифровых изображений / Л.Г. Ахметшина, А.А. Егоров // Системні технології. – 2018. – №1(114). – С.17-24.
4. Castells F. Principal Component Analysis in ECG Signal Processing / F. Castells, P. Laguna, A. Bollmann // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2007. – Article ID 74580. – 21 p.
5. Егоров А. Оптимизация яркости изображений на основе нейро-фаззи технологий: Монография / А. Егоров, Л. Ахметшина. – Д.: Изд. Lambert, 2015. – 139 с.



УДК 004.921

А.С. БОГАЦЬКА, Л.М. САВЧЕНКО, Д.В. ВОРОНЦОВА  
 Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

### 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРСОНАЖА КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРИ ЗА РОЗРОБЛЕННЯМ КОНЦЕПТ-АРТОМ

*Створена геометрична 3D-модель персонажа комп'ютерної гри "MobileLegends: BangBang" мишеня-воїн засобами таких програмних пакетів, як Autodesk Maya, ZBrush та Marmoset. Моделювання персонажа виконувалось за концепцією, створення якої складалось з наступних етапів: історія та характер персонажа, силует та видимість усіх елементів персонажа, тоновий поділ та підбір кольорової палітри. Розробка даної концепції проводилась на основі аналізу сучасних методів та підходів художників-концепторів цифрової індустрії. Отримана модель представлена в меню комп'ютерної гри серед інших персонажів.*

*Ключові слова: моделювання, концепт-арт, гейм-індустрія, 3D-модель.*

А.С. БОГАЦЬКАЯ, Л.М. САВЧЕНКО, Д.В. ВОРОНЦОВА  
 Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

### 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРСОНАЖА КОМПЬЮТЕРНОЙ ИГРЫ СОГЛАСНО РАЗРАБОТАНОГО КОНЦЕПТ-АРТА

*Создана геометрическая 3D-модель персонажа компьютерной игры "MobileLegends: BangBang" мышенок-воин с помощью таких программных пакетов, как Autodesk Maya, ZBrush и Marmoset. Моделирование персонажа осуществлялось по концепции, создание которой состояло из следующих этапов: история и характер персонажа, силуэт и видимость всех элементов персонажа, тоновая разбивка и подбор цветовой палитры. Разработка данного концепт-арта проводилась на основе анализа современных методов и подходов художников-концепторов цифровой индустрии. Полученная модель представлена в меню компьютерной игры среди других персонажей.*

*Ключевые слова: моделирование, концепт-арт, гейм-индустрія, 3D-модель.*

A.S. BOGATSKA, L.M. SAVCHENKO, D.V. VORONTSOVA  
 National technical university "Kharkiv polytechnic institute"

### 3D MODELING OF COMPUTER GAME CHARACTER BY DEVELOPED CONCEPT ART

*The geometrical 3d-model of the computer game "Mobile Legends: Bang Bang" personage mouse-warrior is created by facilities of such programmatic packages, as Autodesk Maya, ZBrush and Marmoset. For a bodies design by the program ZBrush were used base mesh spheres and cylinders that in future became deformed and gradually acquired form by means of instruments of Scale, Move, Rotate and default alpha. Shallow details were created in a programmatic complex Autodesk Maya. Farther the heel of the best view of the personage took place in the program ZBrush, whereupon a model was imported in Autodesk Maya that by means of functions FX to generate the effect of falling fabric. When all objects were ready again a model was high-usage in ZBrush, where was painting, involution and baking of maps. In a programmatic complex Marmoset was tuning of light and was render of model.*

*A design of the personage was executed by concept-art, which was created by the next stages : the first stage was creation of the personage history and character. On the second stage the geometrical form of model that influences on psychical perception of this object by person was picked up a personage. After the choice of the best variant worked out on the line and a tone division Farther, on the third stage, the selection of the color palette came true. Development of this conception was conducted on the basis of analysis of modern methods and approaches of painter-concept of digital industry. By programmatic complex Adobe Photoshop the got model was presented in the menu of computer game among other personages.*

*Modern requirements, methods and approaches of creation of general conception of the digital stages were analyzed. On the basis of gain knowledge were created conception of the computer game "Mobile Legends: Bang Bang" personage and a geometrical 3d model is created by the modern computer programs, as Autodesk Maya, ZBrush and Marmoset.*

*Keywords: modelling, concept-art, game-industry, 3D-model.*

#### Постановка проблеми

Гейм-індустрія сьогодні розвивається дуже потужно та з великою швидкістю. В той час, коли споживач приймає участь в он-лайн грі, розробники створюють та доповнюють їх моделями з відповідними функціями. Навіть постійні споживачі не встигають відмітити усі удосконалення програми відразу. Геометричне моделювання персонажа комп'ютерної гри являє собою складний процес, першим етапом якого є розробка загальної концепції моделі. Створений в найкоротші терміни начерк або макет персонажа трансформується вже в 3D-модель з подальшим оживленням. Щоб персонаж набрав високий рейтинг серед гравців, він повинен бути харизматичним, яскравим та вражаючим. З цією задачею розробники впорюються по-різному, використовуючи особливі прийоми, власні навички та неординарні рішення.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Вдало розроблений концепт-арт художників-концепторів задає загальний настрій усієї сцени та точний інструктаж для роботи моделерів, аніматорів та інших працівників студії з відповідними моделями. Далі приведено приклади методів і підходів художників-концепторів сучасної цифрової індустрії.

Художник А. Ляпичев приводить приклад, що навіть недбалі мазки-удари і грубі форми, якими виконано начерк жодним чином не відбиваються на якості роботи і відчутті від неї, глядач відразу розуміє, що перед ним, відчуває динаміку того, що відбувається, і може зрозуміти, що намагався донести до нього автор [1].

Сідней Джей Мід набув широкої популярності як автор концепт-арту для науково-фантастичних фільмів, таких як "Що Біжить по лезу бритви", "Чужі і Трон" [2]. Усі його роботи вирізняються оригінальністю і притягають погляди, кожний предмет, який слід зображувати, він влітає в деяке оточення, зображує поряд з ним людські фігури, приділяючи цьому обрамленню не менше уваги, ніж основному предмету. Фірмовим знаком став і особливий ракурс та використання всього 12 кольорів.

Джеймс Гурні [3] застосовує методи, які дозволяють вирішувати різні уявні поняття, як істоти, людини, будівлі, оточення та багато іншого. В *Drawing Basics and Video Game Art* [4] широко розкривається питання з приводу створення концептуального мистецтва для ігор.

Кріс Соларскі розповідає про те, як змінилися художні стилі протягом багатьох років. Приводить порівняння того, наскільки образотворче мистецтво може переплітатися з мистецтвом відеоігор та як їх взаємодія розвинулася протягом десятиліть.

В роботі [5] викладено методіку розвитку творчого мислення, яка повинна містити стандартний тренінг з включенням вправ з розвитку креативності. З'ясовано, що нова методіка розвитку творчого мислення є необхідним засобом і повинна виступати домінуючим вектором у творчому мисленні під час підготовки до проектування.

#### Мета дослідження

Метою дослідження є розробка концепт-арту персонажа комп'ютерної гри на основі аналізу робіт сучасних художників-концепторів та створення 3D-моделі за розробленим концептом.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

В ході аналізу робіт сучасних художників-концепторів були виявлені основні етапи створення концепт-арту: історія та характер персонажа, силует та видимість усіх елементів персонажа, тоновий поділ та підбір кольорової палітри.

Першим етапом розробки концепції власної моделі було створення історії та характеру персонажа (рис. 1). Було вирішено, що модель буде являти собою мишеня-воїна, який характером схожий на Робін Гуда та проживає на полонині між гір України. Мишеня має велику родину та багато добрих друзів.

Далі необхідно було забезпечити його зброєю та цікавою позою, щоб з силуету було зрозуміло що це за персонаж, його характер та вид зброї.



Рис. 1. Розробка історії та характеру персонажа.

На другому етапі підібрали геометричну форму моделі, що впливає на психологічне сприйняття цього об'єкта людиною. Кожний персонаж має в основі прості геометричні фігури. Вони також додають характеру персонажа. Наприклад, коло характеризується, як нестабільна, але дружня форма. Багатокутник створює враження стабільності, але форма трохи агресивніша. Трикутник з гострими кутами викликає загальні емоції від сприйняття, які можна описати так: небезпека, динаміка, активність.

За допомогою програмного забезпечення AdobePhotoshop було розроблено варіанти силуетної плями з опрацюванням сприйняття круглої геометричної форми персонажа (рис.2). Силует з луком був пріоритетним, тому що саме цієї зброї найменше запропоновано в грі. Було вирішено не перенавантажувати героя деталями.

Після вибору найкращого варіанту розробили лайн і тоновий поділ (10% – чорного, 60% – сірого, 30% – білого). Зони інтересу виділи білим кольором так, щоб вони не були зосереджені в одному місці (рис. 3).

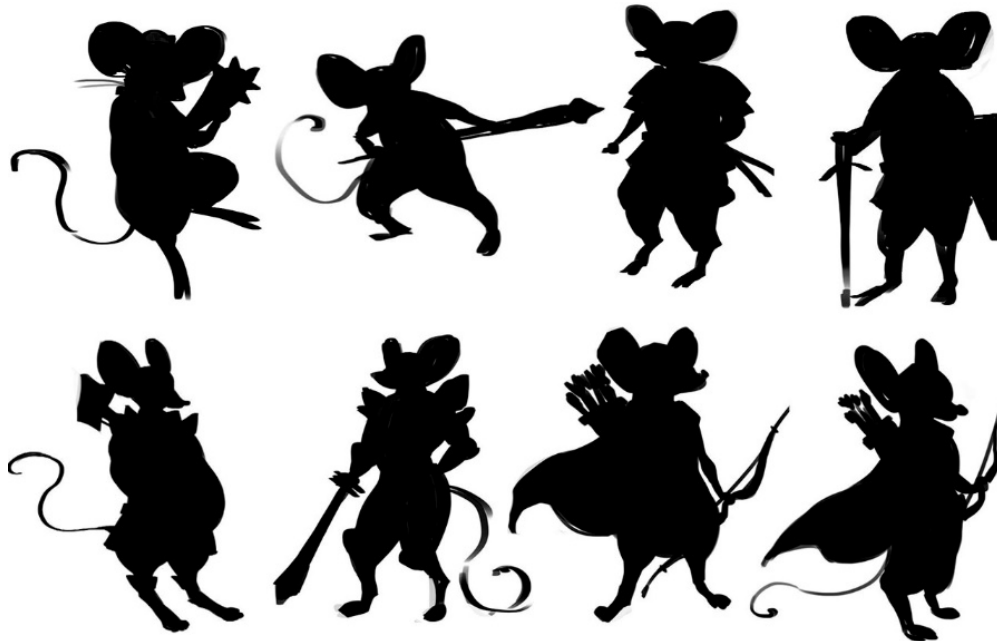


Рис. 2. Варіанти силуетної плями.



Рис. 3. Тоновий поділ.

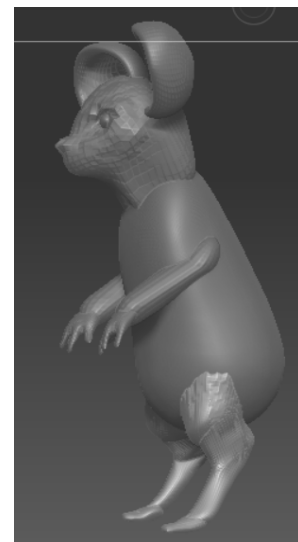


Далі, на третьому етапі, здійснювався підбір кольорової палітри. Натхнення щодо кольорових рішень було взяте із картин та фотографій природи. Тому що саме природа створює найбільш цікаві та зрозумілі споживачу поєднання кольорів (зелений, оливковий, бежевий та жовтий). Остаточний варіант концепції персонажа приведено на рис. 3.

Спіраючись вже на розроблений концепт-арт персонажа, здійснювалось створення 3D-моделі. Застосовуючи програмні пакети такі, як Autodesk Maya, ZBrush, Marmoset, була виконана тривимірна графіка. Для моделювання тіла в програмі ZBrush використовувалися базові меши сфери та циліндри, які надалі деформувались і поступово набували форми за допомогою інструментів Skale, Move, Rotate, кастомні пензлі та дефолтні альфа (рис. 4, а). В програмному комплексі Autodesk Maya були створені дрібні деталі такі як лук, стріли та сагайдак (рис. 4, б). Далі підбір найкращого ракурсу персонажа відбувався у програмі ZBrush, після чого модель була імпортована у Autodesk Maya, щоб за допомогою функцій FX згенерувати ефект падіння тканини (плащу). Коли усі об'єкти були готові, модель знов була завантажена в ZBrush, де потім виконувались розфарбування, розгортка та запікання карт. У програмному комплексі Marmoset відбувалось налаштування світла, і був виконаний рендер моделі (рис. 5). За допомогою програмного комплексу AdobePhotoshop отримана модель була представлена в меню комп'ютерної гри (рис. 6).



а



б

Рис. 4. Процес створення 3D моделі.



Рис. 5. Результат рендеру персонажа.



Рис. 6. Персонаж у меню гри "Mobile Legends: Bang Bang".

### Висновки

В роботі проаналізовано сучасні вимоги, методи та підходи створення загальної концепції цифрових сцен. На основі отриманих знань розроблена концепція персонажа комп'ютерної гри та створена геометрична 3D-модель мишеня-воїна за розробленим концепт-артом.

### Список використаної літератури

1. Ляпичев А. Концепт-арт – історія, призначення, проблеми, пов'язані з ним, і способи його створення [Електронний ресурс] / А. Ляпичев. – Режим доступу: <https://habrahabr.ru/post/164451>.
2. Мріяти корисно – художник-дизайнер і футурист Сід Мід [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zabarankoi.mirtesen.ru/blog/43777836539/Mechtat-polezno-Hudozhnik,-dizayner-i-futurist-Sid-Mid>
3. Gurney J. Imaginative Realism: How to Paint What Doesn't Exist / J. Gurney // Series: James Gurney Art (Book 1). – К. :McMeel Publishing, 2009. – 224 с.
4. Solarski C. Drawing Basics and Video Game Art / C. Solarski. – К. : Watson-Guptill, 2012. – 240 с.
5. Методика розвитку творчого мислення майбутніх дизайнерів для підготовки до дипломного проектування [Електронний ресурс] / Т.С. Козак // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Вип. 27(4). – С. 181-185.

УДК: 378.013+004.9

Л.В. БРЕСКИНА, О.І. ШУВАЛОВА

Державний заклад "Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського"

## ПЕДАГОГІЧНІ УМОВИ ОДЕРЖАННЯ ДОСВІДУ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ МАЙБУТНІМИ УЧИТЕЛЯМИ МАТЕМАТИКИ

*В роботі розглядається хід та результати експериментального залучення студентів першого курсу спеціальності 014 – середня освіта (математика) до дистанційного консультування школярів загальноосвітнього навчального закладу. Наводиться інтерпретація одержаних результатів перевірки соціально-інформатичної підготовки студентів та описується план вдосконалення підготовки майбутніх вчителів математики до впровадження дистанційних форм навчання в школі. Експериментальним залученням студентів до роботи над проектом ми досягли очікуваних результатів: була підвищена мотивація щодо практики використання інформаційних засобів розробки навчальних матеріалів (он-лайн презентацій та відео), тестових завдань та формування зведених даних щодо успішності навчання учнів за допомогою Google Форм, а також мотивація щодо використання математичних пакетів для підтримки дистанційного вивчення математики у загальноосвітній школі.*

*Ключові слова: підготовка майбутніх вчителів математики, дистанційне навчання, соціально-інформатична підготовка студентів.*

Л.В. БРЕСКИНА, О.І. ШУВАЛОВА

Учебное заведение "Южно-Украинский национальный педагогический университет имени К.Д. Ушинского"

## ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИОБРЕТЕНИЯ ОПЫТА ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ БУДУЩИМИ УЧИТЕЛЯМИ МАТЕМАТИКИ

*В работе рассматривается ход и результаты экспериментального привлечения студентов первого курса специальности 014 – среднее образование (математика) к дистанционному консультированию школьников общеобразовательного учебного заведения. Приводится интерпретация полученных результатов проверки социально-информатической подготовки студентов и описывается план совершенствования подготовки будущих учителей математики к внедрению дистанционных форм обучения в школе. Экспериментальным привлечением студентов к работе над проектом мы достигли ожидаемых результатов: была повышена мотивация к практике использования информационных средств разработки учебных материалов (он-лайн презентаций и видео), тестовых заданий и формирования сводных данных по успеваемости учеников с помощью Google Форм, а также мотивация к использованию математических пакетов для поддержки дистанционного изучения математики в общеобразовательной школе.*

*Ключевые слова: подготовка будущих учителей математики, дистанционное обучение, социально-информатическая подготовка студентов.*

L.V. BRESKINA, O.I. SHUVALOVA

South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushynsky

## PEDAGOGICAL CONDITIONS FOR FORMING THE TRAINING EXPERIENCE OF FUTURE TEACHERS OF MATHEMATICS

*The paper examines the course and results of the pilot engagement of students of the first year of specialty 014 – secondary education (mathematics) for distance counseling of secondary school pupils. It also presents the interpretation of the obtained results of checking the social and computer training of students and describes the plan for improving the training of future teachers of mathematics for the introduction of distance learning forms at the school.*

*As a result of the work on the project, students' motivation for distance learning; motivation to study information technologies; the quality of performing the current educational tasks in mathematics and physics were explored. To achieve the goal, the following tasks were set:*

*- For students: to form a virtual educational space and to provide the pedagogical conditions for communication in educational purposes; develop explanations of the educational material through on-line presentations and videos; develop tests to check students' material knowledge.*

*- For pupils: to take advantage of the opportunity provided by telecommunication facilities during the semester to consult on given tasks in mathematics, algebra, geometry and physics; get acquainted with e-learning materials provided by students; take part in remote polls.*

*During the work on the project, students developed blogs (Google app - Blogger as a platform) for distance learning with pupils. Students have chosen the blog among the following organizing work in the group tools studied in the first semester of the Informatics course: Blogger Blog; Google Sites; Google Groups; groups in Facebook social network. As well as site in HTML and CSS stylesheets that is hosted as a repository on one of the largest and most popular web services for the joint development of <https://github.com> software based on the version control system Git, that was introduced in the second semester of the course "Informatics".*

*By involving students in working on the project, we have achieved the expected results: motivation to use educational material (online presentations and videos) and test tasks developing tools and technologies were increased, as well as motivation to use mathematical packages to support the distance learning of mathematics in a secondary school.*

*Keywords: preparation of future teachers of mathematics, distance learning, social and computer trainings of students.*

### **Постановка проблеми**

З початку 2000-х років в системі освіти йдеться про формування компетентностей, що розширює задачі навчального процесу у порівнянні з системою формувань знань, вмінь та навичок. Особливим аспектом при такому компетентністному підході є одержання досвіду використання здобутих знань, вмінь та навичок у професійній діяльності. Говорячи про підготовку в галузі інформатики та інформаційних технологій майбутніх учителів математики, саме одержання досвіду використання цих технологій у навчальному процесі, який є одним з основних компонентів професійної діяльності майбутніх учителів математики, є проблемою аж до сьогодні: вивчаючи інформатику на першому курсі, студенти зштовхуються з такими проблемами, як відсутність можливості використати свої навички та вміння при навчанні учнів. Так протягом педагогічної практики, яка відбувається на 4 курсі та в магістратурі, дуже рідко кому зі студентів-практикантів пощастить одержати дозвіл від вчителя загальноосвітнього навчального закладу на використання нових технологій в класах, де перші два тижня, як зазвичай, студенти працюють взагалі як спостерігачі. Коли випускники педагогічних університетів потрапляють на роботу, вони занурюються у систему професійного зростання вчителів, яка склалася на сьогодні таким чином, що використання інформаційних технологій у навчанні є обов'язковим лише для вчителів вищої категорії (а молодим спеціалістам до вищої категорії ще роки роботи). Тому, коли після майже десятирічної перерви з часу навчання інформатики, діючим викладачам пропонують створити електронне портфоліо, або організувати учнів для дистанційної роботи під час збільшених канікул та карантину, усі починають користуватися тими засобами, які вони використовують у повсякденному житті. Але дослідження, які ми проводили протягом навчання студентів в ДЗ "Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського" доводять, що не усі засоби індивідуального спілкування можна ефективно застосовувати при роботі з групою користувачів, особливо з навчальною метою. Крім того, проблеми полягають не тільки у соціально-інформатичних компетентностях, до яких відноситься досвід організації дистанційної роботи з групою.

Справа у тому, що використання інформаційних технологій на сучасному рівні – це ще і використання математичних пакетів. Як вчителю математики організувати самостійну роботу учнів з математичними пакетами, якщо за програмою вивчення інформатики у школі вивчення прикладного програмного забезпечення для підтримки навчання шкільних дисциплін явно не передбачено. При цьому особливі проблеми виникають при встановленні та налагодженні роботи прикладного програмного забезпечення учнями. Таким чином, це дослідження присвячено проблемі, як у навчальному закладі одержання вищої педагогічної освіти створити умови для одержання досвіду організації дистанційного навчання майбутнім учителям математики та сформувати у них культуру використання інформаційно-комунікаційних засобів для підвищення ефективності навчання математики у загальноосвітній школі. Саме наявність інформаційної культури, як внутрішнього стимулу, може стати підґрунтям для мотивації майбутніх учителів математики до використання інформаційно-комунікаційних засобів навчання.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

У 2017 році Лілія Гриневич надала напрям реформи освіти: "Від школи, де накачують знаннями, ми переходимо до школи компетентностей" [1]. У вищих таких перехід почався з 2000 років. Компетентнісний підхід (ідеологами якого були І. Д. Бех, Н. М. Бібік, Л. С. Ващенко, І. Г. Єрмаков, О. І. Локшина, О. В. Овчарук, Л. І. Парашенко, О. І. Пометун) у сучасній вітчизняній педагогіці починають використовувати тільки з останньої чверті ХХ століття [2], тому що він є розвитком діяльнісного підходу (засновниками якого були Л. С. Виготський, О. М. Леонтьєв, С. Л. Рубінштейн) в умовах, коли знаннева компонента методичної системи навчання не стільки відходить на другий план, скільки модифікується від подання системи знань до подання принципів формування системи знань. На перший план виходить досвід професійної діяльності. Така модифікація формування змістового компоненту методичної системи навчання обумовлена тим, що доступ до системи знань став більш зручним, швидким та мобільним, через використання сучасних засобів збереження та передавання даних [3–4].

Тобто, якщо раніше в першу чергу треба було вивчити матеріал, то зараз доцільніше засвоїти принципи, сформувати зв'язки між даними, поєднуючи їх у цілісну систему, а деталі завжди можна уточнити, маючи доступ до необхідних матеріалів. Таким чином нами був виявлений основний напрям вдосконалення сучасної підготовки майбутніх вчителів – це підсилення досвіду професійної діяльності. Зокрема це стосується підготовки в галузі інформатики та інформаційних технологій майбутніх учителів математики.

Використання комп'ютерів при навчанні математики та при підготовці майбутніх учителів математики в різні роки досліджували М. І. Жалдак., С. А. Раков., О. В. Співаковський, В. І. Клочко, З. І. Слєпкань, С. О. Семеріков, Г. П. Бевз, І. В. Лупан, І. О. Теплицький, В. В. Лапінський, М. І. Шут, І. І. Головки, В. В. Білозор та інші. Історично першим напрямом використання інформаційних технологій при вивченні дисциплін в загальноосвітніх навчальних закладах було саме на уроках фізико-математичного циклу [5–7]. В роботах фахівців наукової школи М. І. Жалдака детально досліджені комп'ютерно-орієнтовані методичні системи навчання математики і частково фізики, та сформульований принцип доцільності використання комп'ютерних систем у загальноосвітній школі – це "гармонійне педагогічно доцільне і виважене поєднання надбань традиційних методичних систем навчання і сучасних інформаційно-комунікаційних технологій" [8].

Для реалізації принципів мобільності навчання доцільним є використання Інтернет-орієнтованих інформаційних систем (В. Ю. Биков, А. М. Гуржій, М. П. Шишкіна, В. В. Лапінський, Н. С. Павлова, К. П. Музичук, С. Г. Литвинова, І. В. Сальник, О. А. Білоус, Т. П. Говорун, М. М. Дунаєва та інші), особливістю яких є поєднання в межах однієї системи різних форматів даних, що передаються за різними протоколами [9]. Так значної популярності останні роки набули хмарні середовища для навчання через те, що користувачам не треба турбуватися про встановлення та налагодження програмного забезпечення, а необхідно лише мати доступ до ресурсів мережі Інтернет. Таким чином, перспективним розвитком дистанційної роботи викладачів з консультування в галузі математики учнів загальноосвітніх навчальних закладів є інтеграція математичних пакетів, що працюють в якості хмарних сервісів, зі створеними віртуальними навчальними середовищами, в межах яких планується організація дистанційного навчання.

#### **Мета дослідження**

Метою роботи є перевірка ефективності реалізації дуальної освіти при вивченні інформатики на першому курсі студентами спеціальності 014 – середня освіта (математика) через залучення їх до дистанційних форм консультування учнів 6 та 7 класів.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

З метою підвищення мотивації вивчення інформатики на першому курсі студенти спеціальності 014 – середня освіта (математика та фізика) були залучені до дистанційних форм консультування учнів 6 та 7 класів. Проект був представлений як для студентів, так і для учнів ЗОШ №73 м. Одеси під назвою "Використання інформаційних технологій у навчанні".

Для студентів це була можливість перевірити свої навички використання інформаційних технологій для виконання роботи вчителя, що є необхідним для сучасних нової школи, в якій активно запроваджується змішане [10] навчання. Для учнів – це була можливість одержати досвід використання інформаційних технологій поза межами курсу інформатики. Теоретично, це можна було б здійснювати і силами педагогічного колективу школи без залучення студентів педагогічного університету. Але, не дуже з'ясовано, яким чином тоді здійснювався би контроль за активністю роботи вчителів (та взагалі чи було б це коректним), наскільки активно можна було б втручатися в рекомендації щодо організації дистанційного спілкування і, на нашу думку найголовніше, при безпосередньому контакті вчителів з учнями що саме було б мотивацією для ускладнення спілкування застосуванням додаткових програмних засобів. Усі розуміють, що безпосереднє спілкування Учитель-Учень є найбільш ефективною схемою підготовки учнів та врахування їх індивідуальних особливостей. Проте, життя диктує інші умови: збільшення кількості учнів у класах вимагають від вчителів самовдосконалення в галузі інформаційно-комунікаційних компетентностей для того, щоб підтримувати рівень якості навчання. Насправді є інші методики, такі як робота в малих групах, ігрові форми навчання, тощо, які не передбачають використання елементів змішаного навчання. Тому експериментальне дослідження з перевірки ефективності дистанційних форм навчання на першому етапі доцільно проводити саме із залученням студентів, які поставлені в такі умови, коли іншого засобу спілкування з учнями в них не було.

Актуальність цього експериментального дослідження полягає в продовженні перевірки методик впровадження інформаційних технологій в навчальний процес та реалізації дуальної освіти [11] при підготовці майбутніх учителів математики та фізики.

Очікуваним результатом був розвиток соціально-інформатичних компетентностей майбутніх учителів математики та учнів через формування відповідних педагогічних умов:

- форма спілкування студентів-викладачів та учнів виключно дистанційна, опосередкована сучасними інформаційно-комунікаційними засобами (конкретні засоби було запропоновано студентам

обрати самостійно, на підставі знань, вмінь та навичок, здобутих протягом навчання за курсом "Інформатика" в першому семестрі);

- контроль за активністю та коректністю роботи студентів відбувався на парах з інформатики в педагогічному університеті лектором та викладачем, що вів лабораторні роботи, в межах консультування виконання самостійної роботи студентів;

- контроль за роботою учнів відбувався на уроках інформатики в загальноосвітній школі в межах актуалізації закріплення вивченого матеріалу протягом другого семестру (за рекомендаціям протягом другого семестру доцільно кожного уроку повторювати навчальний матеріал, що був вивчений раніше).

В результаті роботи над проектом досліджувались мотивація учнів до дистанційного навчання; мотивація студентів до вивчення інформаційних технологій; активність виконання поточних навчальних завдань учнів з математики та фізики. Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- Для студентів: сформувані віртуальний навчальний простір та забезпечити педагогічні умови спілкування в цьому просторі з навчальною метою; розробити пояснення навчального матеріалу за допомогою он-лайн презентацій і відео, та тести для перевірки знань учнів за розглянутим матеріалом.
- Для учнів: скористатися протягом семестру наданою можливістю за допомогою телекомунікаційних засобів консультуватися з поточних завдань з математики, алгебри, геометрії та фізики; ознайомитись з наданими студентами електронними навчальними матеріалами; прийняти участь у дистанційних опитуваннях.

Протягом роботи над проектом студентами були розроблені блоги за допомогою додатку Google – Blogger (рис. 1), як майданчики для дистанційної роботи з учнями (окремо студентами-математиками, окремо студентами-фізиками). Результатом розробки студентів математики став блог за адресою <https://math-pnpu.blogspot.com/>. Результатом розробки студентів фізиків став блог за адресою <https://physicsandschool.blogspot.com/>. Студенти обирали створення саме блогу серед наступних засобів організації роботи в групі, що вивчали в першому семестрі курсу "Інформатика": блог на Blogger; Google Сайти; Google Групи; групи в соціальній мережі Facebook. Та за матеріалами другого семестру курсу "Інформатика": сайт на HTML та CSS стилів, що розміщений в якості репозиторію на одному з найбільших та найпопулярніших веб-сервісів для спільної розробки програмного забезпечення <https://github.com>, що базується на системі керування версіями Git і розроблений на Ruby on Rails і Erlang компанією GitHub, Inc, а весною цього року проданий компанії Microsoft за 7,5 мільярдів доларів [12].

Ось які аспекти студенти виокремили при обговоренні на лекції з курсу "Інформатика" вибору саме Blogger в якості віртуального майданчику: зручніше працювати при завантаженні файлів з комп'ютера – при роботі з Google Сайтами усі документи, що додаються на сайт, повинні бути завантажені на Google Диск, а фото у альбом на Google Фото, на відміну від Blogger, де зручно завантажувати фото одразу з локального диску персонального комп'ютеру; на Blogger в подальшому можна додати власну URL-адресу ресурсу, на відміну від Google Сайтів, де така можливість не передбачається; порційність подання матеріалу в блозі протиставляється складній структурі навігації по сайту; при використанні блогу немає відволікаючого фактору на відміну від груп в соціальних мережах; можливість залучити до авторства в блозі інших користувачів (на відміну від використання приватного репозиторію на github).



Рис. 1. Блоги студентів, створені в межах проекту "Використання інформаційних технологій у навчанні"

Для зручного консультування учнів зі студентами був створений альбом на Google Фото зі спільним доступом, куди кожний користувач, що підписався, мав можливість додати фото (рис.2). Учням було запропоновано сфотографувати завдання, що викликає труднощі, і надіслати до відповідного альбому (рис.3). В якості коментарів до таких фотографій можна було залишити додаткові питання, посилання на пояснення матеріалу, тощо. Робота з такими альбомами ані у студентів, ані у учнів не викликало суттєвих труднощів, бо завантаження фотографій – це перші навички, які засвоюють користувачі у будь якій системі і пов'язано це з їх загально-соціальною активністю, яку бажано направляти у більш продуктивне русло (як ці фотографії з поясненням навчального матеріалу).

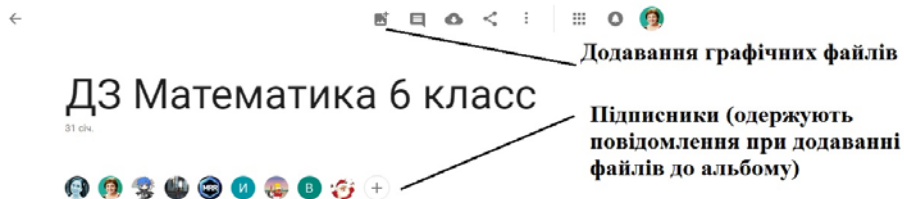


Рис.2. Один зі створених альбомів для консультування учнів в межах проекту "Використання інформаційних технологій у навчанні"

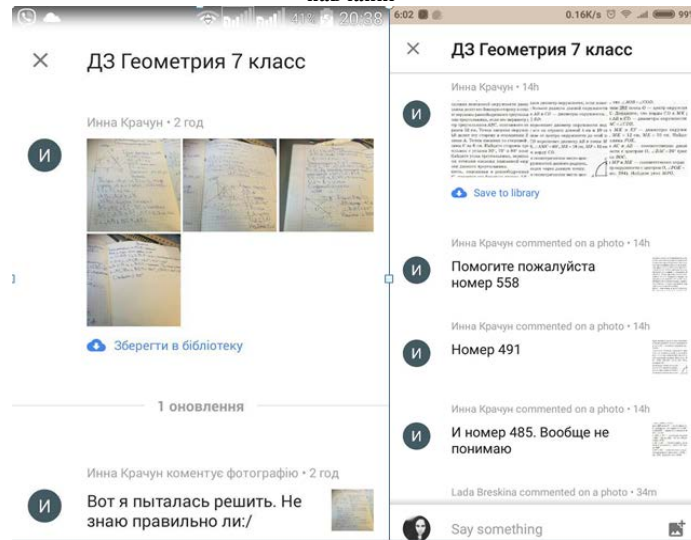


Рис.3. Питання учнів в межах проекту "Використання інформаційних технологій у навчанні"

Експериментальним залученням студентів до роботи над проектом ми досягли очікуваних результатів: була підвищена мотивація щодо практики використання інформаційних засобів розробки навчальних матеріалів (он-лайн презентацій та відео), тестових завдань та формування зведених даних щодо успішності навчання учнів за допомогою Google Форм. Про підвищення мотивації свідчать не тільки результати роботи студентів, що увійшли, та не увійшли до публікації на розроблених блогах, а й фрагменти переписки в комунікаторі Viber (рис. 4), які на наш погляд можна представляти публічно, бо ці повідомлення були надіслані в групу, а не в якості приватних повідомлень.

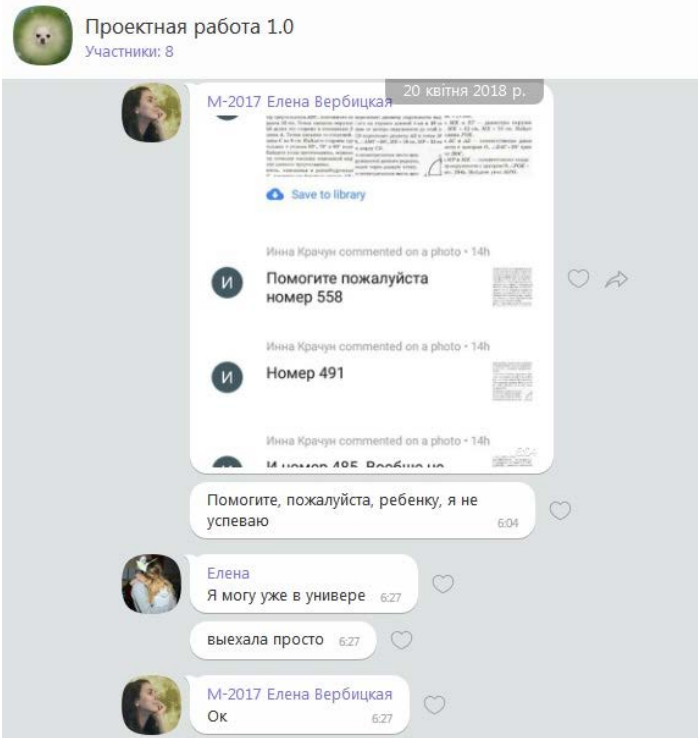


Рис.4. Активізація роботи студентів координатором проекту, студенткою першого курсу, як демонстрація підвищення мотивації навчальної діяльності



Протягом організації дистанційної роботи з учнями студенти на практиці відчули доцільність залучення до своєї дистанційної роботи в якості інструментарію хмарних засобів математичного моделювання, що викладається за програмою на другому курсі навчання. В якості такого хмарного засобу у 2018-19 навчальному році нами заплановано використання WolframAlpha– бази знань, що підтримує пошук відповіді на запити в режимі довідника з математики та фізики та набору обчислювальних алгоритмів (Рис. 5).

Так для школярів, починаючи вже з 5 класу, при вивченні теми натуральні числа можна використовувати Elementary Math, в якому для зручної візуалізації обчислень навіть генерується інтервал на координатній осі із зазначенням результату обчислення (рис.6).

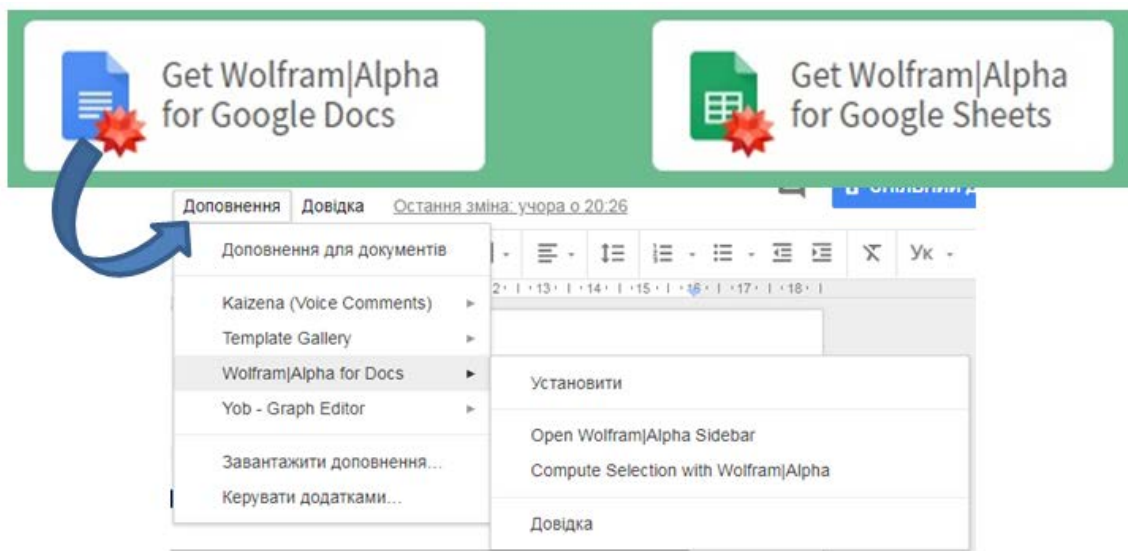


Рис. 5. Встановлення математичного пакету в якості додатку Google Документу



Рис. 6. Результат он-лайн обчислень в середовищі WolframAlpha

В цьому ж розділі візуалізується робота з дробом (рис.7). Модуль Geometry також можна починати використовувати вже в 5 класі при здійсненні міжпредметних зв'язків математики та інформатики, наприклад при побудові трикутників та обчисленні периметру геометричних фігур (рис.8).

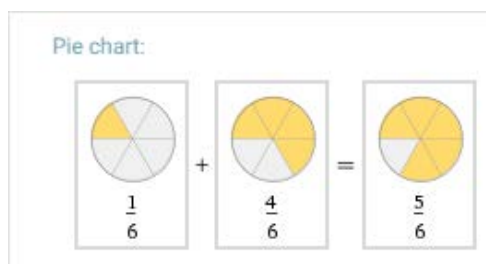


Рис. 7. Візуалізація роботи з дробом в середовищі WolframAlpha

Генерація таких прикладів дуже корисна, тому що виходячи зі шкільної програми з математики, "Вивчення математики у 5–6 класах здійснюється з переважанням індуктивних міркувань в основному на наочно-інтуїтивному рівні із залученням практичного досвіду учнів і прикладів із довкілля" [13].



На жаль такі можливості, як покрокова демонстрація вирішення, збереження зображень в якості файлу на локальний диск, збереження у форматі cdf – форматі обчислювальних документів, які підтримують інтерактивність та динамічність, – доступні лише платній версії. А робота довідкової системи взагалі не доступна з текстами кирилических шрифтів.

Нами було прийняте рішення, що в межах курсу "Інформатика" майбутнім вчителям математики необхідно давати для порівняння декілька математичних пакетів, включаючи популярне сьогодні рішення scilab, та програмний засіб Gran, орієнтований спеціально для використання у школі. Але сьогоднішня вимога від викладачів використання он-лайн сервісів, що інтегруються з роботою інших хмарних сервісів для узгодженості дистанційної роботи з учнями. І ми до цього готували студентів з першого семестру їх підготовки в галузі інформатики – протягом експериментального навчання був модифікований змістовий компонент навчання інформатики за рахунок всебічного використання мережевих технологій.

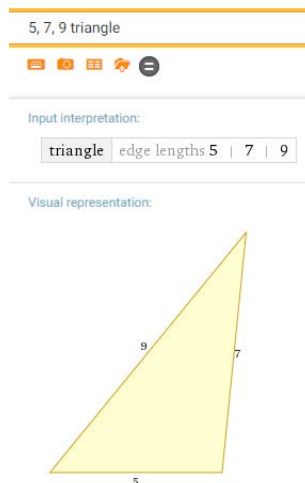


Рис. 8. Використання модулю Geometry в середовищі WolframAlpha

Студенти-першокурсники вивчали прикладне програмне забезпечення на основі принципів порівняння роботи з прикладними програмами різних офісних пакетів:

- 1) LibreOffice, OpenOffice (вільно розповсюджуються);
- 2) Microsoft Office (як найбільш поширений у сучасних користувачів в Україні);
- 3) Microsoft Office OneDrive (безкоштовний мережевий);
- 4) Google Додатки (безкоштовний мережевий).

Зміст навчання, що базувався на вивченні хмарного програмного забезпечення паралельно з локальним, було підтримано змішаною формою навчання з використанням в якості засобу дистанційної роботи зі студентами закритих Google Груп (рис.9). Використання Google Групи, як засобу навчання, передбачало для студентів вивчення правил роботи в соціальних групах, ознайомлення з принципами залучення нових користувачів, орієнтація в новому середовищі. Для викладачі необхідно було організувати надання ролів та повноважень, сформувати графік роботи по представленню методичних матеріалів та перевірки студентських робіт з чіткими вимогами щодо форми подачі звітних робіт студентів. Така роботи призвела до значного підвищення рівня опанування мережевих технологій студентами-першокурсниками та значно спростила роботу іноземних студентів, які мали можливість не тільки читати методичні вказівки викладачів, але й переглядати роботи своїх однокурсників та користуватися електронними засобами перекладу цих матеріалів.



Рис.9. Робота студентів в Google Групі при реалізації змішаного навчання за курсом "Інформатика" (приклад подання методичного матеріалу в групі)

В наведеному фрагменті реалізації змішаних форм підготовки студентів першого курсу (рис.7) можна побачити, що при публікації у темах повідомлень значно менш, ніж кількість перегляду цих тем, наприклад у Лабораторній роботі №4 опубліковано 30 повідомлень та 171 перегляд – це свідчить про активність роботи студентів та їх зацікавленість матеріалами своїх однокласників. Таким чином, дистанційні форми роботи на основі віртуальних майданчиків це не просто форма спілкування – це формування інформатичної культури співпраці, колаборативного навчання, взаємопідтримки та взаємодопомоги.

#### Висновки

В результаті залучення студентів першого курсу спеціальності 014 – середня освіта (математика та фізика) до дистанційного консультування учнів загальноосвітнього навчального закладу студенти отримали досвід використання інформаційно-комунікаційних засобів, які вони вивчали в якості користувачів протягом першого семестру навчання. Це дало можливість закріпити їх навички роботи з відповідним інструментарієм, вдосконалити вміння створювати електронні навчальні матеріали, реалізувати свої методичні прагнення та самореалізуватися в якості учителів. Але при підготовці студентських навчальних матеріалів (презентації та відео) студентам не вистачало досвіду викладацької діяльності, що можна було передбачити, оскільки для того, щоб підготувати якісний навчальний матеріал треба знати, що зазвичай викликає труднощі та змоделювати процес засвоєння матеріалу.

З боку роботи учнів були виявлені інші не зовсім очікувані результати: для проведення дистанційної навчальної роботи необхідна додаткова мотивація учнів (навіть якщо учні мали труднощі у навчанні, вони не намагалися отримати консультацію); учні продемонстрували недовіру до безкоштовного навчання та до навчання особами, які не отримали диплом про вищу освіту.

1. Пілотажне дослідження може бути продовжено як на студентах молодших курсів, так і на студентах старших курсів.
2. Підготовку майбутніх учителів до запровадження дистанційних форм навчання у свою професійну діяльність доцільно вести системно та поступово – через використання змішаних форм навчання самих студентів в університетів до активного використання дистанційних форм протягом практики у школі.
3. Результати роботи можуть бути використані для вдосконалення програми курсу "Інформатика" для студентів першого та другого курсу спеціальності 014 – середня освіта (математика; фізика), плануванні впровадження інформаційних технологій в організацію самостійної роботи студентів за іншими дисциплінами в педагогічних університетах, а також для планування заходів щодо впровадження змішаних форм навчання в підготовку учнів загальноосвітніх навчальних закладів.

Незважаючи на наявність низки проблем, і студентами, і учнями, робота в цілому була оцінена учасниками проекту як корисна, що знайшло відображення у навчальних планах фізико-математичного факультету: до цього часу студенти Південноукраїнського педагогічного університету проходили практику у школі з 4 курсу, але виходячи з навчальних планів, з 2018-19 навчального року практика у школі буде уведена з першого курсу. За нашим дослідженням це підвищує мотивацію студентів до вивчення перспективних методик та технологій і реалізує усі переваги дуального навчання (щільної співпраці школи та педагогічних університетів).

#### Список використаної літератури

1. Онищенко О. Лілія Гриневиц: "Від школи, де накачують знаннями, ми переходимо до школи компетентностей" (2017) – [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://dt.ua/EDUCATION/liliya-grinevich-perehodimo-vid-shkoli-v-yakiy-tilki-naprihayut-znannyami-ta-vidtvoryuyut-yih-do-shkoli-kompetentnostey-252819\\_.html](https://dt.ua/EDUCATION/liliya-grinevich-perehodimo-vid-shkoli-v-yakiy-tilki-naprihayut-znannyami-ta-vidtvoryuyut-yih-do-shkoli-kompetentnostey-252819_.html) (09.07.2018).
2. Кубенко І. М. Що таке компетентність і як її розуміють в освіті [Електронний ресурс] / І.М. Кубенко. – Режим доступу: [http://tme.umo.edu.ua/docs/Dod/1\\_2010/kubenko.pdf](http://tme.umo.edu.ua/docs/Dod/1_2010/kubenko.pdf) (09.07.2018).
3. Бібік Н. Переваги і ризики запровадження компетентнісного підходу в шкільній освіті [Електронний ресурс] / Н. Бібік // Гірська школа Українських Карпат. – 2013. – № 8-9. – С. 26-30.
4. Овчарук О. Компетентність як ключ до оновлення змісту освіти [Електронний ресурс] / О. Овчарук. – Режим доступу: <http://osvita.ua/school/method/381/> (09.07.2018).
5. Раков С.А. Об использовании ПК при обучении математике // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики / С.А. Раков, Т.А. Олейник, П.Е. Минко. – Харьков: ХИРЭ, 1993. – С. 37-44.
6. Раков С.А. Программно-методичний комплекс Geometry-A з курсу аналітичної геометрії / С.А. Раков, М.І. Ніколаєвська, Ю.А. Ніколаєвський // Навчальні дослідження на комп'ютері / Навчальний посібник для студентів математичних спеціальностей педагогічних вузів і університетів. – Харків: "РЦНІТ, ЛТД", 1994. – 112 с.
7. Жалдак М.І. Комп'ютер на уроках математики. Посібник для вчителів / М.І. Жалдак. – К. Техніка. 1997. – 304 с.

8. Жалдак Мирослав Іванович [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.zhaldak.npu.edu.ua/naukova-shkola> (09.07.2018).
9. Лапінський В.В. Формування змісту навчання мережних сервісів Інтернет у закладах загальної середньої освіти – сучасне бачення / В.В. Лапінський // Комп'ютер у школі та сім'ї. – 2018. – № 1. – С. 40-46.
10. Навчання в школі + онлайн-навчання = змішане навчання [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.prosvitcenter.org/uk/navchannya-v-shkoli-onlayn-navchannya-zmi/> (03.07.2018).
11. Дуальна освіта [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://mon.gov.ua/ua/osvita/profesijno-tehnicna-osvita/dualna-osvita> (03.07.2018).
12. Lee Dave (North America technology reporter). Microsoft buys Github code-sharing site for \$7.5bn – 4 June 2018 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.bbc.com/news/technology-44351214> (09.07.2018).
13. Навчальні програми для 5-9 класів // Офіційний сайт Міністерства науки і освіти України – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/navchalni-programi/navchalni-programi-5-9-klas> (09.07.2018).

UDK 004

O.O. BRYLOV, K.Y. OSTROVSKAYA, A.I. MIKHALYOV  
National Metallurgical Academy of Ukraine**THE PROBLEMS OF TRANSACTIONS VALIDATION IN THE BLOCKCHAINING AND THE METHODS OF THEIR SOLUTIONS**

*An article contains the overview of blockchain technology, major principals of its programming. Several critical aspects are analyzed: optimal solutions for transaction validation and algorithms of consensus between nodes in blockchain decentralized network. A self-sufficient transaction is implemented, which in itself stores information about the sufficiency of funds at the sender. This allows you to trace the whole life history of each cryptomoney of this payment system: when it appeared, in which transactions participated. The algorithm solves the problem of double spending.*

*Keywords: Blocking, bitcoin, crypto currency, transaction, decentralized programs, software, programming, code, hash, C #, development, technology, network, mining, validation, unspent input, schema, explained, bitcoin, transaction, wallet.*

O.O. БРИЛЬОВ, К.Ю. ОСТРОВСЬКА, О.І. МИХАЛЬОВ  
Національна металургійна академія України**ПРОБЛЕМИ ВАЛІДАЦІЇ ТРАНЗАКЦІЙ В БЛОКЧЕЙН ТА МЕТОДИ ЇХ ВИРІШЕННЯ**

*Дано основи технології блокчейн, принципи її програмної розробки. Проаналізовано основні етапи програмного створення блокчейна, розглянуті відмінності способи реалізації перевірки транзакцій, описаний метод, використаний в біткойнов. Реалізована багаторівнева транзакція, яка в самій собі зберігає інформацію про достатність коштів у відправника. Це дозволяє формувати життєвий цикл кожної кріптомонети даної платіжної системи: коли вона з'явилася, в яких транзакціях брала участь. Алгоритм вирішує проблему подвійного витрачання коштів.*

*Ключові слова: Блокчейн, біткойн, криптовалюта, транзакція, децентралізовані програми, софт, програмування, код, хеш, C #, розробка, технологія, мережа, Майнінг, валідація, unspent input, схема, explained, bitcoin, transaction, wallet.*

A.A. БРИЛЕВ, Е.Ю. ОСТРОВСКАЯ, А.И. МИХАЛЕВ  
Национальная металлургическая академия Украины**ПРОБЛЕМЫ ВАЛИДАЦИИ ТРАНЗАКЦИЙ В БЛОКЧЕЙН И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ**

*Даны основы технологии блокчейн, принципы ее программной разработки. Проанализированы основные этапы программного создания блокчейна, рассмотрены различия способы реализации проверки транзакций, описан метод, использованный в биткойне. Реализована многоуровневая транзакция, которая в самой себе хранит информацию о достаточности средств у отправителя. Это позволяет формировать жизненный цикл каждой криптомонеты данной платежной системы: когда она появилась, в каких транзакциях участвовала. Алгоритм решает проблему двойного расходования средств.*

*Ключевые слова: Блокчейн, биткойн, криптовалюта, транзакция, децентрализованные программы, софт, программирование, код, хэш, C#, разработка, технология, сеть, майнинг, валидация, unspent input, схема, explained, bitcoin, transaction, wallet.*

**Formulation of the problem**

The word "blockchain" attracts significant attention of programmers, investors and, overall, a wider society, people who watch for the innovations in IT industry. The major part of this interest is resulted by fast monetizing of cryptocurrencies, unprecedented appreciation of bitcoin, and, soon later, of the other coins, though is not limited to this only. The consensus among financials already exists that cryptocurrencies are going to take a definite place in the world economy, while experts in programming and engineering are confident that the blockchain is breakthrough technology that can be applied in almost every important area of life and society [1].

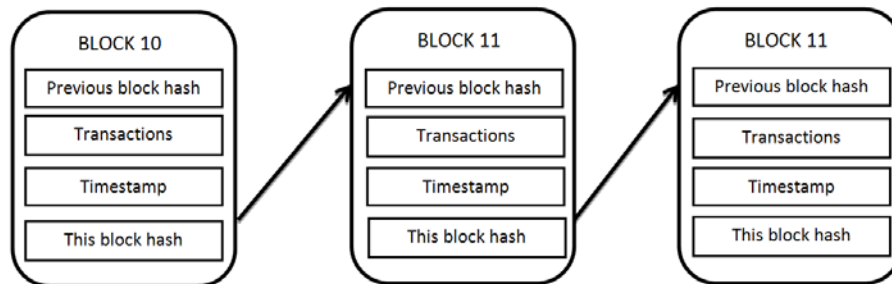
**Presentation of the main research material**

Let me briefly describe the core of blockchain. In general, the blockchain is nothing more than data structure – the list or linked list (in C# terms), that implements the set of definite rules. The block of blockchain is an entity, that stores the data and several other attributes. The data stored inside the block are usually called "transaction" even if this specific project does not connect to finance and cryptocurrency. So, in this article I will use terms transaction, block, blockchain.

In the general case the block consists of transactions (one, two or many – it does not matter and implemented according to the specific task), timestamp and, the most important, the previous block. Obviously, such concept leads to progressive size growth of each next block and, thereafter, its size will exceed soon the limitations of network data exchange. That is why one of the key feature of any blockchain implementation is hashing of data.

Any data, regardless of data type (integers, symbols, strings, objects) can be casted to common format, usually – to string. Moreover, any string of arbitrary length, using crypto-algorithms, can be casted to array of symbols of fixed length (bit string). Such algorithms usually called “hashing”: applying hashing to the input string results an output string of fixed length. Changing of even single character in the input string always results the completely different output string.

Thanks to above method, there is an opportunity to avoid necessity to include an entire previous block into the next one. Instead, hash-code of previous block is included only. This should be noted here, that hash does not allow decryption of input data and it is not designed for. The most important in this concept is the fact, that attempt to change any piece of data of previous block results in the change of its hash, hence the incompatibility with the next block.



Scheme 1 - Block structure and blockchain build

Hash of current block is not included into the block but is a resulting string of its entire content. It is written into the next block. Therefore, any changes made in block 10 lead to the situation when its output hash does not equal any more to the previous hash of block 11. Since the verification of hashes equality is simple and does not require large computing resources, the integrity of the entire blockchain is simple and can be monitored instantly. Thanks to that, blockchain has a high level of security [7].

In general case the programming code of the block creation (constructor) is implemented as following:

```
public Block(int i, Transaction transactionData, string prev = "")
```

```
{
    index = i;
    Data = transactionData;
    timestamp = DateTime.Now;
    PreviousHash = prev;
    Hash = CalculateHash();
}
```

where the most important method – CalculateHash() – may be defined in the way:

```
public string CalculateHash()
```

```
{
    StringBuilder sb = new StringBuilder();
    string toEncrypt = index.ToString() + PreviousHash + timestamp.ToString() + Data.ToString() +
nonce;
    using (SHA256 hash = SHA256Managed.Create())
    {
        Encoding enc = Encoding.UTF8;
        Byte[] result = hash.ComputeHash(enc.GetBytes(toEncrypt));
        foreach(Byte b in result)
        {
            sb.Append(b.ToString("x2"));
        }
    }
    return sb.ToString();
}
```

The second most important principal of the majority of blockchain projects is decentralization of data storage. Naturally for human, when one needs to protect something valuable, he tries to hide it the most secured place and lock it behind as many lockers as possible. But, in case intruder succeeds to break the protection, there is nothing more to prevent him of destruction or changing the data. Even more, in some circumstances the fact of

storage penetration is not always obvious. The blockchain projects implement the opposite approach. The copies of data are stored at multiple separate nodes. Data changes in the one of the node do not automatically lead to data changes in the others. Vice versa, as soon as the discrepancy is identified, the node, that has been changed (or hacked), restores the original data by synchronizing with the peers. The probability of simultaneous and synchronized intervention into the multiple nodes is significantly lower and, is becoming even lower as the number of network participants is growing [2].

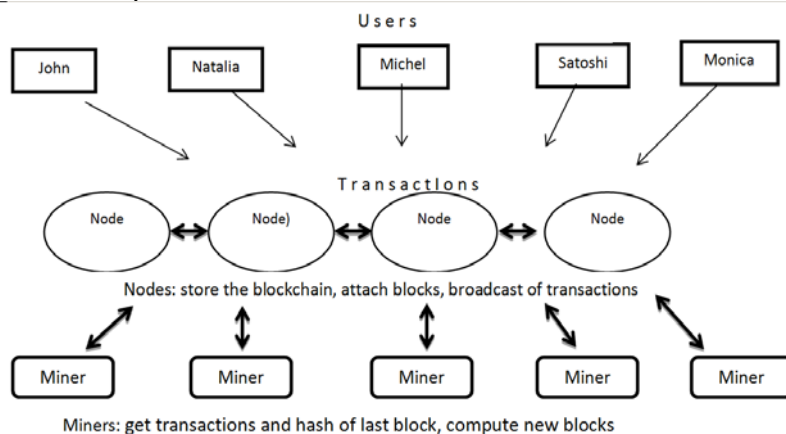
There are several other principals used in the majority of blockchain projects: proof-of-work – applying a deterministic requirements to the hash of block (for example, it must start with several zeros), proof-of-stake and other methods of confirming of the data transaction contains, smart-contracts, but most of such principals are not necessary and may have different implementation according to specific project needs.

In order to describe the most basic issues blockchain-programmer has to solve, it is worth to give a brief overview of the structure of decentralized network which will use this project: who are participants, what are their roles and functions.

In common practice there are three types of participants: nodes, miners, users.

Nodes store data and permanently broadcast them across the network. Users make transactions. Miners create blocks. The last type called “miners” because the majority of blockchain projects implement proof-of-work principal, which designed to prevent uncontrolled block emission. The difficult mathematic problem requiring substantial computer power must be solved in order to create new block. But in general sense, the miners are nothing more than nodes, that serve the blockchain [7].

Users make transactions (not necessarily in financial meaning. It might be contracts, file creation, voting, so on). Nodes receive transactions and broadcast them. Miners collect transactions and create blocks that include transactions and pass them to the nearest nodes. The node gets new block, verifies it, attaches it to blockchain and broadcasts updated blockchain to peer-nodes.



Scheme 2 - General map of interaction of network participants

Obviously, the idea does not look complicated as well as its programming implementation. But the software developer who works on such project, faces several issues right at the beginning. These issues might have a variety of possible solutions and, the purpose of this article is to review such solutions. Though, as I mentioned above the blockchain technology is not limited to cryptocurrencies only, but has a variety of applications, in the examples below I will use cryptomoney examples and terminology because it allows to describe the issues easier and more clearly. Therefore my examples are based on the possible implementation of blockchain for finance transactions purpose.

The first problem is related to methods and algorithms of validation of transactions. For example, user John wants to send to user Natalia 10 cryptocurrencies. Using some user interface he prepares and completes the transaction. The nearest functioning node receives this transaction. Evidently, such node needs to validate this transaction before broadcasting. In the opposite case, future blocks might include incorrect transactions so the miners computing power is wasted.

The very basic transaction includes five properties: sender address, receiver address, amount and timestamp. In order to make a validation easier, we also include the property TransactionHash, which represents the hash of other properties.

```
public class Transaction
{
    public string Sender { get; set; }
    public string Recipient { get; set; }
    public decimal Amount { get; set; }
    public DateTime Timestamp { get; set; }
}
```

```

    public string TransactionHash { get; set; }
}

```

Thus the validation of transaction consists of answering three questions: does receiver exist, does sender have sufficient funds, and, is current transaction unique (does not exist among completed transactions).

In order to work out the algorithm, we need to decide first where and how users data are stored (accounts usually represent the string of bit of fixed length), and, completed transactions data. While developing a blockchain project, I tested two possible approaches:

1. Some nodes play a role of “bookkeeper”: contain the list of registered accounts and, separately, list of completed and verified transactions. Obviously, such nodes are also instantly synchronized between each other.
2. User’s accounts included in the blockchain. Every block has an entire list of registered accounts.

The benefits of first variant are the following: blockchain is less loaded with the data, every block is smaller, and, actually, the transaction validation is simple, programming code is shorter. But there are some disadvantages as well: additional objects are created, and we need to work on synchronization, security of such objects and, potentially, the network becomes less decentralized.

The second variant is more elegant but demands more complicated validation methods and leads to increase of block size.

So the validation of transaction starts with verification of existence of receiver. In case registered accounts are stored in separate list, such list must be iterated while match is not found. If user’s data stored in the blockchain, the node must iterate an entire blockchain while match is not found.

```

bool IsValidAddresses(Transaction someTransaction, List<Account> ListOfAllAccounts)
{
    if (someTransaction.Sender == someTransaction.Recipient) return false;
    bool isValidSender = false;
    bool isValidRecipient = false;
    foreach(Account account in ListOfAllAccounts)
    {
        if (someTransaction.Sender == account.Address) isValidSender = true;
        if (someTransaction.Recipient == account.Address) isValidRecipient = true;
    }
    if (isValidRecipient && isValidSender) return true;
    else return false;
}

```

The verification of funds sufficiency is more interesting task. In traditional banking service, banks always store the balance of each account: amount of funds available for spending. So in order to complete a fraudulent transaction (spend an amount exceeding the available funds), one number only must be changed. Such a threat contradicts to principals of blockchain. In order to make validation more reliable, we might get amounts of every incoming and outgoing transactions related to specific user. The positive difference between sum of first and latter is the criterion of correct transaction. Such approach requires the iteration of the entire array of past transactions, whether they are stored in the separate list or included in the blocks.

```

public bool IsValidTransaction(Transaction someTransaction, Hashtable transactions, List<Account>
ListOfAllAccounts)

```

```

{
    if (!IsValidAddresses(someTransaction, ListOfAllAccounts)) return false;
    decimal amountReceived = 0;
    foreach(Transaction instance in TransactionsAsRecipient(someTransaction, transactions))
    {
        amountReceived += instance.Amount;
    }
    decimal amountSent = 0;
    foreach (Transaction instance in TransactionsAsSender(someTransaction, transactions))
    {
        amountSent += instance.Amount;
    }
    return ((amountReceived - amountSent - someTransaction.Amount) >= 0);
}

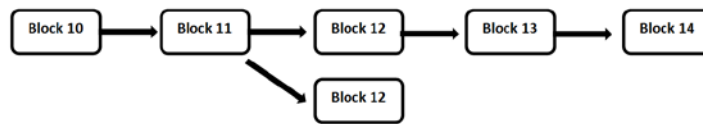
```

Bitcoin project implements another interesting and elegant method of validation. It implements so-called self-sufficient transaction architecture, the transaction that contains all data required for funds verification. In such concept the transaction might have a link to several incoming and outgoing transactions. The amount of outgoing must not exceed the amount of incoming. When user John has 100 coins and sends to Natalia 10 coins, the interface

automatically generates an extra transaction: John sends the remaining 90 coins to himself. When John decides to make next transaction, the 90-coins-transaction from previous one appears as incoming transaction [6].

The only drawback of such approach is the complexity of transaction, as well as the fact that it requires additional applications on user side, which will automatically create transactions to self. But overall, this is an excellent example of object oriented approach when object itself is self-sufficient.

Another problem, that I want to review in this article, are methods and algorithms of consensus between nodes regarding to which variant of blockchain to consider as correct one [5]. Any network communication works with some delay of data transfer. Data arrive to every participant assynchronously, not at the same moment of time. Closer node might get updated data sooner than the remote node. Let’s imagine, that two miners, connected to different nodes, started to work on new block simultaneously. By some reason, first miner (let’s call him “Miner A”) has finished the job and passed the newly created block to his nearest node (“Node A”), and, started to compute the next block. The node, who has got the block, attached it to blockchain and started to broadcast updated blockchain across network. A few milliseconds later, second miner (“Miner B”) finished his job as well and passed it to his nearest node (“Node B”). This has happened just one millisecond, but still before Node B receives an updated version of blockchain from Node A. So, Node B also attaches new block (created by Miner B) to his, old version of blockchain and started broadcasting it as well. One of rules of blockchain is “The longer chain prevails”, that means that nodes must consider the longest blockchain version (the blockchain containing the greatest number of blocks) as correct. But in our case the versions at Node A and B are still having same length though the last block is different. Such example is called “blockchain conflict”. When (or if) Miner A creates new block, Node A attaches it and starts broadcasting before Node B gets next block from Miner B, Node B has to accept the most recent version of blockchain broadcasted by Node A, as correct. Now on, the blockchain is same at both nodes and conflict has resolved. But Miner B keeps working on his second block though it will not be valid anymore because its previous hash is not equal to hash of most recent block of blockchain. So resources of Miner B has been wasted, wasted not only for last block, but for previous one as well.



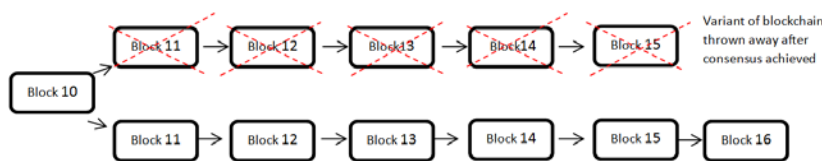
Scheme 3 - Short blockchain conflict

This problem has two sides: first – the definition of optimal algorithm of consensus, second – optimizing of usage of computing resources [4].

If the network is small, number of participants and transaction frequency is expected to remain limited, then the very simple algorithm can be implemented. The block creation shall be engineered in a such way so the average block creation time is substantially longer than the time required for every node of network to receive an update of latest blockchain version. Then we can define the frequency the nodes to synchronize: each node gets blockchain version from every other node. The node can then check the length of each version and save the longest one.

An extra criterion applied in case of existence of several versions with the same length: for example, timestamp of last block. But, this approach does not satisfy the requirements of scalability and it can’t be implemented if data transfer time between remote nodes exceeds new block creation time.

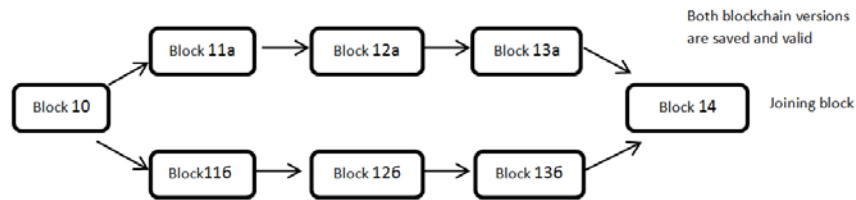
The full synchronizing between nodes might take much longer time the speed of blockchain updating in separate nodes in the larger projects, that designed to serve the nodes located very far from each other. In such case, we might face a scenario when alternative versions of blockchain might appear and keep living for long time inside the remote segments of the network. Such event called "soft-fork". As shown in the above example, that means the large amount of blocks have to be wasted when finally the consensus is achieved. Therefore, many transactions that have been included already in that thrown away blocks, become unconfirmed again and must be re-worked into new blocks. The partial solution (or at least some optimizing) is to include additional property into the block structure: number of confirmation, i.e. the number of nodes that have accepted this block as valid and have added it to blockchain. This reduces the accumulation of conflicts: consensus between the nodes to be found much earlier than the length of some node’s version becomes bigger. Finally, it implements the "50%+1" principal: if large soft-fork has happened the network finally accepts the blockchain variant that collects more than 50% of confirmations [6].



Scheme 4 - Extended conflict – soft-fork



But the sad issue of multiple wasted blocks still remains. I can see two ideas for future research and testing. The first is, let say, "planned soft-fork". Transactions are to be pre-definitely distributed between miners for further computing. Miners create blocks that are attached by the nodes to its blockchain versions. Soft-forks are allowed for some determined length, for example, 10 blocks. When several versions have achieved this length, the computing of new blocks has to be stopped until one special joining block is created. Such special block must include hash of hashes of all blockchain versions and pointers to the latest blocks of both.



Scheme 5 - Planned soft-fork

The second idea is to build the proof-of-work algorithm in a such way so the mathematical problem that has to be solved to create the new block can be divided into parts and those parts to be distributed between miners. It can be possible to find an algorithm, that allows to pre-compute the block independently on the transactions to be recorded in. This makes possible to use the computing job done once to be applied to any future block.

Both ideas are not yet implemented and require future analysis and discussion as well as deep testing to determine the complexity, resources required and fault tolerance. At high extent, this definition is valid for the entire blockchain technology, because, despite hundreds and thousands of projects already launched, technology is still on the stage of its birth. Evidently, the potential is great, the sphere of application is very wide [3]. Therefore, I believe that development and further research of blockchain is an excellent area of study and work for at least one entire generation of software engineers.

#### References

1. Tapscott Don, Tapscott Alex. Blockchain revolution. New York, 2016.
2. Antonopoulos Andreas M. Mastering Bitcoin. Programming the open blockchain. New York, 2017.
3. Vigna Paul, Casey Michael J. The Age of Cryptocurrency: How Bitcoin and the Blockchain Are Challenging the Global Economic Order. New York, 2016.
4. Wattenhover Roger. The Science of the Blockchain. New York, 2016.
5. Pease Marshall, Shostak Robert. The Byzantine Generals Problem. ACM Transactions on Programming Languages and Systems. 1982.
6. Satoshi Nakamoto. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. Bitcoin whitepaper at <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
7. Dorier Nicolas. Blockchain Programming in C#. [https:// programmingblockchain. gitbooks.io/](https://programmingblockchain.gitbooks.io/)

УДК 004.738.52

О.С. ВОЛКОВСКИЙ, Е.Р. КОВЫЛИН  
Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

### КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАЦИИ ТЕКСТОВ

*Рассмотрена структура интеллектуальной запросно-ответной системы для получения семантически связанных ответов, генерируемых на основе научно-технических корпусов документов. Проведен анализ существующих подходов к построению программных моделей текста. Создан алгоритм автоматического построения семантической сети текста на естественном языке, разработанный в рамках задачи реализации интеллектуальной запросно-ответной системы. Описан процесс составления опорных меток для текстов, характеризующих семантические связи для текста. На основе полученного алгоритма была создана прикладная программная система построения графа смысловых связей научно-технического текста для языков славянской группы. Реализованная программная система построения программных семантических моделей текста использована в качестве основы для построения интеллектуальной запросно-ответной системы поиска в текстовом корпусе документов. Проведено тестирование созданной системы на основе составленного тематического текстового корпуса документов. Результатом работы созданной системы является текстовый ответ, семантически связанный с поступившим в систему запросом. Несмотря на отсутствие предварительной семантической разметки текстов в корпусе, полученный тестовый ответ от системы содержит в себе предложения исходного текста, имеющих именно семантическую, а не частотную связь с исходным запросом. Это говорит о адекватности описанного алгоритма и возможностях использования созданной программной модели текста в качестве основы для решения прикладных интеллектуальных задач компьютерной лингвистики и задач семантического поиска текста. Научная ценность созданного подхода заключается в отсутствии необходимости предварительной семантической разметки документа перед его анализом и обработкой программной лингвистической системой для решения интеллектуальных задач анализу и генерирования текстов на естественном языке.*

*Ключевые слова: семантический поиск, семантическая сеть, генерация текста, запросно-ответная система*

О.С. ВОЛКОВСЬКИЙ, Є.Р. КОВИЛИН  
Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара

### КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ІНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СЕМАНТИЧНОГО ПОШУКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕКСТІВ

*Розглянуто структуру інтелектуальної системи запит-відповідь для отримання семантично зв'язаних відповідей, генерованих на основі науково-технічних корпусів документів. Проведено аналіз існуючих підходів до побудови програмних моделей тексту. Створено алгоритм автоматичної побудови семантичної мережі тексту на природній мові, розроблений в рамках завдання реалізації інтелектуальної системи запит-відповідь. Описано процес складання опорних міток для текстів, які характеризують семантичні зв'язки для тексту. На основі отриманого алгоритму була створена прикладна програмна система побудови графа смислових зв'язків науково-технічного тексту для мов слов'янської групи. Реалізована програмна система побудови програмних семантичних моделей тексту використана як основа для побудови інтелектуальної запитання-відповідь системи пошуку в текстовому корпусі документів. Проведено тестування створеної системи на основі складеного тематичного текстового корпусу документів. Результатом роботи створеної системи є текстова відповідь, семантично пов'язана з вхідним в систему запитом. Незважаючи на відсутність попередньої семантичної розмітки текстів в корпусі, отримана тестова відповідь від системи містить у собі речення вхідного тексту, що мають саме семантичний, а не частотний зв'язок з вхідним запитом. Це говорить про адекватність описаного алгоритму і можливості використання створеної програмної моделі тексту в якості основи задля вирішення прикладних інтелектуальних завдань комп'ютерної лінгвістики і завдань семантичного пошуку тексту. Наукова цінність створеного підходу полягає у відсутності необхідності попередньої семантичної розмітки документа перед його аналізом і обробкою програмною лінгвістичною системою для вирішення інтелектуальних завдань аналізу і генерування текстів на природній мові.*

*Ключові слова: семантичний пошук, семантична мережа, генерація тексту, система запит-відповідь.*

O.S. VOLKOVSKY, E.R. KOVYLIN  
Oles Honchar Dnipro National University

### COMPUTER SYSTEM OF INTELLECTUAL SEMANTIC SEARCH WITH THE TEXT GENERATION USING

*The structure of the question-answer intellectual system for obtaining semantically connected answers which generated on the basis of scientific and technical corpus of documents is considered. The analysis of existing approaches to the construction of program models of the text is carried out. An algorithm for the automatic construction of a semantic net of text in a natural language was developed for the task of implementing an intelligent request-response system. The process of compiling reference marks for texts characterizing semantic links for a text is described. On the basis of the obtained algorithm was created an applied software system for constructing a graph of the semantic links of the scientific and technical text for the languages of the Slavic group. The implemented software system for constructing software semantic text models was used as a basis for constructing an intelligent query-response search system in a text-based document body. The testing of the created system based on the compiled thematic text corpus of documents is carried out. The result of the work of the created system is a text response, that semantically related to the request entered into the system. Despite the absence of preliminary semantic markup of the texts in the case, the received test response from the system contains the source code proposals that do not have a frequency connection with the original query. This indicates the adequacy of the described algorithm and the possibilities of using the created software text model as a basis for solving applied intellectual problems of computer linguistics and the tasks of semantic search for text. The scientific value of the created approach is the absence of the need for preliminary semantic markup of the document before its analysis and processing by the software linguistic system for the solution of intellectual problems of analysis and the generation of texts in the natural language.*

*Keywords: semantic search, semantic network, text generation, request-response system.*

#### Постановка проблемы

Проблема оптимального пути поиска информации является одной из ключевых в области компьютерной науки. Процесс разработки большинства программных продуктов рано или поздно приводит к реализации механизмов добавления, сохранения и получения информации для ее последующей обработки. Главным решением этой задачи становятся разнообразные системы баз данных, прекрасно справляющиеся с этими задачами на программном уровне. Однако, если в функционале системы присутствует необходимость работать непосредственно с пользовательским запросом, зачастую состоящего из нескольких критериев, то обработка полученных результатов, полностью ложится на плечи пользователя. Речь идет о подходе, использованном во многих популярных web-поисковых системах: ответом на полученный запрос является множество ранжированных гипертекстовых документов (web-страниц), предполагающее последующий самостоятельный анализ пользователя каждого документа. Главным минусом такого подхода является отсутствие глубокого семантического анализа содержимого документа, из-за чего в полученном массиве документов содержится большое количество несвязанной с запросом пользователя информации, а также множество повторений одинаковой информации, поданной в разных интерпретациях. Решением этих проблем являются семантические поисковые системы, ориентирующиеся во время своей работы на смысловые связи в документах. Однако, создание таких систем подразумевает решение многих научных проблем искусственного интеллекта и компьютерной лингвистики, главной из которых является необходимость ручного описания семантических онтологий между всеми элементами языка и между всеми документами в системе.

Текущий подход поиска информации в множестве документов предлагает решение задачи ранжирования относительно пользовательского запроса. Именно этот принцип (минусы которого описаны выше) положен в основу многих популярных web-поисковых систем. Альтернативным подходом решения поисковой задачи является получение семантически значимого текста относительно пользовательского запроса. Главной проблемой рассмотренных подходов к созданию семантических систем является частичное решение первоначальной поисковой задачи. Говоря о системах, использующих классификацию текстовых объектов и связей между ними, стоит отметить что включение лексико-семантического словаря соответствий требует его предварительного ручного заполнения для рабочей предметной области текстов. Это не только ограничивает использование системы, но и является весьма сложной массовой задачей. Системы без семантического компонента избегают этих проблем, при этом, как видно из функционала [2], решая менее сложные интеллектуальные задачи. В нашем случае, поисковая задача сводится к созданию запросно-ответной системы генерации текстов на основе базы знаний корпуса текста, поскольку в ответ на поступивший запрос пользователя будет создан новый текст – сам ответ. Такой класс задач относится к сложным, поскольку разработка систем семантической генерации текстов требует глубокого семантического анализа структуры документа. На прикладном уровне это подразумевает создание

некоторой программной модели семантической структуры текста. Анализ, проведенный в [3], позволяет утверждать о целесообразности использования семантических сетей в связке с интеллектуальным обработчиком данных, что, однако, влечет за собой ряд фундаментальных для автоматической обработки текстов проблем. Речь идет как о отсутствии четких алгоритмов к автоматизированному созданию семантической сетей – большинство подходов опираются на массивные базы знаний, создание и обработка которых требует больших ресурсов, так и о сложностях программной обработки естественного языка – системы, обладающей непостоянностью и неоднородностью собственных правил, из-за чего усложняется математическое и алгоритмическое описание его компонент. Особенно это касается группы славянских языков, обладающих свойством высокой флексии, что существенно усложняет их программное структурирование. Поэтому, при построении программной модели системы, в первую очередь, важно учитывать степень ее адаптивности, выраженную в нашем случае как независимость от языковых правил и конструкций.

В этой работе описана и реализована, в виде прикладного программного продукта, система семантического поиска, позволяющая автоматически формировать программную семантическую модель как отдельного документа, так и всего корпуса документов в целом.

#### **Анализ последних исследований и публикаций**

Алгоритм создания семантических поисковых систем не имеет четко сформированного подхода к своей реализации. Это повлекло за собой возникновение достаточно большого количества теоретических разработок, касающихся вопроса семантического поиска. Однако, когда речь заходит о создании программных продуктов, многие из подобных разработок наталкиваются на ограничения, накладываемые современными возможностями ЭВМ. Поэтому, для наших целей в первую очередь наиболее интересны алгоритмы, положенные в основы реализованных прикладных программных разработок. Проанализировав множество существующих прикладных программных продуктов возможно выделить два класса систем: работающих на основе лексико-семантического словаря отношений и работающих на основе статистического анализа текстов.

Типичным представителем первого класса является система [1]. Семантический анализ заключается в выявлении взаимосвязей между объектами (персоналиями, организациями, событиями) и классификации отношений между ними, а также отождествлении объектов с заранее заданными семантическими классами. Для этого семантический анализатор в тексте выявляет связи между описанными в нем событиями и предметами. Совокупность имен всех предметов и событий с их взаимосвязями образует семантическую сеть. Показателем наличия некой связи между предметами является описание их участия в одном событии (в любых ролях), а показателем наличия связи между предметом и событием – описание участия предмета в данном событии (в любой роли). Семантическим связям можно задать веса. Элементы семантической сети характеризуются следующими параметрами: *SemanticType* – семантический класс объекта (*date*, *event* (сделка), *person* и т.д.); *RelationName* – тип синтактико-семантической связи (аргумент, принадлежность, обстоятельство и т.д.); *RelationRole* – семантическая роль (субъект, объект, инструмент). Система позволяет получить главные темы текста, связи между темами, тематический реферат (информативные фрагменты текста, в которых упоминалась данная тема).

Примером системы статического анализа текстов является система [2]. В схеме ее работы отсутствует семантический компонент и поиск основан на лексико-статистическом анализе текстов. Для поступившего запроса составляется "информационный портрет" – набор упорядоченных по значимости ключевых слов и словосочетаний, характерных именно для данной выборки текстов. По набору ключевых слов пользователь может самостоятельно определить темы, которые могут быть выданы в ответ на его запрос, и тем самым уточнить нужную ему тематику. Под значимыми ключевыми словами понимается контекст запроса относительно контекста всей базы, то есть происходит отбор слов, характеризующих отличие конкретной выборки от всех остальных данных в базе. Формула вычисления значимости слов представляет собой отношение частот встречаемости данного слова (словосочетания) в конкретной выборке и во всей базе. Составленный информационный портрет может использоваться для ранжирования найденных документов (по наличию ключевых слов с большей значимостью) и для автоматической рубрикации.

#### **Цель исследования**

В работе перед нами стоит несколько задач. В первую очередь, необходима разработка адаптивного алгоритма построения семантической сети, требующего минимальный и конечный набор знаний для своей корректной работы. Следующим шагом является разработка методики снятия семантических характеристик сети как с отдельного документа, так и с корпуса текстов для последующей обработки. Последним этапом является генерация текста - формирование семантически связанного ответа относительно поступившего пользовательского запроса.

#### **Изложение основного материала исследования**

Первым этапом в процессе разработки семантической поисковой системы становится построение программной модели текста – семантической сети (рис. 1).



Рис. 1. Общая структура автоматического построение программной семантической сети документа.

Первым этапом, который зачастую реализуется в большинстве систем автоматической обработки текстов, является синтаксический анализ. На этом этапе происходит выделение предложений и слов анализируемого текста. Кроме того, происходит сокращение рабочего множества слов благодаря стеммингу и очистки текста от служебных частей речи. Для этого над каждой парой слов происходит отсечение окончаний по алгоритму Портера, после чего рассчитывается расстояние Левенштейна для полученных результатов. Если его значение больше или равно длины наибольшей общей части рассматриваемых слов, то считается, что стемма была найдена и каждое слово заменяется на найденную общую часть. Следующим шагом синтаксического анализа становится определение частей речи стемм для извлечения неинформативных слов (такие как служебные части речи) в рамках упрощения процесса семантического анализа. Для этого в систему была включена размеченная выборка размером в пятнадцать тысяч слов и соответствующим им частям речи, которая служит учебным корпусом для наивного Байесовского классификатора, где классами являются части речи, а соответствующими для класса значениями - две и три последние буквы исходного слова и окончания, полученное по алгоритму Портера. Каждое слово из анализируемого текста проходит классификацию на обученной модели. Если прогноз указывает на неинформативную часть языка - слово удаляется. Заключительным этапом синтаксического анализа становится взвешивания стемм, в результате чего каждой стемме соответствует количество ее повторений в тексте и взвешивание предложений, где под весом предложения подразумевается суммарный вес всех стемм в нем.

Размеченный таким образом текст должен пройти этап частотного анализа, в результате которого текстовым данным будут соответствовать некоторые числовые характеристики. Для этого предлагается составить матрицу, строки которой соответствуют предложением, столбцы - стеммам, а значения формируются как число вхождений стемы в предложение. Над полученной таким образом матрицей выполняется операция сингулярного разложения. Поскольку сингулярное разложение является устойчивым, становится возможно убрать значения левой и правой матрицы, соответствующие низким сингулярным значениям, оставив только два наибольших, после чего использовать их как координаты для отображения на двухмерную плоскость. Полученные результаты представлены на рис.2. и на рис.3.

После получения частотной числовой картины текста, необходимо привести полученные данные к некоторой семантической картине, на основе которой возможна генерация семантической сети. Для этого, над полученными данными проводится операция кластеризации по алгоритму *k-means*, где количество точек-кластеров определяется по формуле (1), в которой  $count(W)$  – общее количество слов,  $(W_U)$ – общее количество уникальных стемм.

$$cl(W, W_U) = \frac{count(W)}{count(W_U)} . \tag{1}$$

Значения центроидов кластеров-стемм рассчитываются по формуле (2), где  $W_0...W_{cl}$  – частотные веса стемм:

$$Cst(W_U) = \max(W_0...W_{cl}) . \tag{2}$$

Значения центроидов предложений рассчитываются по формуле (3), где  $WS$  – анализируемое предложение,  $W_i$  – вес стеммы в предложении,  $SN$  – количество стемм в предложении:

$$Cs(W_S) = \max \left( \sum_{i=0}^{SN} W_i \right) \tag{3}$$

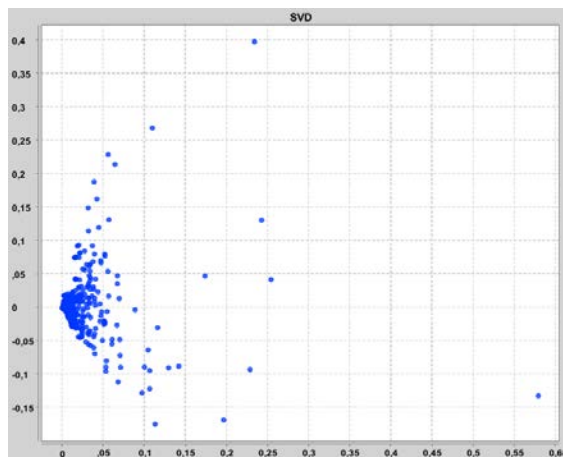


Рис. 2. Проекция частот стемм.

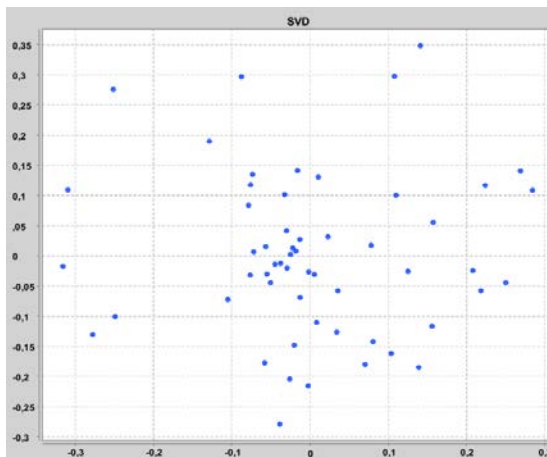


Рис.3. Проекция частот предложений.

Для каждого кластера – стеммы определяется его вес – количество содержащихся в нем точек, на основе которого формируется каркас будущей семантической сети: кластеры-стеммы связываются между собой в порядке увеличения их веса. Результаты кластеризации изображены на рис. 4 и рис. 5.

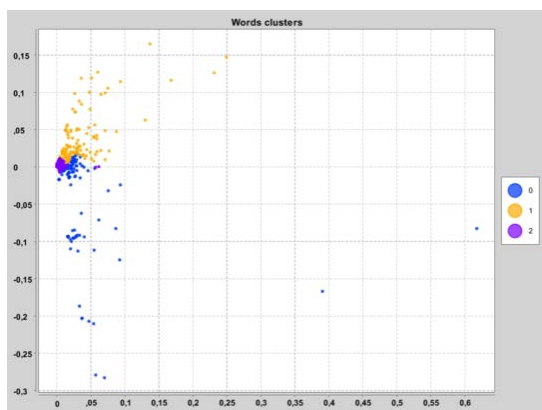


Рис. 4. Кластеры частот стемм

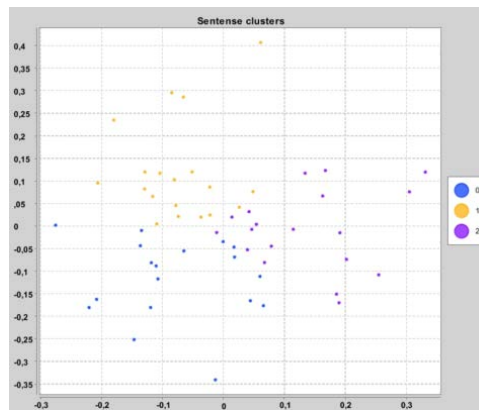


Рис.5. Кластеры частот предложений

Над значениями каждого кластера-стеммы и кластера-предложения выполняется построение контура выпуклой фигуры по алгоритму Джарвиса. Если контур фигуры-предложения пересекается с контуром фигуры-стеммы, то между ними устанавливается связь, семантический вес которой равен количеству точек, содержащихся в площади пересечения. В результате мы получаем структуру семантической сети, изображенную на рис. 6.

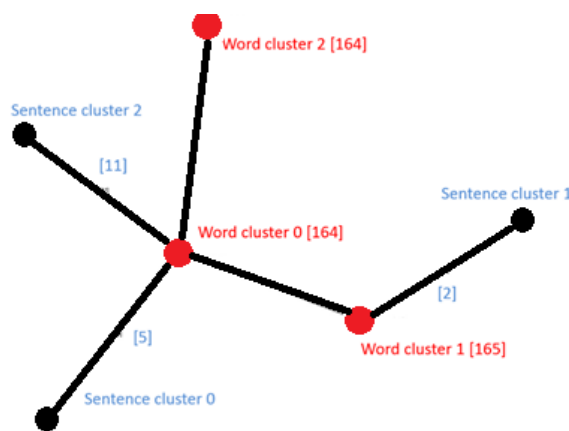


Рис. 6. Семантическая сеть документа.

Множества кластеров-стемм формируют семантические метки документа, по которым, и будет генерироваться результирующий ответ. При поступлении пользовательского поискового запроса в систему, над каждым кластером-сетеммой производится проверка вхождения его элементов в пользовательский запрос. Если для текущего кластера стеммы такое вхождение найдено, то кластер-предложений, связанный с данным кластером стеммой становится кандидатом для включения в результирующий ответ. Если таких связанных кластеров несколько, то в множество кандидатов попадает кластер с максимальным весом связи. Помимо самого текста предложения, в кластере содержатся данные о номере предложения и его весе относительно обрабатываемого документа. Такая операция проводится над каждым документом в корпусе, в результате чего мы получаем множество предложений кандидатов для включения в ответ. Для их нормализации вес каждого кандидата делится на величину количества слов из его исходного текста. В результирующий ответ попадают кандидаты с максимальным нормализованным весом, отсортированные по их изначальному номеру следования в тексте. Если же номера следования предложений совпадают, то сортировка происходит по весу. Размер результирующего ответа определяется как отношение общего количества слов в корпусе к общему количеству предложений. Результат работы системы для поступившего запроса со словом "класс" и корпусом общим размером в сто текстов на такие тематики как программирование, астрономия, экономика, социология. можно увидеть в табл. 1.

Таблица 1

## Автоматически сгенерированный ответ семантической поисковой системы на запрос "класс"

При проектировании классов, разработка интерфейса тождественна разработке спецификации (множества методов, который каждый класс, использующий интерфейс должен реализовывать). Интерфейсы, наряду с абстрактными классами и протоколами, устанавливают взаимные обязательства между элементами программной системы, что является фундаментом концепции программирования по контракту (англ. design by contract (DbC)). Аппаратно-зависимые подзадачи могут быть строго отделены от других подзадач, что улучшает мобильность создаваемых программ. Модуль — функционально законченный фрагмент программы. Некоторые языки предусматривают объединение модулей в пакеты. Принцип модульности является средством упрощения задачи проектирования ПС и распределения процесса разработки ПС между группами разработчиков. В описании интерфейса определяются имена и сигнатуры входящих в него методов, то есть процедур или функций класса. Использование интерфейсов возможно двумя способами: класс может реализовывать интерфейс. Одним из методов написания модульных программ является объектно-ориентированное программирование. То есть, если класс реализует интерфейс, для любого экземпляра этого класса существуют и могут быть вызваны все описанные в интерфейсе методы. Конкретное яблоко — это в целом некоторое яблоко, вообще яблоко, а любое вообще яблоко — фрукт. Именно поэтому примеры классов в учебных пособиях по объектно-ориентированному программированию так часто упоминают яблоки и груши. В объектно-ориентированной программе с применением классов каждый объект является "экземпляром" некоторого конкретного класса, и других объектов не предусмотрено. Один класс может реализовать несколько интерфейсов одновременно. Возможно объявление переменных и параметров методов как имеющих тип "интерфейс". Статические поля существуют в одном экземпляре на всю программу (или, в более сложном варианте, — в одном экземпляре на процесс или на поток/нить). Обычные поля создаются по одной копии для каждого конкретного объекта — экземпляра класса. Это позволяет писать обобщённые алгоритмы обработки данных, использующие в качестве типов параметры интерфейсов, и применять их к объектам различных типов, всякий раз получая требуемый результат. Например, интерфейс "Cloneable" может описать абстракцию клонирования (создания точных копий) объектов, специфицировав метод "Clone", который должен выполнять копирование содержимого объекта в другой объект того же типа. Например: "модуль должен быть простым, замкнутым (независимым), обзорным (от 50 до 100 строк), реализующим только одну функцию задачи, имеющим одну входную и одну выходную точку". Первым основные свойства программного модуля более-менее чётко сформулировал Д. Парнас (David Parnas) в 1972 году. Тогда любой класс, объекты которого может понадобиться копировать, должен реализовать интерфейс Cloneable и предоставить метод Clone, а в любом месте программы, где требуется клонирование объектов, для этой цели у объекта вызывается метод Clone. В предельном случае модуль может использоваться даже для заключения в него всего лишь одной процедуры, если необходимо, чтобы выполняемое ею локальное действие было гарантировано независимым от влияния других частей программы при любых изменениях. Впервые специализированная синтаксическая конструкция модуля была предложена Н. Виртом в 1975 г. Сами алгоритмы, то есть действительный программный код, который будет выполнять все эти вычисления, интерфейсом не задаётся, программируется отдельно и называется реализацией интерфейса. Программные интерфейсы, а также классы, могут расширяться путём наследования, которое является одним из важных средств повторного использования готового кода в ООП. Наследованный класс или интерфейс будет содержать в себе всё, что указано для всех его родительских классов (в зависимости от языка программирования и платформы, их может быть от нуля до бесконечности). В них так же, как и в пакетах Ады, явным образом выделяется некоторая "видимая" интерфейсная часть, в которой сконцентрированы описания глобальных типов, констант, переменных, а также приводятся заголовки процедур и функций. В то же время, наследуя класс, мы автоматически наследуем готовый код под интерфейс (это не всегда так, родительский класс может требовать реализации каких-то алгоритмов в дочернем классе в обязательном порядке). Появление объектов в интерфейсной части делает их доступными для других модулей и основной программы. В одном классе просто запрещается реализовывать несколько интерфейсов, имеющих методы с

одинаковыми сигнатурами. Важная особенность модулей заключается в том, что компилятор размещает их программный код в отдельном сегменте памяти. Слова "приватный" и "публичный" в данном случае являются так называемыми "модификаторами доступа". Это хорошо подходит для случаев, когда одноименные методы разных интерфейсов идентичны по предполагаемой функциональности, но может вызвать нежелательные эффекты, если поведение этих методов должно различаться. Существует основное правило: ничто в одном классе не может видеть приватных элементов другого класса. Наследование по типу private делает все члены родительского класса (в том числе public и protected) private-членами класса-наследника (C++); protected (защищенный, внутренний член иерархии классов) — обращения к члену допускаются из методов того класса, в котором этот член определен, а также из любых методов его классов-наследников

В результате, в финальную выборку попали три текста на тему программирования. Наиболее интересным свойством полученного результата является то, что в ответе присутствуют предложения, которые не содержат в себе слово класс или его производных, однако, при этом семантически связаны с понятием класса и объектно-ориентированного программирования. Это и информация о модульности программ, пример с яблоками и грушами, описывающий понятие класса и понятия интерфейса, Частотной связи этих предложений с запросом нет, и без соответствующего семантического контекста довольно сложно понять, в рамках какой концепции используются эти понятия. Однако разработанный подход позволяет формировать семантически связанные с запросом ответы с минимальными затратами на формирование входящих данных в систему, без необходимости предварительной разметки документов в корпусе, без привязки системы к некоторому предметному корпусу текстов. Помимо запросно-ответных поисковых систем, созданная модель была успешно применена так же и для выявления семантически слабых предложений в тексте промышленной инструкции [4], и автоматическому определению связности текста [5].

#### Выводы

Была сформулирована и реализована модель построения семантической сети текстового документа, не требующая предварительного заполнения эталонной базы знаний и независимая от отрасли своего применения. На основе данных, полученных из семантической сети, разработан подход к генерации текстового ответа в поисковой запросно-ответной семантической системе и реализована соответствующая прикладная программная система на языке Java. Полученные в процессе тестирования результаты показывают, что система формирует корректный ответ на поступивший запрос, включая в него предложения, не только частотно связанные с запросом, а и предложения имеющие исключительно семантическую или контекстную связь, что подтверждает семантические свойства разработанной прикладной системы.

#### Список использованной литературы

1. Использование семантических категорий в задаче классификации отзывов о книгах: Материалы ежегодной международной конференции "Диалог" (г. Москва, 29 мая – 2 июня 2013 г.) – М. : Институт лингвистики РГГУ, 2013. – 193 с.
2. Галактика Zoom. Оценка модификации метода формирования инфопортрета: Материалы третьего российского семинара по оценке методов информационного поиска (г. Ярославль, 6 октября 2005 г.). – СПб. : НИИ Химии СПбГУ, 2005. – 226 с.
3. Волковский О.С. Анализ современных подходов к задаче автоматической генерации текстов на естественном языке / О.С. Волковский, Е.Р. Ковылин // Системные технологии. – 2016. – №5 (106). – С. 3-12.
4. Волковский О.С. Компьютерная система автоматического определения связности текста / О.С. Волковский, Е.Р. Ковылин // Системные технологии. – 2017. – № 5 (112). – С. 11-17.
5. Волковский О.С. Компьютерная система автоматического анализа промышленных инструкций / О.С. Волковский, Е.Р. Ковылин // Системные технологии. – 2018. – № 3 (116). – С. 28-37.



УДК 004:620.91

І.В. ГАРЯЧЕВСЬКА, Д.Г. СИДОРОВ  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна**РОЗРАХУНОК ОКУПНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**

Дана стаття присвячена розробці та програмній реалізації системи розрахунку окупності впровадження нетрадиційних енерготехнологій. Створена система окупності являє собою веб-додаток, який дозволяє користувачеві, за мінімальну кількість часу, розрахувати термін окупності впровадження сонячної електростанції. На підставі введених даних, а саме регіону, потужності окремого фотомодуля та сумарної потужності електростанції. Система розраховує загальну площу, яку займає дана електростанція. Також в системі окупності реалізована можливість розрахунку середньомісячної та річної виробки сонячної електростанції, яка відображається у вигляді відповідної діаграми. Крім цього, система дозволяє розрахувати економічну складову впровадження сонячної електростанції, на підставі якої розраховує вартість і відображає діаграму періоду окупності електростанції.

Ключові слова: альтернативна енергетика, сонячна електростанція, фотомодулі, окупність системи, веб-додаток.

І.В. ГАРЯЧЕВСКАЯ, Д.Г. СИДОРОВ  
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина**РАСЧЕТ ОКУПАЕМОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Данная статья посвящена разработке и программной реализации системы расчета окупаемости внедрения нетрадиционных энерготехнологий. Созданная система окупаемости представляет собой веб-приложение, которое позволяет пользователю, за минимальное количество времени, рассчитать срок окупаемости внедрения солнечной электростанции. На основании введенных данных, а именно региона, мощности отдельного фотомодуля и суммарной мощности электростанции, система рассчитывает общую площадь, которую занимает данная электростанция. Также в системе окупаемости реализована возможность расчета среднемесячной и годовой выработки солнечной электростанции, которая отображается в виде соответствующей диаграммы. Кроме этого, система позволяет рассчитать экономическую составляющую внедрения солнечной электростанции, на основании которой определяет стоимость и отражает диаграмму периода окупаемости электростанции.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, солнечная электростанция, фотомодули, окупаемость системы, веб-приложение.

I. GARYACHEVSKA, D. SYDOROV  
V.N. Karazin Kharkiv National University**CALCULATION OF PAYBACK OF INTRODUCTION OF A SOLAR POWER STATION**

This article is devoted to the development and software implementation of the payback calculation system for the introduction of nontraditional energy technologies. One of the directions of the economic policy of state institutions and private companies is the payback of the introduction of non-traditional energy technologies. The calculation of the payback includes the price of the station, energy production, energy consumption, the price of the green tariff and other indicators that are used to calculate the return on the introduction of non-traditional energy technologies. In this regard, the creation of a system for calculating the recoupment of the introduction of non-traditional energy technologies is one of the actual and promising areas of the present. The created payback system is a web-application that allows the user, in a minimum amount of time, to calculate the payback period for the introduction of a solar power plant. Based on the input data, namely the region, the power of a single photomodule and the total power of the power plant, the system calculates the total area occupied by this power plant. The database was developed that contains information received from users, the price of various photomodules, the value of solar insolation in various regions of Ukraine, as well as additional costs. Also in the payback system, the possibility of calculating the average monthly and annual output of a solar power plant, which is displayed in the form of a corresponding diagram, is realized. In addition, the system allows you to calculate the economic component of the introduction of solar power plant. The economic component includes such parameters as delivery of the solar power plant, installation of the solar power plant, type of protective fastening, type of roof, etc. According to the parameters of the economic component of the payback of the introduction of the solar power plant, the web-application determines the cost and reflects the diagram of the payback period of the solar power plant. The calculation of the recoupment of the introduction of the solar power plant takes into account the green tariff.

Keywords: alternative energy, solar power station, photomodules, system payback, web-application.

**Постановка проблеми**

Одним з напрямків економічної політики державних установ і приватних компаній є окупність впровадження нетрадиційних енерготехнологій. Розрахунок окупності включає в себе ціну станції, виробітку енергії, споживання енергії, ціну за зеленим тарифом та інші показники, які використовуються для розрахунку окупності впровадження нетрадиційних енерготехнологій. В зв'язку з цим, створення системи для розрахунку окупності впровадження нетрадиційних енерготехнологій є одним з актуальних та перспективних напрямків сьогодення. У цій статті викладена концепція веб-додатку, який створено для розрахунку окупності впровадження нетрадиційних енерготехнологій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Дослідження в області сонячної енергетики представлені в роботах [1–3].

**Мета дослідження**

Метою роботи є розробка і програмна реалізація системи розрахунку окупності впровадження нетрадиційних енерготехнологій для спрощення процесу підбору складових енергетичної системи, за рахунок автоматизації зберігання та обробки інформації.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

**Опис системи розрахунку окупності впровадження нетрадиційних енерготехнологій**

Загальна блок-схема алгоритму роботи системи розрахунку окупності сонячної електростанції наведена на рис. 1.

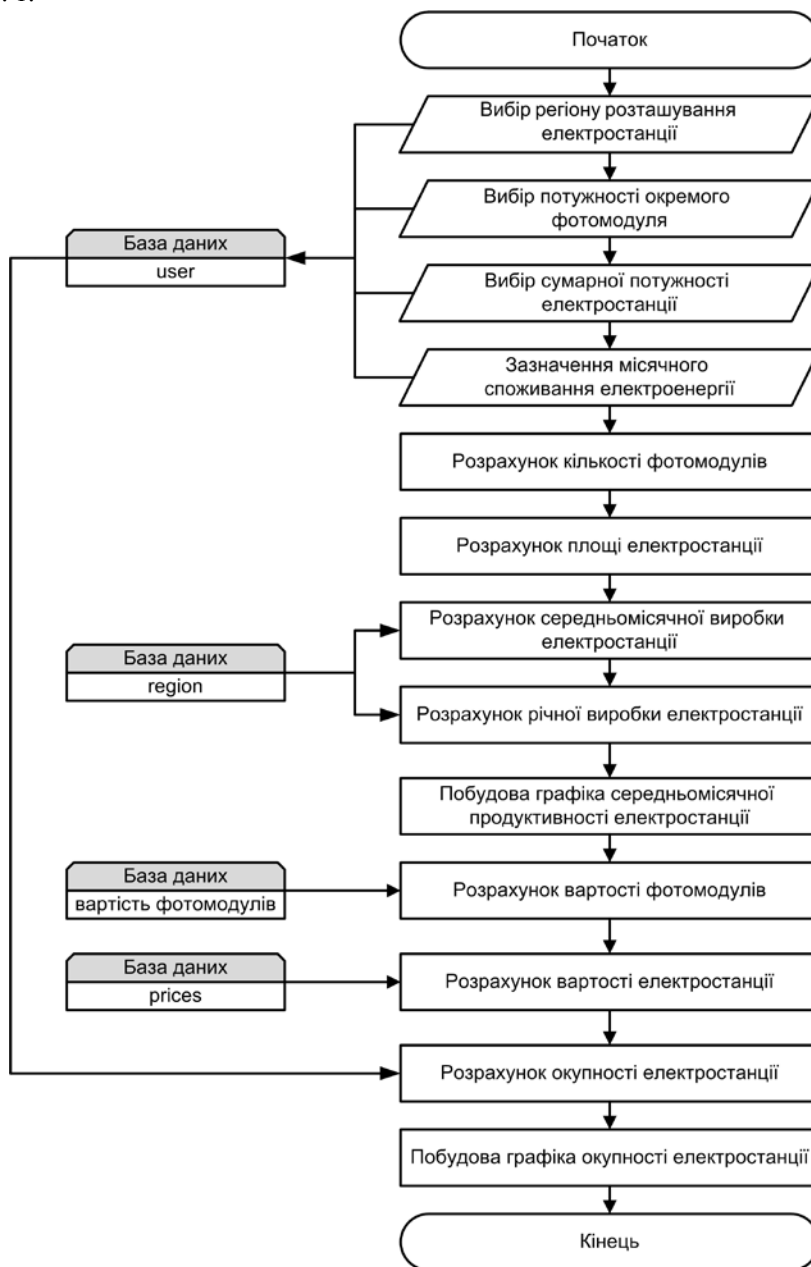


Рис. 1. Загальна блок-схема алгоритму роботи системи розрахунку окупності сонячної електростанції.

На першому кроці роботи з системою, користувачу необхідно задати вхідні дані. Вхідними даними для системи є регіон розташування електростанції, потужність окремого фотомодуля електростанції, бажана сумарна потужність електростанції, а також значення місячного споживання електроенергії. Частина робочої області системи, яка відповідає за зазначення вхідних даних представлена на рис. 2.

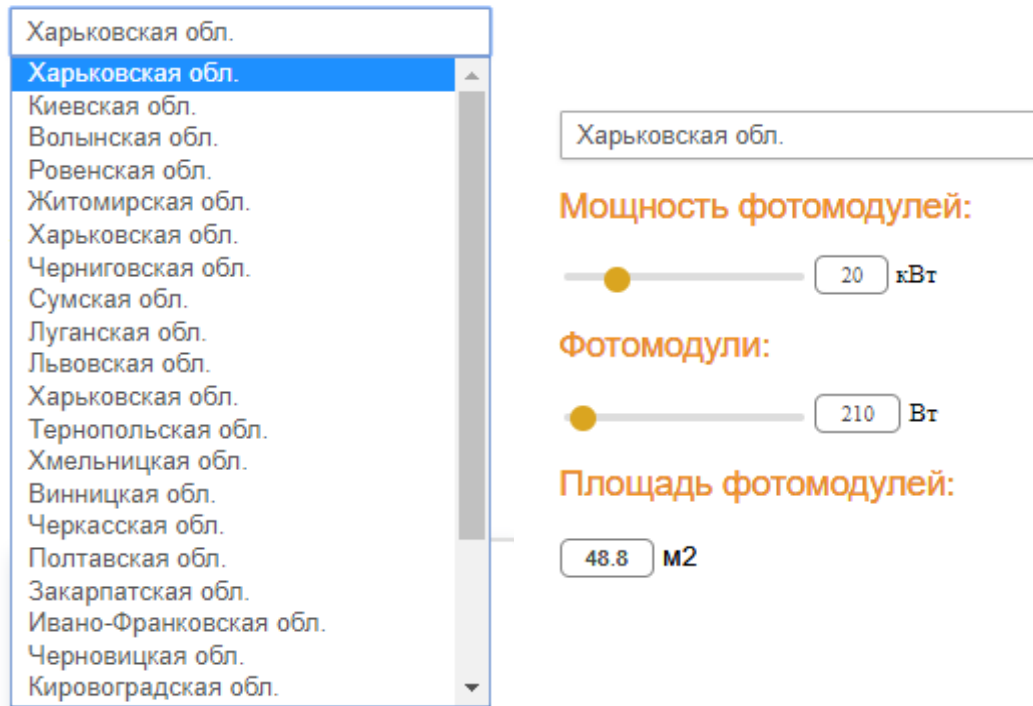


Рис. 2. Вхідні дані системи.

Комбінований список відповідає за вибір регіону, в якому буде розміщена електростанція. Повзунок *Мощность фотомодулей* регулює сумарну потужність електростанції. Повзунок *Фотомодули* регулює потужність окремого фотомодуля, з яких буде складатися електростанція (див. рис. 2). Обрані вхідні параметри надходять до бази даних *user* (рис. 3).

id	Мощность станции	Мощность фотомодуля	Собственное потребление
1	27	270	310
2	25	255	280
3	24	200	250

id	Name	Prices
1	Стоимость монтажных работ	3000
2	Крепление панелей на скатную кровлю	35
3	Инвертор АВВ	5900
4	Защита постоянной и переменной цепи	500
5	Оборудование	3000

id	views_foto	value
1	Фотоэлектрический модуль 100 Вт	50
2	Фотоэлектрический модуль 105 Вт	55
3	Фотоэлектрический модуль 110 Вт	60
4	Фотоэлектрический модуль 115 Вт	65
6	Фотоэлектрический модуль 120 Вт	70
7	Фотоэлектрический модуль 125 Вт	75
9	Фотоэлектрический модуль 130 Вт	80
10	Фотоэлектрический модуль 135 Вт	85
11	Фотоэлектрический модуль 140 Вт	90
12	Фотоэлектрический модуль 145 Вт	95
13	Фотоэлектрический модуль 150 Вт	100
14	Фотоэлектрический модуль 155 Вт	105
15	Фотоэлектрический модуль 160 Вт	110
16	Фотоэлектрический модуль 165 Вт	115
17	Фотоэлектрический модуль 175 Вт	120
18	Фотоэлектрический модуль 180 Вт	125
19	Фотоэлектрический модуль 185 Вт	130

id	reg	Month1	Month2	Month3	Month4	Month5	Month6	Month7	Month8	Month9	Month10	Month11	Month12
1	Simfer	1.27	2.06	3.05	4.3	5.44	5.84	6.2	5.34	4.07	2.67	1.55	1.07
2	Vinnitsa	1.07	1.89	2.94	3.92	5.19	5.3	5.16	4.68	3.21	1.97	1.1	0.9
3	Lutsk	1.02	1.77	2.83	3.91	5.05	5.08	4.94	4.55	3.01	1.83	1.05	0.79
4	Dneprop	1.21	1.99	2.98	4.05	5.55	5.57	5.7	5.08	3.66	2.27	1.2	0.96
5	Donetsk	1.21	1.99	2.98	4.04	5.48	5.55	5.66	5.09	3.67	2.24	1.23	0.96
6	Zhitomir	1.01	1.82	2.87	3.88	5.16	5.19	5.04	4.66	3.06	1.87	1.04	0.83
7	Uzhhorod	1.13	1.19	3.01	4.03	5.01	5.31	5.25	4.82	3.33	2.02	1.19	0.88
8	Zaporozhye	1.21	2	2.91	4.2	5.62	5.72	5.88	5.18	3.87	2.44	1.25	0.95
9	Ivano-Frankivsk	1.19	1.93	2.84	3.68	4.54	4.75	4.76	4.4	3.06	2	1.2	0.94
10	Kiev	1.07	1.87	2.95	3.96	5.25	5.22	5.25	4.67	3.12	1.94	1.02	0.86
11	Kirovohrad	1.2	1.95	2.96	4.07	5.47	5.49	5.57	4.92	3.57	2.24	1.14	0.96
12	Lugansk	1.23	2.06	3.05	4.05	5.46	5.57	5.65	4.99	3.62	2.23	1.26	0.93
13	Lviv	1.08	1.83	2.82	3.78	4.67	4.83	4.83	4.45	3	1.85	1.06	0.83
14	Mykolaiv	1.25	2.1	3.07	4.38	5.65	5.85	6.03	5.34	3.93	2.52	1.36	1.04
15	Odessa	1.25	2.11	3.08	4.38	5.65	5.85	6.04	5.33	3.93	2.52	1.36	1.04
16	Poltava	1.18	1.96	3.05	4	5.4	5.44	5.51	4.87	3.42	2.11	1.15	0.91
17	Rovno	1.01	1.81	2.83	3.87	5.08	5.17	4.98	4.58	3.02	1.82	1.04	0.81
18	Sumy	1.13	1.93	3.05	3.98	5.27	5.32	5.38	4.67	3.19	1.98	1.1	0.86

Рис. 3. Бази даних, які використовуються в системі розрахунку окупності сонячної електростанції.

За введеними даними від користувача, система здійснює розрахунок кількості фотомодулів, необхідних для покриття сумарної потужності електростанції за наступною формулою:

$$n = \frac{E}{W},$$

де  $E$  – сумарна потужність електростанції,  $W$  – потужність окремого фотомодуля.

Після розрахунку необхідної кількості фотомодулів, система обчислює сумарну площу, яку займає електростанція. Розрахунок здійснюється за такою формулою:

$$S = 1.64 \times n,$$

де  $n$  – кількість фотомодулів, 1.64 – площа, яку займає один фотомодуль.

Наступним етапом роботи системи є розрахунок середньомісячної виробки електростанції. Беручи значення місячної сонячної активності України з бази даних *region* (див. рис. 3), а також значення сумарної потужності електростанції з бази даних *user*, система розраховує середньомісячну виробку електростанції за формулою:

$$R = E \times C_n \times M_D \times H,$$

де  $E$  – сумарна потужність електростанції,  $C_n$  – середньоденна продуктивність однокіловатної станції за регіоном в залежності від місяця,  $M_D$  – кількість днів у місяці,  $H$  – коефіцієнт корисної дії електростанції.

За результатами розрахунку середньомісячної виробки електростанції, на наступному кроці, система обчислює річну виробку електростанції за наступною формулою:

$$C = \sum_{i=1}^{12} R_i,$$

де  $R_i$  – середньомісячна виробка електростанції,  $i$  – номер місяця.

Знайдену середньомісячну виробку електростанції, система відобразить користувачу у вигляді відповідної діаграми (рис. 4).

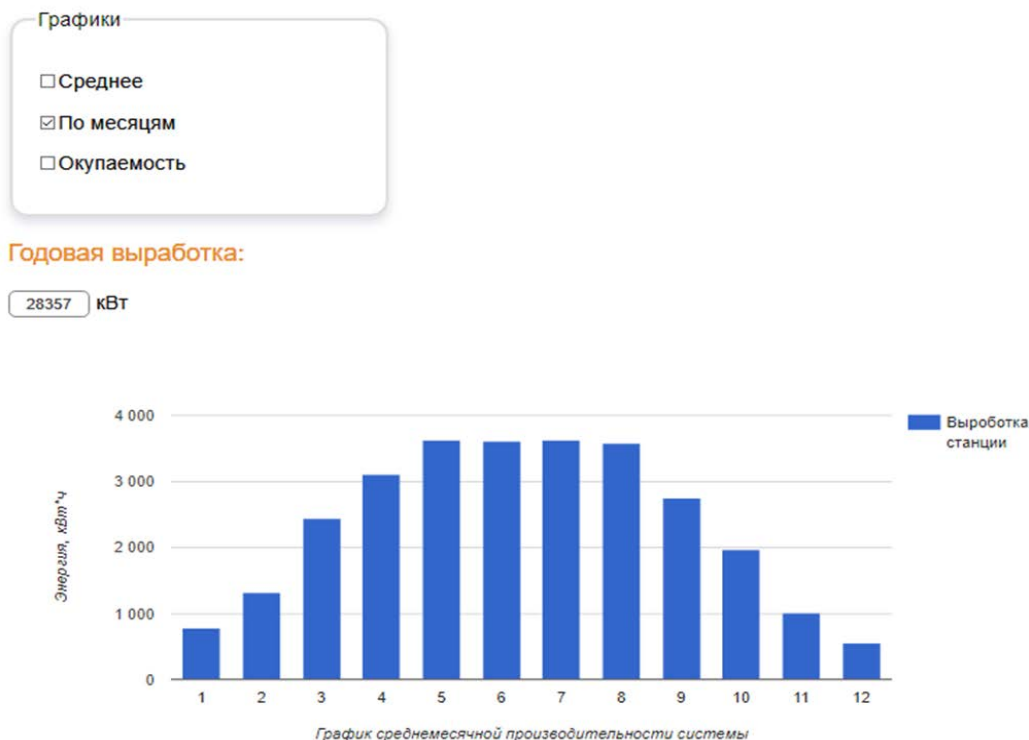


Рис. 4. Діаграма середньомісячної продуктивності системи.

Наступним кроком системи є розрахунок вартості фотомодулів. Використовуючи інформацію з бази даних *вартість фотомодулів* (див. рис. 3), система розраховує її за формулою:

$$V = n \times j,$$

де  $n$  – кількість фотомодулів,  $j$  – ціна за один фотомодуль.

Після того, як буде обчислена сумарна вартість фотомодулів, система визначає загальну вартість отриманої електростанції, використовуючи дані з бази даних *price* (див. рис. 3):

$$V_S = V + \sum_{i=1}^n B_i,$$

де  $V$  – загальна вартість фотомодулів,  $B_i$  – додаткові витрати.

Наступним етапом визначення окупності сонячної електростанції, є розрахунок економічної складової. На Рис. 5 представлена частина робочої області системи, яка відповідає за економічну складову впровадження нетрадиційних енерготехнологій.

**Потребление в месяц:**

310

Защитное крепление  
 Крепежи

Наклонная кровля  
 Плоская кровля

Доставка  
 Утановка

**Стоимость станции:**

26300 \$

Рис. 5. Розрахунок економічної складової.



Рис. 6. Діаграма окупності впровадження сонячної електростанції.

За результатами введених даних, система здійснює загальний розрахунок вартості отриманої електростанції, яку відображає користувачу в полі *Стоимость станции*.

Фінальним кроком роботи системи є, безпосередньо, розрахунок окупності сонячної електростанції. Даний розрахунок здійснюється за наступною формулою:

$$M = \sum_{n=1}^{12} (R_n - P_n) \times G,$$

де  $R_n$  – середньомісячна продуктивність електростанції з урахуванням ККД,  $P_n$  – місячне споживання електроенергії користувачем,  $n$  – номер місяця,  $G$  – ціна за зеленим тарифом.

За результатами розрахунків, система видає користувачу діаграму окупності впровадження сонячної електростанції (рис. 6).

### Висновки

У цій статті була розглянута система, що являє собою веб-додаток, який створено для розрахунку окупності впровадження нетрадиційних енерготехнологій. Дана система дозволяє користувачам, які не володіють спеціальними знаннями з нетрадиційної енергетики, за мінімальний проміжок часу, підібрати найбільш оптимальний варіант сонячної електростанції, а також отримати інформацію щодо її окупності. На підставі введених даних, а саме регіону, потужності окремого фотомодуля та сумарної потужності електростанції, система розраховує загальну площу, яку займає дана електростанція. Також в системі окупності реалізована можливість розрахунку середньомісячної та річної виробки сонячної електростанції, яка відображається у вигляді відповідної діаграми. Система, завдяки обліку економічної складової, надає користувачу реальну вартість впровадження обраної сонячної електростанції.

Дана система є корисним інструментом на шляху до переходу від традиційних до альтернативних джерел енергії.

### Список використаної літератури

1. Сабади П.Р. Солнечный дом / П.Р. Сабади. – М.: Стройиздат, 1981. – 111 с.
2. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки / Н.В. Харченко. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
3. Gevorkian P. Alternative energy systems in building design / P. Gevorkian. – The McGraw-Hill Companies, 2009. – 545 p.

УДК 004:620.91

І.В. ГАРЯЧЕВСЬКА, С.Ю. МОВЕНКО  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

## РОЗРОБКА ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Основною метою роботи є розробка моделей прогнозування часових рядів для отримання якомога точнішого прогнозу споживання та вироблення електроенергії з урахуванням використання альтернативних джерел енергії. У роботі вивчаються основні методи прогнозування часових рядів та здійснюється їх порівняння на практиці. Пропонуються модернізації для отримання більшого ступеня точності за рахунок використання закону великих чисел. Досліджуються загальні фактори впливу на споживання та вироблення електроенергії за допомогою альтернативних джерел енергії. Досліджується ступінь точності створених моделей для довгострокового та короткострокового прогнозування. Пропонується програмна реалізація розроблених моделей у вигляді веб-програми. Розглянуто питання офлайн навчання штучних нейронних мереж за допомогою Jenkins CLI та системи розподіленого контролю версій Git.

Ключові слова: прогнозування, споживання електроенергії, штучні нейронні мережі, дерева рішень, часові ряди, альтернативні джерела енергії.

І.В. ГАРЯЧЕВСКАЯ, С.Ю. МОВЕНКО  
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

## РАЗРАБОТКА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Основной целью работы является разработка моделей прогнозирования временных рядов для получения наиболее точного прогноза потребления и выработки электроэнергии с учётом использования альтернативных источников энергии. В работе изучаются основные методы прогнозирования временных рядов и осуществляется их сравнение на практике. Предлагаются модернизации для получения большей степени точности за счет использования закона больших чисел. Исследуются общие факторы влияния на потребление и выработку электроэнергии с помощью альтернативных источников энергии. Исследуется степень точности созданных моделей для долгосрочного и краткосрочного прогнозирования. Предлагается программная реализация разработанных моделей в виде веб-приложения. Рассмотрен вопрос офлайн обучения искусственных нейронных сетей с помощью Jenkins CLI и системы распределенного контроля версий Git.

Ключевые слова: прогнозирование, потребление электроэнергии, искусственные нейронные сети, деревья решений, временные ряды, альтернативные источники энергии.

I. GARYACHEVSKA, S. MOVENKO  
V.N. Karazin Kharkiv National University

## DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR PREDICTING ELECTRICITY CONSUMPTION

The main purpose of the work is to develop models of forecasting of time series for obtaining as accurately as possible the forecast of electricity consumption and generation of electricity by alternative energy sources. In this paper, we study the basic methods of forecasting time series and perform their comparison in practice. In this paper, we consider such methods of forecasting time series as the autoregressive method, the method of decision tree and methods based on the use of the artificial neural networks. Modernization is proposed to obtain a greater degree of accuracy with the help of the law of large numbers. In this paper uses the artificial neural network with self-organization based on competition, namely the Kohonen's neural network in combination with the multilayer perceptron. This artificial neural network allows you to classify data on the results of which the forecast of electricity consumption will be fulfilled. The training of the created artificial neural network occurs by the method of back propagation of the error. Each artificial neural network performs prediction depending on the influence of its factor. Each artificial neural network serves as a perceptron in the classical model. The general factors of influence on the consumption of electric power and on production with the help of alternative energy sources are studied. The degree of accuracy of the created models for forecasting in the long-term and short-term perspective is investigated. The software implementation of the developed models in the form of a web application is offered. A database for storing user data was created in the developed web application. In this paper uses the hierarchical

database to store the settings of the artificial neural networks. The web application provides the ability to send emails to notifying users about the starting and finishing of training the artificial neural network. To increase the accuracy of the forecast, the model consisting of several artificial neural networks is used. The issue of offline training of artificial neural networks with the help of Jenkins CLI and the distributed control system of Git versions is considered.

*Keywords:* forecasting, electricity consumption, artificial neural networks, solution wood, time ranges, alternative sources of energy.

### Постановка проблеми

Задача планування споживання електроенергії завжди була важлива для процесу отримання та використання електроенергії. На даний час існують три види тарифів на електроенергію: одноставковий, многоставковий та диференційований. Найбільший інтерес представляє диференційований тариф. Він дозволяє оплачувати фактично спожиту енергію, яка розподілена за добовими часовими зонами. Важливим є те, що цей тариф має фіксовані тарифні ставки для кожної зони. Потреба в такому регулюванні виникає в двох випадках: або в зв'язку з нестачею пікових потужностей, або внаслідок труднощів проходження нічного провалу графіка електричного навантаження. Для якісного розрахунку тарифу необхідна установка багатотарифного лічильника електроенергії для вимірювання спожитої енергії окремо для декількох добових часових зон. Найбільше споживання електроенергії (пікова зона) припадає на денний час. У зазначені години запускається обладнання, що генерує енергію, однак воно виробляє електроенергію з найбільш високою вартістю. Оскільки в нічний час споживання електричної енергії значно зменшується, з роботи виводиться обладнання, яке виробляє електроенергію з більш високою вартістю. Тому в нічний час ціна найнижча. Для того, щоб простимулювати населення використовувати електрику в нічний час доби, було прийнято рішення про зменшення нічного коефіцієнта до 0,5.

Прогнозування грає ключову роль при формуванні балансу електроенергії в енергосистемі, впливаючи на вибір режимних параметрів і розрахункових електричних навантажень. Баланс виробництва та споживання електроенергії – це основа технологічної стійкості енергосистеми, його порушення позначається на якості електроенергії (відбувається деградація частоти і напруги в мережі), що знижує ефективність роботи обладнання. Крім того, правильний прогноз дозволяє забезпечити оптимальний розподіл навантаження між об'єктами енергосистеми. Це дає можливість управляти вартістю покупки електроенергії шляхом регулювання завантаження устаткування, переводячи, наприклад, основні обсяги генерації електроенергії в години і зони оптового ринку енергії з найменшою ціною.

### Мета дослідження

Метою роботи є аналіз існуючих методів прогнозування часових рядів та розробка технології для здійснення прогнозу споживання електроенергії з різною часовою перспективою.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

**Аналіз існуючих методів прогнозування часових рядів.** Часовий ряд (ЧР) – це послідовність значень, які описують перебіг процесу в часі, виміряних в послідовні моменти часу, зазвичай через рівні проміжки. Дані цього типу широко поширені в різноманітних сферах діяльності людини. В економіці – це щоденні ціни на акції, курси валют, щотижневі і місячні обсяги продаж, річні обсяги виробництва. В нашому випадку – це дані, які характеризують споживання електроенергії. Розглянемо методи прогнозування часових рядів, які найбільш часто використовуються на практиці.

Метод авторегресії виражає залежність показника від факторів що впливають за допомогою лінійної моделі. Загальний вигляд моделі авторегресії порядку  $p$  визначається наступним чином:

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p a_i X_{t-i} + \varepsilon_t,$$

де  $c$  – константа, яка описує ситуацію проходження факторів що впливають, через початок координат, тобто показує, який вигляд має модель в разі, коли фактори що впливають, дорівнюють нулю;  $a_i$  – коефіцієнти, які описують ступінь залежності підсумкового параметру  $X_t$  від факторів що впливають, в даному випадку, від того, яким був параметр  $X_t$  на минулому кроці регресії;  $\varepsilon_t$  – випадкова компонента або, як ще її прийнято називати, похибка моделі – це різниця між розрахунковим значенням моделі за певні періоди та відомими значеннями. Метод авторегресії дає можливість показати залежність параметру  $X_t$  від самого себе в попередній проміжок часу (день, місяць, рік і т.п.). Саме до цього зводиться суть авторегресійної моделі, тобто, цілком раціонально можливо припустити практично для будь-якого показника, що його поточне значення, в якійсь мірі, залежить від того, яке значення цього показника було в попередній проміжок часу. Саме пошук цієї залежності дозволяє будувати досить точні моделі, за якими дуже легко зробити прогноз.

### ПЕРЕВАГИ МЕТОДУ:

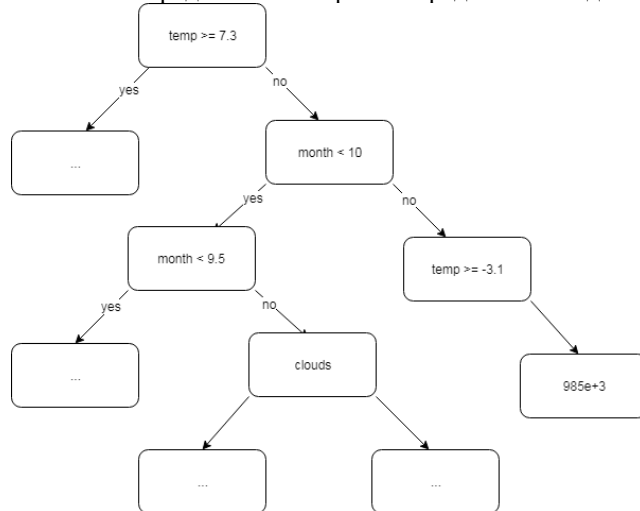
1. Отримання високоякісної моделі з адекватним прогнозом при мінімумі витрат часу та вимог до вхідних даних.

**НЕДОЛІКИ МЕТОДУ:**

1. Прогноз за вхідними даними можливий тільки на один період вперед. Якщо потрібно зробити прогноз на більш тривалий проміжок часу, то в якості факторів, що впливають, для розрахунку доведеться брати не реально існуючий параметр  $X_t$ , а той, який розрахований за моделлю, що в підсумку дасть прогноз на прогнозі, а значить адекватність такого прогнозу, як мінімум, в два рази менша.
2. Зі збільшенням порядку авторегресії виникає необхідність розширювати діапазон вхідних даних.

Метод авторегресії має як переваги, так і недоліки щодо задач прогнозування часових рядів. Традиційно для прогнозу споживання електроенергії використовується метод авторегресії: лінійний алгоритм, заснований на прогнозі майбутнього за найближчим минулим. При цьому всі інші фактори, що впливають на споживання електроенергії, використовуються опосередковано, тобто через їх вплив на минулі значення споживання електроенергії. Цей метод дозволяє отримувати гарні результати прогнозу в стабільних ситуаціях, наприклад, коли немає різких кліматичних змін. Однак при несподіваний різкій зміні зовнішніх параметрів застосування такого підходу не дозволяє правильно спрогнозувати ситуацію. Наприклад, при різкому сильному похолоданні, навіть в разі якщо відомий приблизно правильний прогноз погоди, метод не передбачає можливості його використання. У зв'язку з тим, що авторів цікавить задача прогнозування споживання електроенергії, яка має дуже багато факторів впливу, це призводить до неможливості використання даного методу.

Метод дерев рішень це один з найпопулярніших методів розв'язку задачі класифікації та прогнозування. Якщо залежна, тобто цільова змінна, набуває дискретних значень, то за допомогою методу дерева рішень розв'язується задача класифікації. Якщо ж залежна змінна приймає безперервні значення, то дерево рішень встановлює залежність цієї змінної від незалежних змінних. Вперше дерева рішень були запропоновані Ховілендом і Хантом в кінці 50-х років минулого століття. У найбільш простому вигляді дерево рішень – це спосіб представлення правил в ієрархічній, послідовній структурі. Основа такої структури – відповіді "Так" або "Ні" на ряд питань. На рис. 1. представлена одна з віток дерева рішень.



**Рис. 1. Приклад відгалуження дерева рішень**

Останнім часом все більшу увагу з боку фахівців, що займаються прогнозом часових рядів, і зокрема, рядів з споживання електроенергії, привертають штучні нейронні мережі (ШНМ). Основна привабливість застосування ШНМ для задач прогнозу споживання електроенергії полягає в можливості використання великої кількості різноманітних вхідних параметрів: історичні дані по споживанню електроенергії та відповідні історичні погодні умови, прогноз погоди, час доби, пора року, тип дня і т.д. При цьому функція впливу вхідного параметра на вихідний результат може бути якою завгодно складності (нелінійної, нестационарної).

ШНМ є аналітичними системами, в яких поставлені задачі не досить чітко сформульовані. Недостатня точність формулювання заповнюється здатністю ШНМ до самонавчання, вмінню знаходити в даних приховані і неясні образи. Важливою властивістю ШНМ є здатність до зміни своєї поведінки і знання в залежності від змін зовнішнього середовища.

Аналіз існуючих методів показав, що найперспективнішим є використання нейронних мереж, тому що споживання електроенергії залежить від безлічі параметрів, це можуть бути робочий день або вихідний, сезон, час року, температура, похмурість, вологість та інші.

**Викладення основного матеріалу досліджень**

**Розробка нейронної мережі для розв'язання задачі прогнозування споживання електроенергії.**

Для прогнозування електроспоживання краще використовувати конфігурацію ШНМ прямого поширення (перцептрон) з навчанням за методом зворотного поширення помилки. Тут необхідно



зауважити, що при виборі структури ШНМ важливо враховувати її розмірність, тобто кількість прихованих шарів і кількість нейронів в цих шарах. При недостатньому розмірі мережі для розв’язання поставленого завдання ШНМ буде погано навчатися та неправильно працювати, а при розмірі мережі, який перевищує складність розв’язуваної задачі, процес навчання ШНМ буде дуже тривалим, або мережа взагалі може бути непридатна для розв’язання даного завдання. Це питання в кожному конкретному випадку вирішується експериментальним шляхом.

З усіх цих факторів можна зробити висновок, що метод ШНМ дуже добре підходить для прогнозування часових рядів в рамках задачі прогнозування споживання електроенергії. Він добре справляється з великою кількістю вхідних параметрів, з задачами, що погано формалізуються, вміє знаходити в даних неясні прихованні образи. Першим кроком під час навчання нейронної мережі ініціалізуємо вагові коефіцієнти випадковим чином, після чого у випадковому порядку подаємо дані навчальної вибірки. Для навчання кількох різних нейронних мереж, з однаковими вхідними даними, отримуємо на виході результат з похибкою. Крім того, частина вхідних параметрів моделі є чисельними (історичні значення споживання електроенергії, температура повітря, час доби і т.п.), а частина – категоріальними (пора року, тип дня, тип хмарності та інші). Можливо також неявно використання вхідних параметрів. Наприклад, через побудову системи ШНМ, кожний елемент якої (окрема ШНМ) навчений на певний випадок, наприклад, для певного типу дня або пори року. Загальний вхід системи ШНМ (ворота) служить для спрямування даних на вхід конкретної ШНМ, призначеної для відповідної прогнозованої ситуації. Структура розробленої нейронної мережі з конфігурацію прямого поширення з навчанням за методом зворотного поширення похибки наведена на рис. 2.

Задля збільшення точності прогнозу використовується модель, створена з декількох ШНМ. Кожна ШНМ виконує прогнозування згідно з впливом свого фактору. Кожна ШНМ виконує роль перцептрона в класичній моделі. Це дозволяє збільшити точність прогнозування. Згідно з заданим алгоритмом відбувається перерахування ваг для кожного вузла. Для кожного показника, що може впливати на прогнозування (температура, опади, вихідні дні), розпочинається навчання окремої ШНМ. Коли навчання кожної ШНМ закінчується, розпочинається навчання головної ШНМ, яка встановлює ваги для кожної ШНМ, тобто визначає вплив, якого показника більше впливає на споживання електроенергії. Стандартна схема процесу навчання багатошарового перцептрона наведена на рис. 3.



Рис. 2. Структура нейронної мережі з конфігурацію прямого поширення з навчанням за методом зворотного поширення помилки

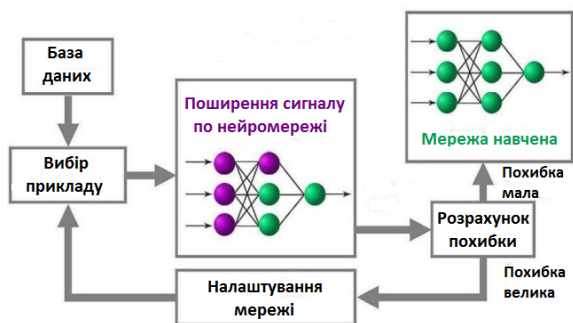


Рис. 3. Процес навчання нейронної мережі

Розглянемо детальніше алгоритм навчання ШНМ. На першому кроці відбувається ініціалізація вагових коефіцієнтів  $(v, w)$  випадковим чином. Кожний вхідний нейрон  $\{x_i\}_{i=1}^n$  відправляє отриманий сигнал всім нейронам в наступному (прихованому) шарі. Кожний прихований нейрон  $\{z_j\}_{j=1}^p$  підсумовує зважені вхідні сигнали:

$$z\_in_j = \sum_{i=1}^n x_i v_{ij},$$

після чого застосовує активаційну функцію:

$$z_j = f(z\_in_j).$$

Отриманий результат надходить всім елементам наступного (вихідного) шару. Кожний вихідний нейрон  $\{y_k\}_{k=1}^m$  підсумовує зважені вхідні сигнали:

$$y\_in_k = \sum_{j=1}^p z_j w_{jk}$$

і застосовує активаційну функцію, обчислюючи вихідний сигнал:

$$y_k = f(y_{in_k})$$

Далі визначається похибка. Кожний прихований нейрон  $\{z_j\}_{j=1}^p$  підсумовує похибку, що надходить від нейронів попереднього шару:

$$\sigma_{in_j} = \sum_{k=1}^n \sigma_k w_{jk}$$

( $\sigma_k$  – складова коригування вагових коефіцієнтів), після чого обчислює величину похибки, помножуючи отримане значення на похідну активаційної функції:

$$\sigma_j = \sigma_{in_j} f'(z_{in_j})$$

На наступному етапі відбувається коригування вагових коефіцієнтів, які в подальшому використовуються, як нові вхідні дані до ШНМ.

Модель прогнозування споживання електроенергії, заснована на використанні даної ШНМ, показує хороші результати, наприклад, для середніх значень за день. При застосуванні нейронних мереж для часового прогнозування є необхідність модифікації, а саме, для кожної години використовувати свою нейронну мережу. Результати такого прогнозу наведені на рис. 4. На графіку синім кольором позначені реальні дані, а червоним кольором позначені дані, які були отримані за допомогою прогнозу нейронною мережею.

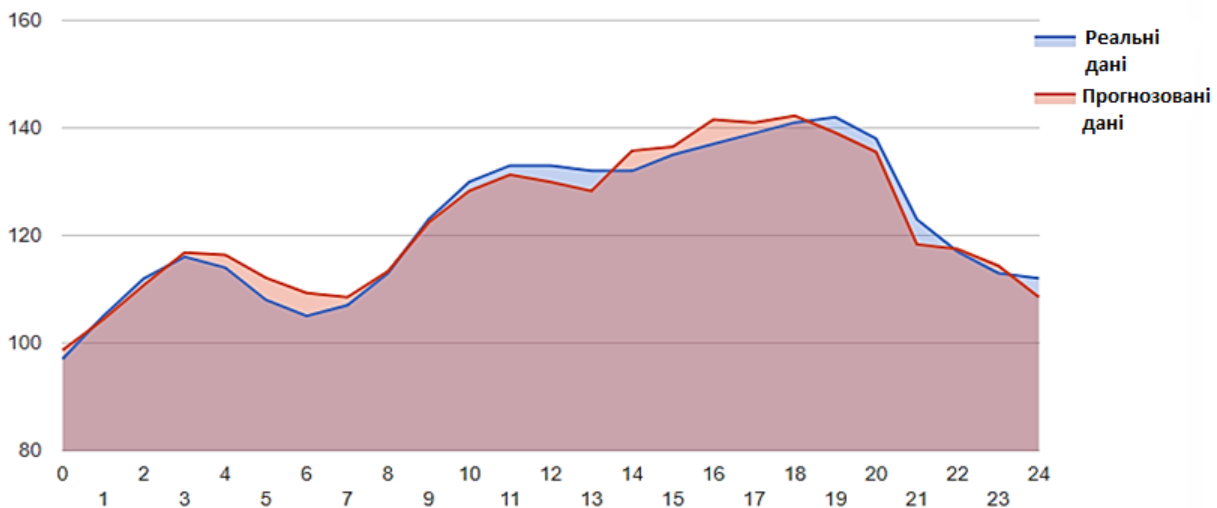


Рис.4. Прогноз споживання електроенергії за день.

Авторами було створено 24 ШНМ для кожного часу. Кількість нейронних мереж, які попали в проміжок похибок до 2%, до 5% та більше 5% наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Дата	Похибки нейронних мереж		
	Число погодинної похибки		
	До 2%	До 5%	Більш 5%
28.01.2017	12	24	0
29.01.2017	11	22	2
30.01.2017	12	21	3
31.01.2017	9	22	2
01.02.2017	15	22	2
02.02.2017	4	9	15
03.02.2017	3	13	11
04.02.2017	11	13	11
05.02.2017	10	17	7
06.02.2017	10	16	8
07.02.2017	10	19	5

Виходячи з даних табл. 1 бачимо, що спочатку результат прогнозування споживання електроенергії є задовільним, проте, згодом спостерігається різке збільшення похибки. Це обумовлено тим фактом, що графіки щоденного споживання дуже сильно різняться. Наприклад, дні можуть бути вихідними або робочими. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що за допомогою нейронної мережі з статичною архітектурою неможливо здійснити ефективне погодинне прогнозування.

Для розв'язання цієї задачі було вирішено застосувати нейронну мережу з самоорганізацією на основі конкуренції, а саме мережу Кохонена. Принцип дії даної нейронної мережі наступний. В ШНМ з самого початку присутні вхідні дані, але відсутні нейрони. За результатами вхідних даних, створюються нейрони з деякими випадковими ваговими коефіцієнтами. Коли в ШНМ подаються наступні вхідні дані, розраховується так звана евклідова відстань – це різниця вхідного вектора та вагових коефіцієнтів. Якщо ця відстань велика, то створюється новий нейрон. Таким чином, виконується розбиття, на так звані, кластери. Стандартна схема нейронної мережі Кохонена наведена на рис. 5.

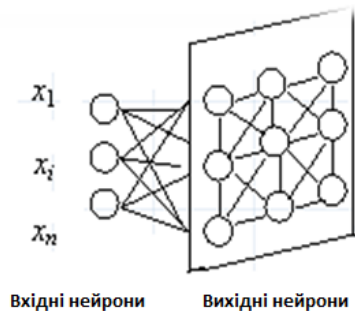


Рис. 5. Нейронна мережа Кохонена

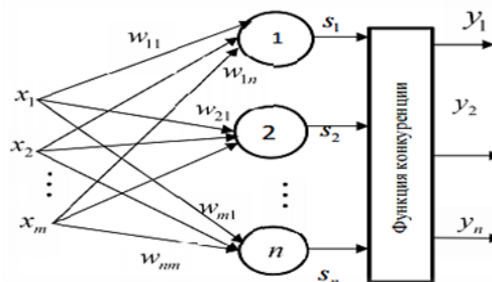


Рис. 6. Схема навчання нейронної мережі Кохонена

Алгоритм навчання нейронної мережі Кохонена, в графічному вигляді, наведено на рис. 6.

Для розв'язання задачі кожний вхідний сигнал подається на кожний нейрон, після чого визначається нейрон-переможець, це означає, що цей нейрон відповідає за певний день енергоспоживання і тільки для нього здійснюється перерозподіл вагових коефіцієнтів. Розглянемо більш детально алгоритм роботи даної нейронної мережі.

На першому кроці відбувається завдання структури нейронної мережі (кількості нейронів шару Кохонена). Після чого відбувається випадкова ініціалізація вагових коефіцієнтів:

$$|w_{ij}| \leq \frac{1}{\sqrt{M}},$$

де  $M$  – кількість вхідних змінних мережі.

На наступному кроці відбувається подача на входи мережі випадкового навчального прикладу поточної епохи навчання і здійснюється розрахунок евклідових відстаней від вхідного вектора до центрів всіх кластерів:

$$R_j = \sqrt{\sum_{i=1}^M (\tilde{x}_i - w_{ij})^2}.$$

За найменшим зі значень  $R_j$  обирається нейрон-переможець  $j$ , найбільшою мірою близький за значеннями з вхідним вектором. Для обраного нейрона (і тільки для нього) виконується корекція вагових коефіцієнтів:

$$w_{ij}^{(q+1)} = w_{ij}^{(q)} + v(\tilde{x}_i - w_{ij}^{(q)}),$$

де  $v$  – коефіцієнт швидкості навчання.

Дана нейронна мережа виконує тільки класифікацію вхідних даних, тобто є непридатною для здійснення прогнозу. У зв'язку з чим, було прийняте рішення об'єднати мережу Кохонена та багатозаровий перцептрон для попередньої класифікації даних, за результатами якої буде виконуватися прогноз споживання електроенергії.

Схема отриманої нейронної мережі наведена на рис. 7.

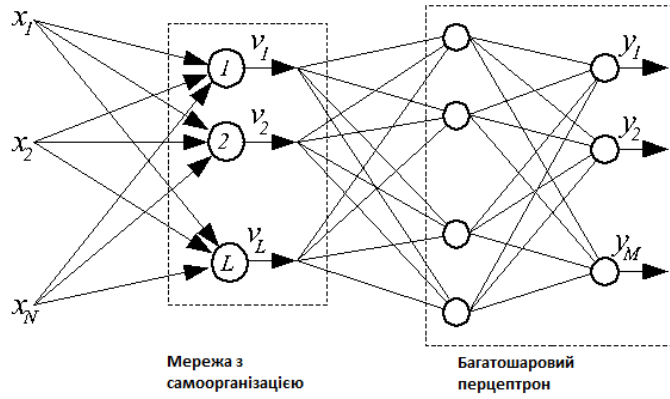


Рис.7. Схема модернізованої нейронної мережі

На рис. 8 наведено результат роботи модифікованої нейронної мережі.

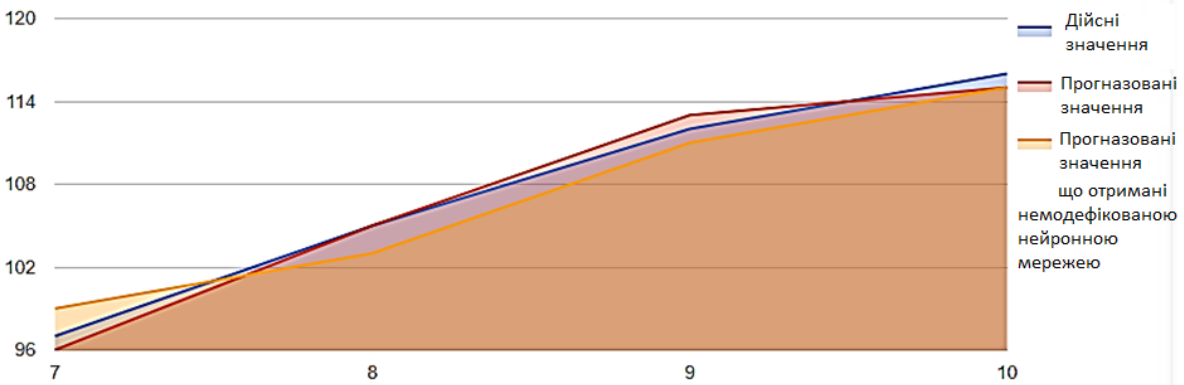


Рис. 8. Графік прогнозування споживання електроенергії отриманий модифікованою нейронною мережею

Синім кольором на графіку зазначені реальні значення, жовтим – результат роботи не модернізованої моделі нейронної мережі, червоним – поліпшена, модернізована модель нейронної мережі. Дана модифікація дозволила отримати прогноз з похибкою в 19 з 24 випадків до 5%.

Покращити створену модель можливо за рахунок збільшення кількості вхідних даних. Під час тестування ШНМ були застосовані дані споживання електроенергії Харківським національним університетом імені В.Н. Каразіна за термін, який складає п'ять років. Однак, в отриманих даних був відсутній ряд показників, наприклад, таких як погодні умови. За наявності цих показників можна суттєво поліпшити якість класифікації, а відповідно й прогнозу.

Розроблена штучна нейронна мережа була реалізована у вигляді веб-програми. Стартове вікно даної програми наведено на рис. 9.

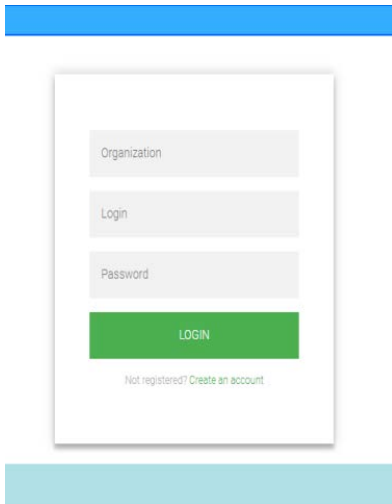


Рис. 9. Стартове вікно програми прогнозування споживання електроенергії.

В розробленій програмі для збереження даних користувачів була реалізована база даних. Ця реляційна база даних складається з трьох таблиць наведених на рис. 10.

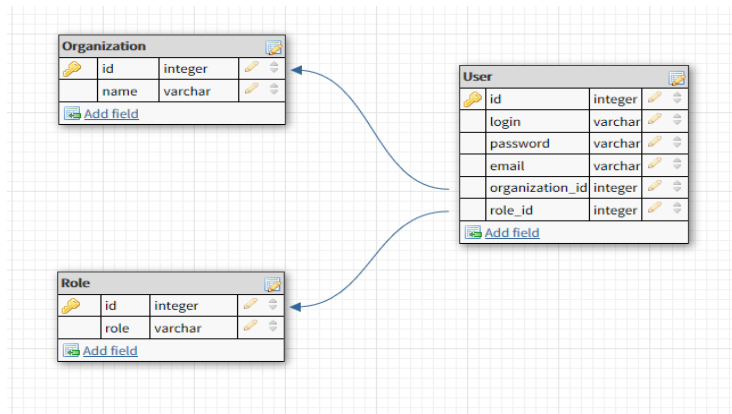


Рис. 10. Структура реляційної бази даних.

Дана модель зберігання інформації, для роботи з нейронною мережею, володіє одним явним недоліком – це час навчання. Це пов’язано з тим, що одночасно виконується навчання декількох нейронних мереж, крім того системою можуть скористатися різні користувачі, і для кожного потрібно проводити власні розрахунки на даних, які вони надають. Кожний користувач навчає свою нейронну мережу. Необхідно зберігати для кожного користувача його модель. Тому була застосована ієрархічна база даних для збереження налаштування мережі.

Програма написана на мові Java, вона дозволяє зберегти стан класу об’єкта в файл, після чого він з’являється в ієрархічній структурі в базі даних. На рис. 11 представлена структура, в якій зберігаються дані в ієрархічній базі даних.

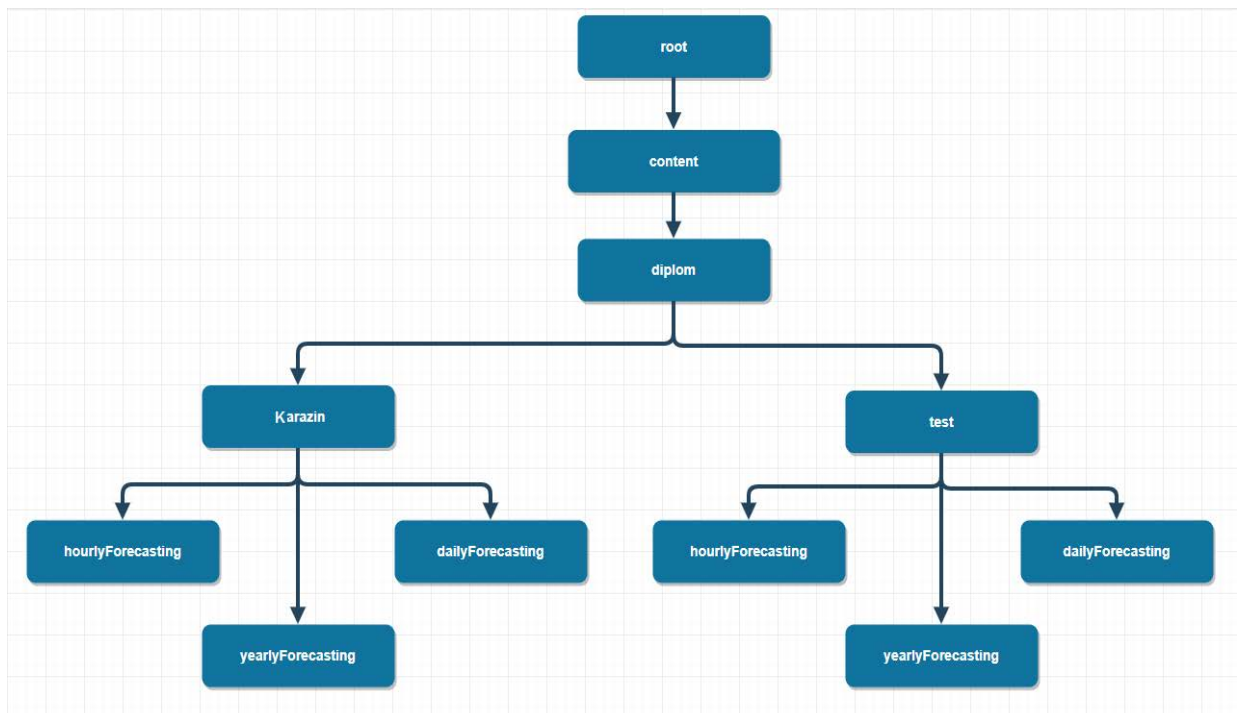


Рис. 11. Фрагмент структури ієрархічної бази даних.

На Рис.12 представлено вікно розробленої бази даних.

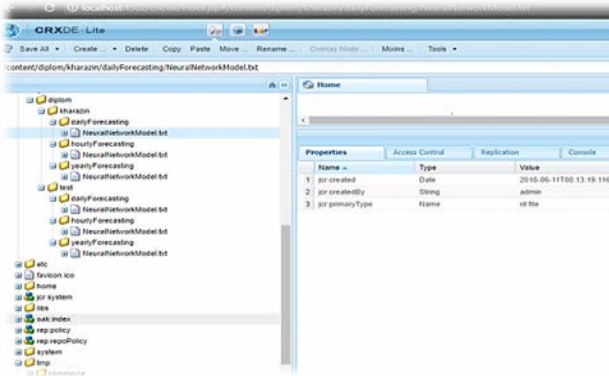


Рис. 12. Вікно бази даних

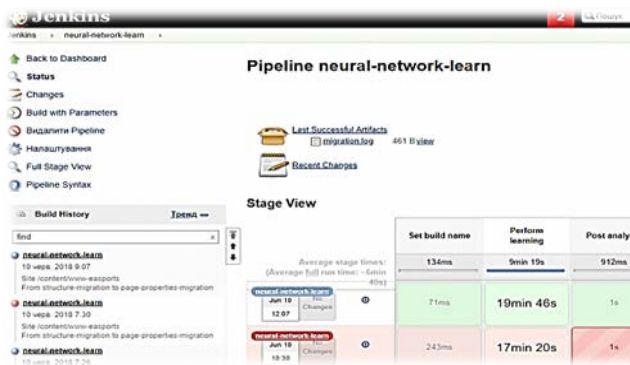


Рис. 13. Служба Jenkins

Коли користувач запускає навчання нейронної мережі, йому не зручно чекати кінця, тому що він не знає, коли закінчиться навчання. Як ми бачимо на рис. 13, навчання тривало 19 хвилин. Для взаємодії з користувачем було використано службу Jenkins, яка дозволяє автоматизувати деякі процеси. Дана служба має доступ до коду за допомогою розподіленої системи контролю версій Git. Після початку навчання нейронної мережі, система надсилає листа користувачеві з інформацією про час налаштування мережі, а після закінчення навчання користувачеві надається посилання для подальшої роботи з мережею.

Приклад вікна програми наведено на рис. 14. Користувачу дається можливість налаштувати свою нейронну мережу, а також обрати, який саме прогноз він хоче отримати: на день, місяць чи рік. Тобто обрати часову перспективу прогнозу.



Рис. 14. Результат прогнозу на день.

На Рис. 15 представлено приклад прогнозу на рік з урахуванням впровадження в університеті альтернативних джерел енергії. Прогноз було здійснено з урахуванням виробітки енергії сонячними панелями площею 200 м<sup>2</sup>. Червоним кольором позначені показники вироблення електроенергії, синім – споживання. Окупність такої модернізації становить 5 років.

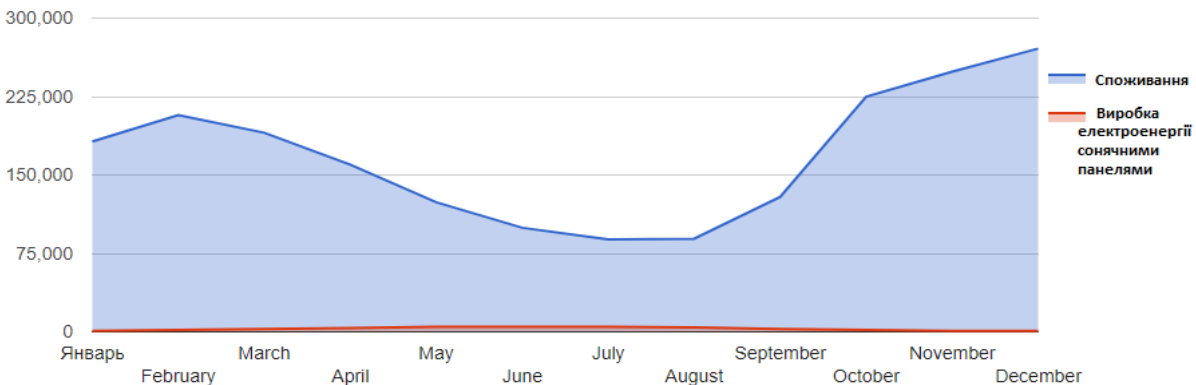


Рис. 15. Приклад прогнозу на рік для Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна з урахуванням впровадження сонячних панелей.

**Висновки**

Під час дослідження було проведено аналіз існуючих методів прогнозування часових рядів. Здійснена модифікація нейронної мережі для прогнозування споживання електроенергії та виробітки за допомогою альтернативних джерел енергії. Розроблені структури баз даних для зберігання інформації про користувачів та налаштування штучних нейронних мереж. Реалізована програма на мові Java у вигляді веб-додатку зі застосуванням служби Jenkins, та розподіленої системи контролю версій Git. Проведено тестування на реальних даних.

**Список використаної літератури**

1. Хайкин С.В. Нейронные сети: полный курс / С.В. Хайкин [ 2-е изд. Пер. с англ.] — М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. — 1104 с.
2. Хорстманн Кей. Java. Библиотека профессионала. Основы / Кей Хорстманн, Гари Корнелл. — Т.1. — М.: Издательский дом "Вильямс", 2015. — 1008 с.
3. Блинов И.Н. Java. Промышленное программирование / И.Н. Блинов, В.С. Романчик. — Минск: УниверсалПресс, 2007. — 704 с.
4. Гранд Марк. Шаблоны проектирования в Java / Марк Гранд. — М.: Новое знание, 2004. — 559 с.



УДК 528.8:004

В.В. ГНАТУШЕНКО

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

О.О. КАВАЦ, Вік.В. ГНАТУШЕНКО, Ю.О. КИБУКЕВИЧ, Ю.В. КАВАЦ

Національна металургійна академія України

## КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ РАДАРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ З МЕТОЮ МОНІТОРИНГУ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ

*Роботу присвячено практичному застосуванню супутникових радарних зображень високої роздільної здатності з метою моніторингу лісових насаджень на території Закарпатської області в Україні. Основна ціль дослідження полягає у визначенні потенціалу супутникових радіолокаційних даних, зокрема Sentinel-1, для виявлення вирубки лісів та оцінки стану лісових насаджень. Отримано кількісну характеристику рослинності за допомогою розрахунку індексу NDVI. Моніторинг проводився на різночасових зображеннях, отриманих у травні 2015 року та у квітні 2016 року відповідно.*

*Ключові слова:* збезлісення, розпізнавання, радіолокаційні дані, NDVI, Sentinel-1.

В.В. ГНАТУШЕНКО

Днепроvский национальный университет имени Олеся Гончара

А.А. КАВАЦ, Вик.В. ГНАТУШЕНКО, Ю.О. КИБУКЕВИЧ, Ю.В. КАВАЦ

Национальная металлургическая академия Украины

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ РАДАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ЦЕЛЮ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

*Работа посвящена практическому применению спутниковых радарных изображений высокого разрешения с целью мониторинга лесных насаждений на территории Закарпатской области Украины. Основная цель исследования состоит в определении потенциала спутниковых радиолокационных данных, в частности Sentinel-1, для выявления вырубки лесов и оценки состояния лесных насаждений. Получено количественную характеристику растительности с помощью расчета индекса NDVI. Мониторинг проводился на разновременных изображениях, полученных в мае 2015 года и в апреле 2016 соответственно.*

*Ключевые слова:* вырубка лесов, распознавание, радиолокационные данные, NDVI, Sentinel-1.

V. HNATUSHENKO

Oles Honchar Dnepro National University

O. KAVATS, VIK. HNATUSHENKO, J. KIBUKEVYCH, Y. KAVATS

National Metallurgical Academy of Ukraine

## COMPUTER ANALYSIS OF RADAR HIGH RESOLUTION IMAGES FOR FOREST LANDING MONITORING

*Satellite observing systems are the main tool for providing information and solving problems such as agricultural control and monitoring of deforestation or tree health. Due to the satellite data we can quickly extract the necessary information about the state of large and hard-to-reach forest plantations, which is necessary for the recognition and implementation of environmental protection policy. After analysis of recent studies, it was concluded that because of difficult weather conditions, such as clouds, fogs, some optical satellite images may be covered by clouds or shadows. This reduces the information content of the data and makes it impossible to recognize the earth's surface. This paper considers the practical application of high-resolution satellite radar images from Santinel-1 for monitoring deforestation areas in the Zakarpattya region of Ukraine. The resistance to weather conditions and the ability to conduct observations in the dark are the main advantages of radar satellites. The main objective of the study is determining the potential of satellite radar data for the detection of deforestation and assessment of forest stand. The monitoring was carried out on radar images obtained in May 2015 and in April 2016, respectively. The areas of deforestation plantations were calculated for multi-temporal images. Due to the research in [2], it was decided to analyze the areas in the spring and summer shooting period and use radar images with double polarization VV+VH. Pseudocolor composite RGB-images and deforestation masks were formed for visual assessment. Visual analysis of optical satellite images Landsat-8 allowed us to conclude that in 2014 identified areas of forest were completely covered with vegetation. Quantitative characteristics of vegetation were obtained by calculating the NDVI index. The NDVI looks for a reduction in interannual signals to determine forest loss or growth and is a reliable indicator of vegetation cover.*



*The studies have shown that satellite radar images provide an opportunity to qualitatively determine the deforestation areas and to estimate the state of vegetation using a*

*Keywords: deforestation, recognition, radar data, NDVI, Sentinel-1.*

### **Постановка проблеми**

Поверхня Землі, що містить лісові ділянки, займає понад 30% суходолу та виконує важливі водоохоронні, захисні, санітарно-гігієнічні, оздоровчі та інші функції. Ліси пом'якшують кліматичні зміни в навколишньому середовищі, забезпечують домівкою багатьох тварин та рослин, надають продукти харчування, ліки та засоби існування для людства по всьому світу. Сьогодні суцільна та безсистемна вирубка і недосконале ведення лісогосподарської діяльності погіршує стан лісів. Внаслідок цього виникають різні екологічні проблеми, наприклад:

- підвищення ризику виникнення повеней та паводків;
- сходження снігових лавин і селів;
- погіршення якості ґрунтів та їх родючості;
- загибель цінних природних екосистем.

Супутникові системи спостереження є основним інструментом для забезпечення інформації в режимі реального часу. Дедалі більше визнаються їх можливості у вирішенні ряду таких проблем як контроль ведення сільського господарства, моніторинг вирубування лісів та стану дерев, виявлення самозахватів земель та незаконного будівництва, інвентаризація дорожньо-транспортної інфраструктури, контроль змін берегових ліній водних об'єктів, моніторинг повеней та паводків та ін. Практично, виявлення та моніторинг стану лісів здійснюється системами дистанційного зондування майже щодня. Отримані дані дозволяють оперативно вилучати необхідну інформацію про стан великих і важкодоступних лісових насаджень, що є необхідним для визначення та проведення політики захисту навколишнього середовища [1].

Сучасні системи дистанційного зондування поділяються на пасивні (використовують енергію сонця) та активні (використовують свою власну енергію). До пасивних відносять багатоспектральні оптично-механічні системи, які є основним джерелом даних при вирішенні задач моніторингу поверхні Землі. Слід зазначити, що оптичні зображення мають один вагомий недолік. Внаслідок складних погодних умов, таких як щільна хмарність, тумани та ін., частина зображення може бути вкрита хмарами або тінями, що в свою чергу зменшує інформативність даних та унеможливує якісне розпізнавання земної поверхні. До активних систем ДЗЗ відносять супутники з радарними сенсорами. Перевагами радарної зйомки є стійкість до погодних умов та можливість проводити спостереження в темний час доби. У зв'язку з цим, радарні зображення можуть бути ефективним інструментом виявлення несанкціонованих вирубок лісів та ведення лісогосподарства.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Протягом останніх двох десятиліть оперативний моніторинг земної поверхні здійснюється за допомогою оптичних зображень надвисокої роздільної здатності, отриманих зі супутників LANDSAT, WorldView або IKONOS. У роботах [1–3] розглянуто супутникові спостереження за змінами лісових насаджень протягом часових інтервалів у 5-10 років. Але незважаючи на це, показники стану лісів суттєво змінюються з року в рік. Отже, зображення, отримані в обмежених часових інтервалах (особливо в період зміни лісових насаджень та їх відновлення), не відображають правдоподібну динаміку. У роботі [4] проведено аналіз ефективності спостереження за допомогою оптичного супутника LANDSAT. Супутник LANDSAT надає найбільш послідовні записи сцен поверхні суші, що дає можливість провести детальний моніторинг багатьох видів змін земельної поверхні. Наступні дослідження якості таких зображень показали, що за двотижневий період зйомки принаймні 80% сцен вкриті густими хмарами та їх тінями. Отже, викиди вуглекислого газу від вирубки лісів, щільна хмарність та тіні є обмеженням для дослідження зміни лісових територій з використанням оптичних супутникових систем. Відносно недавно Європейська космічна агенція (European Space Agency, ESA) вивела на орбіту супутник Sentinel-1, які складається з двох супутників Sentinel-1A та Sentinel-1B, на борту яких встановлена радіолокаційна апаратура з синтезованою апертурою C-SAR, що веде космічну зйомку цілодобово та за будь-яких погодних умов. Перший супутник Sentinel-1A був запущений 3 квітня 2014 року, а Sentinel-1B – 25 квітня 2016 року. Зйомка виконується в C-діпазоні, довжиною хвилі 6 см та з подвійною поляризацією (на вибір HH+HV або VV+VH). Періодичність отримання зображень складає від 5 до 15 діб.

Сучасні методи дослідження збезлісених територій із використанням супутникових даних в основному формуються на виявленні структурних змін спектральних характеристик [5–7], таких як вегетаційний індекс NDVI. Як правило, NDVI відшукує зниження міжрічних сигналів з метою визначення втрати або збільшення росту лісів та є надійним індикатором рослинного покриву. З іншого боку, навіть максимально низьке значення NDVI не є показником втрати лісів, оскільки інші зміни рослинності (наприклад, сівозміна), можуть призвести до аналогічних змін. Більш того, вегетаційні показники часто чутливі до кліматичних змін, що ускладнює дослідження [8].

### Мета дослідження

Метою дослідження є виявлення можливостей супутникових радарних зображень зі супутника Sentinel-1 для та оцінки стану лісових насаджень.

### Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі пропонується метод дешифрування вирубки лісових насаджень за радарними знімками супутника Sentinel-1 для лісгосподарства України території Закарпатської області. Період спостереження – серія різночасових зображень – травень 2015 року та квітень 2016 року. На підставі проведених досліджень у роботі [9], було вирішено проводити аналіз збезлісених територій у весняно-літній період зйомки та використовувати радіолокаційні знімки з подвійною поляризацією VV+VH. Для подальшого дослідження отримані зображення пройшли попередню обробку, загальна схема етапів якої наведена на рис. 1.

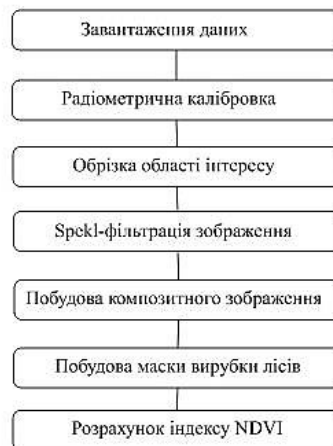


Рис. 1. Етапи попередньої обробки знімків

Для зручності візуальної оцінки зображення були сформовані псевдокольорові RGB-композити. Зображення в поляризації VV відповідає червоному каналу, зеленому каналу – зображення в поляризації VH, синьому каналу – "частка від ділення" зображень в поляризації VV та VH. Для обробки радарних знімків було використано програмне забезпечення SNAP з панеллю Sentinel-Toolbox, спеціально розробленої для обробки даних зі супутників серії Sentinel. Результат етапів обробки наведено на рис. 2.

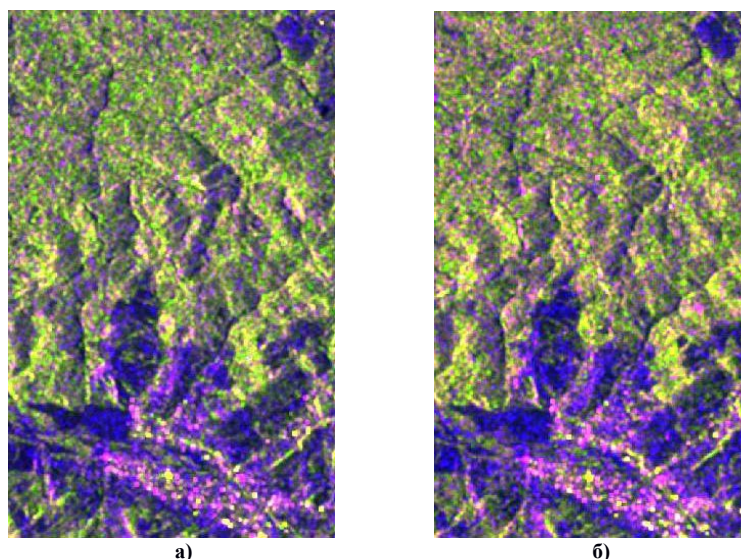
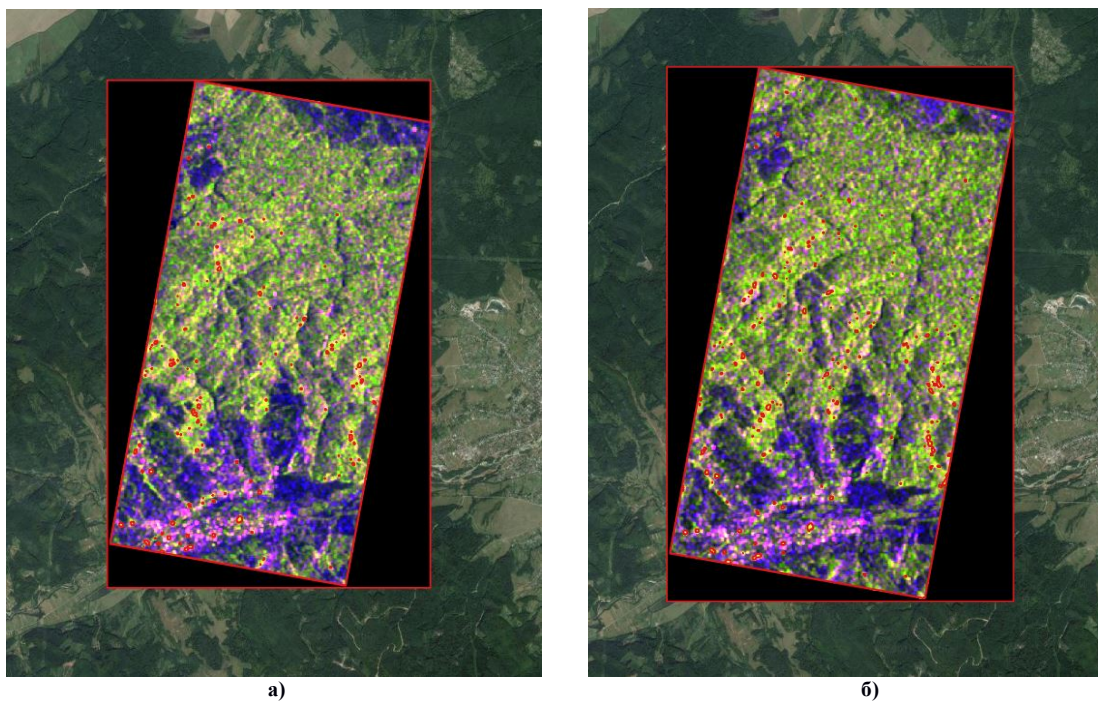


Рис. 2. Композитне RGB зображення:  
а) дата зйомки – травень 2015 року; б) дата зйомки – квітень 2016 року

Для визначення областей вирубки лісів застосовано поріг (threshold) для зворотного розсіювання VH. Результат наведено на рис. 3.

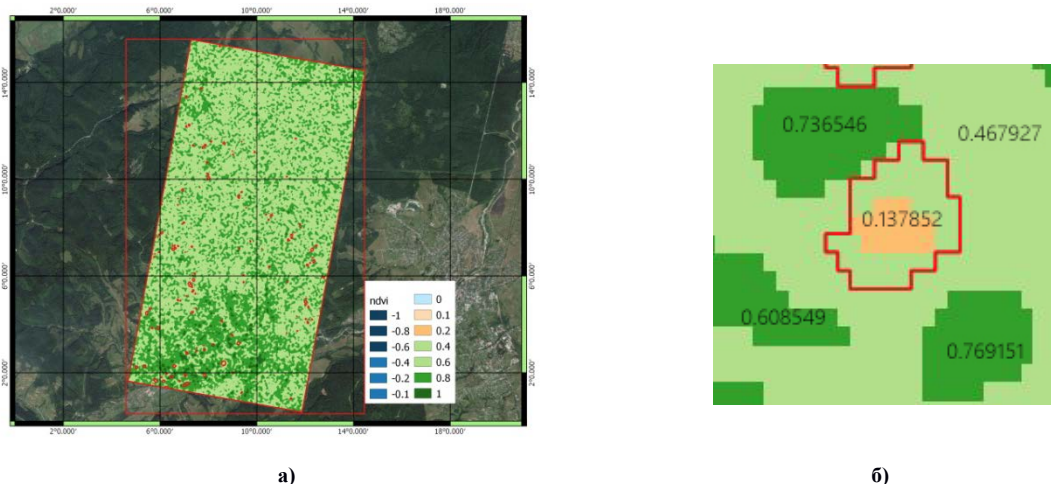


**Рис. 3. Використання маски вирубки лісів:**  
 а) стан території у травні 2015 року; б) стан території у квітні 2016 року

Проведено розрахунок площі вирубки лісових насаджень за різночасовими зображеннями. На зображеннях були дешифровані загальні площі вирубки лісів, які становлять 2.44 га у травні 2015 року та 5.87 га у квітні 2016 року відповідно (рис. 3). Загалом кількість ділянок у 2015 році, на яких втрачено рослинність, становить 253. У 2016 році ця кількість зросла вдвічі і становить 427. Візуальна експертиза оптичних супутникових зображень Landsat-8 дозволила зробити висновок, що у 2014 році визначені ділянки лісу були повністю покриті рослинністю. Крім візуальної експертизи було розраховано нормалізований індекс вегетації (NDVI) за радарними даними на основі порогу чутливості (threshold). У весняно-осінній період лісові насадження мають найбільше значення NDVI. На відміну від оптичного NDVI, радарний NDVI заснований на просторовому відношенні поляризаційних режимів:

$$\text{Radar NDVI} = \frac{VV - VH}{VV + VH}, \tag{1}$$

де VV – подвійна вертикальна поляризація, VH – перехресна вертикально-горизонтальна поляризація. На рис. 4 наведено графічний результат розрахунку значень радарного NDVI.



**Рис. 4. Карта NDVI частини лісогосподарства у Закарпатській області України, червень 2016 року:**  
 а) загальна сцена; б) масштабована ділянка лісових насаджень



Для відображення індексу NDVI використовується стандартизована безперервна градієнтна шкала, яка показує значення в діапазоні від  $-1$  до  $1$ . Природні об'єкти або міські забудови, автошляхи, що не пов'язані з рослинністю, мають фіксовані значення, що дозволяє безпомилково їх ідентифікувати. В свою чергу, рослинність не може приймати значення NDVI менше  $0$ . Позначці від  $0,4$  до  $0,6$  відповідають території з розрідженою рослинністю, від  $0,6$  до  $1$  – області з густою рослинністю. Території, що є наслідком вирубки лісів або втрати лісових насаджень, мають значення від  $0,1$  до  $0,2$ .

#### Висновки

У роботі проведено комп'ютерний аналіз радарних зображень високої роздільної здатності з метою моніторингу стану лісових насаджень. Проведені дослідження показали, що супутникові радіолокаційні знімки дають можливість якісно визначати області вирубки лісових насаджень та оцінювати стан рослинності із застосуванням нормалізованого вегетаційного індексу. Порівняння серій різночасових знімків дають можливість проводити оперативний моніторинг у важко доступній місцевості. З іншої сторони, у ході роботи було виявлено такий недолік радарних зображень як зашумленість даних, що потребує додаткових досліджень, які будуть розглянуті у наступних роботах.

#### Список використаної літератури:

1. Hnatushenko V.V. Satellite monitoring of deforestation as a result of mining / V.V. Hnatushenko, D.K. Mozgovyi, V.V. Vasyliiev // Scientific bulletin of National Mining University. – State Higher Educational Institution "National Mining University", Dnipro, 2017. № 5, 2017. С. 94-99.
2. Mayaux, P.; Pekel, J.F.; Desclee, B.; Donnay, F.; Lupi, A.; Achard, F.; Clerici, M.; Bodart, C.; Brink, A.; Nasi, R.; et al. State and evolution of the african rainforests between 1990 and 2010. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2013, doi:10.1098/rstb.2012.0300.
3. Hansen, M.C.; Stehman, S.V.; Potapov, P.V. Quantification of global gross forest cover loss. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2010, 107, 8650–8655.
4. Jin, S.; Sader, S.A. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sens. Environ.* 2005, 94, 364–372.
5. Kennedy, R.E.; Yang, Z.; Cohen, W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. Landtrendr—Temporal segmentation algorithms. *Remote Sens. Environ.* 2010, 114, 2897–2910.
6. Kennedy, R.E.; Yang, Z.; Cohen, W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. Landtrendr—Temporal segmentation algorithms. *Remote Sens. Environ.* 2010, 114, 2897–2910.
7. Kennedy, R.E.; Cohen, W.B.; Schroeder, T.A. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics. *Remote Sens. Environ.* 2007, 110, 370–386.
8. Zhu, Z.; Woodcock, C.E.; Olofsson, P. Continuous monitoring of forest disturbance using all available Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 2012, 122, 75–91.
9. Kleynhans, W.; Olivier, J.C.; Wessels, K.J.; Salmon, B.P.; van den Bergh, F.; Steenkamp, K. Detecting land cover change using an extended kalman filter on MODIS NDVI time-series data. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2011, 8, 507–511.
10. AgriSAR 2009. Technical Assistance for the Implementation of the AgriSAR 2009 Campaign /Final Report. Vol. 1 Executive Summary, Data Acquisition, Data Simulation / AgriSAR Team. – MDA Systems Ltd., 2011. – 590 p.

УДК 004.08

В.В. ГРИЦИК

Національний університет "Львівська політехніка"

### СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ЗАВДАНЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЕПОХИ 4-ОЇ ПРОМИСЛОВОЇ РЕВОЛЮЦІЇ

*У роботі досліджено задачі, які поставлені перед інформаційними технологіями в епоху 4-ої промислової революції (Industry 4.0). Робота зорієнтована на пошук і формалізацію ключових вимог до інтелектуальних інформаційних технологій. Подано аналіз і представлено прогноз розвитку інформаційних технологій на найближчі 10-15 років. Зокрема, у роботі послідовно розглянуто основні чинники впливу на розвиток інформаційних технологій, їхні комбінації, виведено найбільш ймовірний наслідок і можливі варіанти реакції. Метою роботи є стимулювання шляхів пошуку варіантів співіснування людей і адаптивних технологій.*

*Ключові слова:* 4-а промислова революція, інтелектуальні інформаційні технології.

В.В. ГРИЦИК

Національний університет "Львовская политехника"

### СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ЗАДАЧ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЭПОХИ 4-Й ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕВОЛЮЦИИ

*В работе исследованы задачи развития информационных технологий в эпоху 4-й промышленной революции (Industry 4.0). Работа ориентирована на поиск и формализацию основных требований к интеллектуальным информационным технологиям. Проведено анализ и прогноз развития информационных технологий в ближайшие 10-15 лет. В частности, в работе последовательно рассмотрены основные факторы влияния на развитие информационных технологий, их комбинации, выведено наиболее вероятный результат и возможные варианты реакции. Целью работы является стимулирование путей поиска вариантов сосуществования людей и адаптивных технологий.*

*Ключевые слова:* 4-я промышленная революция, интеллектуальные информационные технологии.

V.V. HRYTSYK

Lviv Polytechnic National University

### INFORMATION TECHNOLOGIES OBJECTIVES OF THE 4TH INDUSTRIAL REVOLUTION ARE SYSTEMIZED

*Artificial Intelligence problems that was unbelievably to solve before, thus are solved now. Knowledge of deep learning algorithms did possible to create voice recognition systems. Self-driving cars – it is reality. Starting to work computer vision and computer sensibility. Machines analyzing, planning, creating, intelligence decision making. All those show us that theoretical and applied methods and realizations are now, when we can prognosis: people will lose control for decision making at least 99% of it. Intelligence and not machines will take the control from humans.*

*The paper investigates the tasks set of information technologies in the era of the 4th Industrial Revolution (Industry 4.0). The work focuses on the search and formalization of key requirements for intelligent information technology. The analysis and forecast of the development of information technologies for the next 10-15 years are presented. In particular, the main factors influencing the development of information technologies, their combinations, the most probable consequence and possible variants of the reaction are considered in the work. The purpose of the work is to stimulate the search for variants of coexistence of people and adaptive technologies, since in situations where in the next few decades the productivity of systems and means of artificial intelligence can exceed the human capabilities at times, such a statement of the problem is the best approach. In the longer run, the main task is to attempt to outline the direction in which the non-people (another kind of smart, adaptive information technology, etc.) will outperform people by the basic quality of a person, which allowed a person to be at the top of the food chain – intelligence. The conditions, circumstances and results of technological changes are studied in the paper. The influence on productivity that was caused by certain factors during industrial revolutions was investigated.*

*The author sees the result of revolution of extreme automation in all spheres of life. I note that the result of the author sees the introduction of "weak systems based on weak artificial intelligence" or systems and their intelligent components that will solve local problems.*

*Keywords:* Industrial 4.0, intelligence information technologies.

**Постановка проблеми**

Складність досліджуваної проблеми полягає у тому, що ми живемо в час актуальності проблеми, і відповідно, можемо упускати деякі важливі характеристики (які впливають на остаточний результат), а деякі риси потребуватимуть корекції .

Сьогодні в світі існують стійкі тенденції до спроб замінити людину у всіх процесах діяльності, де це можливо. Комп'ютерна техніка настільки міцно вкоренилась в нашому суспільстві, що на сьогодні вже не можна уявити собі жодного виду діяльності, не пов'язаного, так чи інакше, з комп'ютером [1–8, 10–14].

Узагальнюючи огляд досліджень та впроваджень інтелектуальних ІТ в ЄС та США: ЄС через програму FP7 профінансував розробки складних технік для розуміння аудіовізуальних відображень впродовж життя для типових і нетипових популяцій [9]. Зараз все актуальнішими стають структури, що масштабовано відтворюють роботу людського мозку (ті чи інші задачі, які традиційно ним виконуються). Зокрема на цю тематику через програму FP7 з 2007 виділено 1.9 млрд. євро на 1200 проектів зі 1200 учасниками.

Сьогодні проблеми ШІ, які вважалися невіршуваними ще декілька років назад, вже вирішені: розпізнавання голосу, обличчя, номерних знаків, самокеровані авто тощо – реальність. Усе це показує, що еволюція (теоретичні, прикладні розробки) дійшли до того моменту, коли в прогнозі розвитку людства однією із найбільш ймовірних моделей розвитку є та модель, при якій люди повністю або на 99% втрачають контроль за розвитком подій. Можливо таке припущення для людей, поза сферою досліджень ІТ, видається дещо передчасним, але гіршим сценарієм є те, що це єдино можлива модель розвитку. Поштовхом до цього дослідження було кілька факторів:

по-перше – це 4-а промислова революція (сьогодні у 1-му десятку країн, що задають темпи розвитку на усій планеті, ІТ та виробництво сплелися настільки, що участь у технологічному процесі людей – це скоріше швидко слабнуча економічна складова, ніж технологічна). Сюди ж можна додати і сферу обслуговування: фінансові і страхові сектори, Інтернет послуги, продажі тощо.

по-друге – це стрімкий розвиток нових прикладних методів реалізації комп'ютерного мислення;

по-третє – це нові прикладні підходи до сприйняття реальності комп'ютерними системами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Побудуємо послідовність розвитку виробничих технологій. Перша промислова революція призвела до переходу від ручного до механізованого виробництва через використання парового двигуна, Друга промислова революція спричинила перехід до масового виробництва, через використання електродвигуна і конвеєра. Третя промислова революція призвела до переходу на автоматизоване виробництво через використання комп'ютерів та інформаційних технологій [1, 2, 4, 6, 7] (табл. 1).

Таблиця 1

Зміна технологічних укладів

	Період	Інновації	Результат
1-а промислова революція	Кінець 18-початок 19 ст.	Парові двигуни, ткацькі станки, металургія, транспорт, механічні пристрої	Перехід від ремісництва до промислового виробництва і розвитку транспорту.
2-а промислова революція	Кінець 19-початок 20 ст.	Електроенергія, сталь, нафтова і хімічна промисловість, телефон і телеграф, конвеєр (масове виробництво)	Комунікаційні та механічні інформаційні технології, залізничний транспорт та парові судна, електроенергія, розподіл праці і масове виробництво.
3-а промислова революція	Третя четвертина 20ст.	Електроніка, цифрові технології (їх застосування у виробництві)	Електроніка і робототехніка, мінімізація участі людей у виробництві товарів. Акцент на людино-машинний інтерфейс в ІКТ.
4-а промислова революція	2011 рік	Глобальні промислові мережі, інтернет речей, конкурентні відновлювальні джерела енергії, перехід від металургії до композитних матеріалів, вертикальні ферми і синтез їди, 3D принтери, самокерований транспорт, біотехнології (генетична модифікація), ШНМ і штучний інтелект,	Глобальні мережі: інформаційні, комунікаційні, промислові (мережевий і колективний доступ, хмарні обчислення); Розподілене та адаптивне виробництво, обслуговування – усунення людей від участі у виробництві товарів і надання послуг. Акцент на машино-машинний інтерфейс в ІКТ і кіберфізичні системи.

Вперше термін "Industrie 4.0" (укр. "Промисловість 4.0") став відомим у квітні 2011 року, коли на Ганноверському ярмарку група "Industrie 4.0" виступила з ініціативою підвищення конкурентоздатності німецької економіки [3, 6].

У вузькому смислі "Промислова революція 4.0" – це назва однієї із 10 державних Hi-tech стратегій Німеччини до 2020 року. Стратегія описує концепцію розумного виробництва (Smart Manufacturing), що ґрунтується на інтеграції речей і послуг (Internet of Things and Services) у глобальній Інтернет.

У широкому смислі "Промислова революція 4.0" – це процеси (методи і методики) обміну даними, що включає в себе кіберфізичні системи, інтернет речей, хмарні обчислення. "Промислова революція 4.0" є новим рівнем організації виробництва і управління ланцюжком створення вартості впродовж усього життєвого циклу продукції (речі або послуги).

**Означення.** Четверта промислова революція (англ. The Fourth Industrial Revolution [1, 2], також англ. Industry 4.0, нім. Industrie 4.0 [3], укр. Промисловість 4.0 [4]) – поняття, що означає розвиток і злиття автоматизованого виробництва, обміну даних і виробничих технологій в єдину саморегульовану систему, з як найменшим або взагалі відсутнім втручанням людини у виробничий процес [5].

Термін був визначений як "збірне поняття для технологій і концепцій організації ланцюжка створення додаткової вартості" із використанням кіберфізичних систем, Інтернету речей, Інтернету послуг, розумних заводів [6]. Фаза промислової революції, яка характеризується злиттям технологій, що розвиває межі між фізичною, цифровою та біологічною сферами [7].

"Мова йде про хвилю відкриттів, обумовлених розвитком можливостей встановлення зв'язку: роботи, дрони, розумні міста, штучний інтелект і дослідження головного мозку" – говорить Швабе.

Отже, узагальнимо:

Промислова революція 4.0 – це перехід на повністю автоматизоване цифрове виробництво і обслуговування, що реалізується (управління і виконання) інтелектуальними системами в режимі реального часу при постійній взаємодії із зовнішнім середовищем і глобальною інтеграцією впродовж усього життєвого циклу продукції (речі чи послуги).

**Мета дослідження**

У роботі буде послідовно розглянуто усі три згадані фактори, їхні комбінації, виведено найбільш ймовірний наслідок і можливі варіанти реакції. Робота стимулювати шляхи пошуку варіантів співіснування, оскільки в умовах, коли у найближчі кілька десятиліть ШІ може в рази перевершувати можливості людини, така постановка проблеми є найкращим підходом. Але основною задачею є спроба накреслити напрямок до ситуації, в якій не люди (інший вид розумного) будуть перевершувати людей по основній якості людини, яка дозволила людині опинитися на вершині харчового ланцюжка.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Розглянемо ще одне визначення, яке є активним учасником "4-ї промислової революції":

Кіберфізична система (cyber physical system (CPS)) – це механізм, який контролюється або управляється комп'ютерним алгоритмом і є інтегрованим з Інтернетом і його користувачами.

Функції кіберфізичної системи подано в табл.2.

Таблиця 2

Кіберфізична система для виробництва

Рівень	Функції	Параметри (характеристики)
5	Конфігураційний рівень (машино-машинний інтерфейс)	– Функціональна стійкість системи (само конфігурація при пошкодженнях, збуреннях тощо); – Самоналаштування для різних компонентів системи;
4	Рівень пізнання (машино-людинний інтерфейс)	– Інтегрована симуляція і синтез; – Віддалена візуалізація для людини; – Спільна діагностика та прийняття рішень
3	Кібернетичний рівень	– Синхронна модель для компонентів і машини; – Часова машина для варіантів ідентифікації і пам'яті; – пошук подібності при аналізі даних (кластеризація, границі тощо)
2	Рівень трансформації даних в інформацію	– Розумний аналіз для компонентів машинного здоров'я; – Кореляція багатовимірних даних; – Передбачення втрати продуктивності та деградації систем.
1	Рівень розумного з'єднання	– Сенсорні мережі; – Безкоштовні / платні прив'язки; – Plug & play

На рівні "Підключення" пристрої можуть бути спроектовані для самостійного підключення та самоаналізу за поведінку. На рівні "Трансформації" дані, отримані від самостійних пристроїв та датчиків, вимірюють особливості критично важливих проблем із власними усвідомленнями, машини можуть використовувати цю інформацію для самостійного прогнозування своїх потенційних проблем. На рівні "Кібернетичний" кожна машина створює власного "близнюка", використовуючи інструментальні функції, і далі характеризує схему здоров'я машини на основі методології "Time-Machine". Встановлений "близнюк" в кібер-просторі може виконувати самостійне порівняння для однорангової продуктивності для подальшого синтезу. На рівні "Пізнання" результати самооцінки та параметри процесів будуть представлені користувачам. На рівні "Конфігурація" машина або виробнича система можуть бути переналаштовані на основі критеріїв пріоритету та ризику для досягнення стійкої продуктивності [19].

Оригінальна ідея моделі близнюка взята з [20], в якій фізична операція була пов'язана з віртуальною операцією за допомогою інтелектуального розумового агента. Детальна версія цієї концепції представлена в [21, 22].

Передбачається, що кіберфізичні системи будуть об'єднуватися в одну мережу, зв'язуватися одна з одною в режимі реального часу, самоналаштовуватися і навчатися новим моделям поведінки. Тобто якщо в умовах Третьої промислової людина все ще контролює і спрямовує дію автоматів, виправляє збої в роботі, то в Четвертій відкривається перспектива того, що це робитимуть самі "розумні" машини. Передбачено, що ці системи об'єднуватимуться в одну мережу за допомогою так званого інтернету речей, контактуватимуть між собою в режимі реального часу. Відтак вони вибудовуватимуть виробництво й постачання з меншою кількістю помилок, підтримуватимуть контакт із уже виробленими товарами й адаптуватимуться під нові потреби споживачів без участі людини. Наприклад, автомобіль Tesla, отримуючи оновлення через мережу й обмінюючись інформацією зі смартфоном користувача, вивчає його звички, адаптується до маршрутів, розраховує час виїзду залежно від планів у календарі й місця наступної зустрічі, прогріває салон перед розрахунковим часом виходу господаря з дому.

Однією з основних тем Всесвітнього економічного форуму в Давосі знову стала Четверта промислова революція – 27 засідань фонду у 2017 році були присвячені Індустрії 4.0.

Для ефективного прогнозування перебігу "промислової революції" розглянемо взаємозв'язки джерел енергії, винаходів та організації виробництва (табл. 3).

Таблиця 3

Взаємозв'язок сировини, енергії, організації виробництва

	Сировина	Джерела і способи передачі енергії	Організація виробництва і управління
1-а промислова революція	Вугілля і залізо	Головна технологія – паровий двигун: перетворення теплової енергії в механічну; металургія	Механізація окремих елементів.
2-а промислова революція	Вугілля,	Електроенергія, сталь і обробка металів, нафтова і хімічна промисловість, телефон і телеграф,	Конвеєр – об'єднання окремих механізованих елементів в один промисловий ланцюжок; Зародження теорії управління.
3-а промислова революція	Нафта, уран	Електроніка, цифрові технології (їх застосування у виробництві), атомна енергетика, відеотрансляція, Інтернет	Теорія автоматичного управління та кібернетика; Теорія людино-машинної взаємодії. Теорія автоматичного прийняття рішень; теорія перевиробництва.
4-а промислова революція	Відновлювальні джерела енергії.  Цифрова сировина	Технології: мережеві, адаптивні, переробки, 3D друку і синтезу матеріалів.  Технології синтезу з цифрової сировини.	Теорія машино-машинної взаємодії. теорія обробки великих даних;  Теорії: синтезу великих даних*, самонавчальних, самовідтворюваних, самовідновлюваних систем.

\* дані-продукти відомі нам усім – це перш за все результати пошуку в пошукових системах.

Першими кроками світу до нової промислової революції стали хмарні технології, розвиток способів збору і аналізу великих об'ємів даних, біотехнології, безпілотні автомобілі і медицина, заснована на 3D-друку.

Сьогодні, коли 4-а промислова революція – очевидна реальність – уже чітко видно, що вже у найближчому майбутньому (щонайбільше до 2030 року) в ланцюжку видобування сировини – виробництво – продаж – доставка – клієнт, людина може стати зайвою. Сьогодні, ми бачимо як руйнуються останні bastioni конкурентної переваги людства – творчість, розробка, дизайн, аналіз, планування тощо. Наразі це



виглядає лише як елементи яскравих картинок: комп'ютерний інтелект обіграв чемпіона гри в Го [8], чи самокеровані автомобілі планують маршрути і формують комфортні умови, чи боти які обслуговують Інтернет сервіси, чи роботи – офіціанти, покупка-продаж, проектування замовлень без участі людей тощо. Усі ці речі є поза конкуренцією хоча б тому, що у країнах двигунах планетарної економіки, робототехніка вже витіснила людей з виробництва та продовжує витісняти з інших галузей.

У цій тенденції еволюційних змін військові також не залишаються осторонь: самонавідна зброя, що покликана швидко реагувати на нові ситуації уже витісняє людей з ближнього бою [рої, лазерні системи перехоплення ракет, контр батареїні системи тощо]. Мова йде не тільки про повітряний чи морський простір, на землі прикладами є всюдихідні військові замовлення [9]. І чим швидшими ставатимуть такі системи, тим вище по ланцюжку прийняття рішень вони просуватимуться – адже, якщо по одну сторону рішення приймають роботи, то по іншу сторону їх теж повинні приймати швидко і без помилок. Інакше за долі секунди цієї іншої сторони просто не буде. Зростають швидкості і у військових вже немає часу на прийняття рішень – або рішення приймає комп'ютер або майбутнього немає. Прикладом, який можна представляти як класичний – може служити ситуація, коли час підльоту ядерної ракети США є меншим з ланцюжок прийняття рішень у Кремлі. Те саме стосується і ракет і літаків (тепер ще з'являться і рої ботів) – або комп'ютер приймає рішення, або ... фактично це вже змінило погляди на ведення воєн – зараз розвивається стратегія вигравання ядерної війни без ядерними засобами.

Альтернативна енергетика у 40% дозволяє передбачити повну незалежність таких систем від людей і їх думки про потребу таких систем. Самовідновлюваність таких систем із сучасними системами виробництва, навігації і доставки – не є проблемою. А попереду їх (ці автономні агенти) очікує ще 3D друк. А вертаючись до військових – друк роїв на потребу прямо на літаку – це зовсім не фантастична ілюзія.

Можна пообіцяти не створювати автономних роботів для використання у військових цілях (як це зробили Clearpath Robotics), але що робити, якщо таких випустять опоненти?

Ще важча для прогнозу ситуація із настанням точки сингулярності.

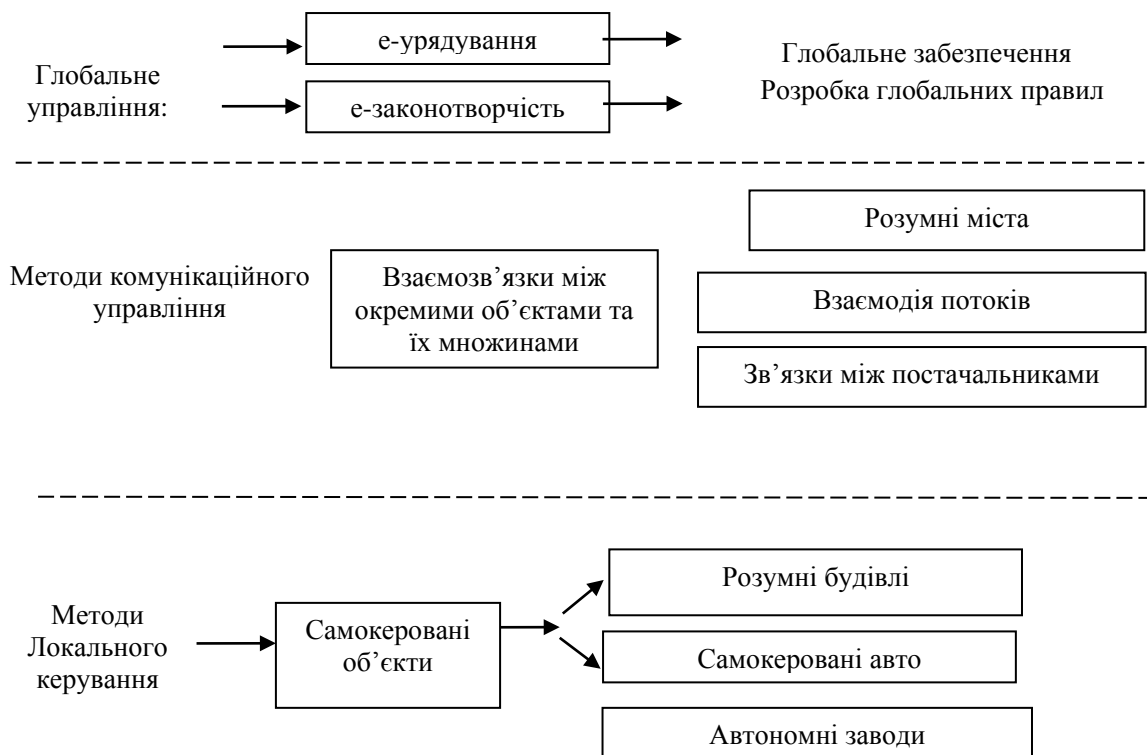


Рис. 1. Приклад трьохрівневої категоріальної архітектури.

### Висновки

Аналізуючи пройдені етапи та теперішній стан (Інтернет речей (IoT), Industrial Internet of Things (IIoT), Інтернет цінностей (IoV), Інтернет усього (IoE)) автор (враховуючи що він живе в Україні, а не в країні, що знаходиться на вістрі технологічних розробок), пробує дати прогноз на розвиток технологій у цій роботі, бачить результатом революції екстремальну автоматизацію у всіх сферах життя – методи штучного інтелекту будуть застосовуватися в усіх сферах людського життя. Зауважу, що результатом буде впровадження "слабкого ШІ" або систем та їх інтелектуальних компонентів, що вирішуватимуть локальні задачі.

Однак, такий висновок (зі слабким штучним інтелектом у всіх сферах життя) є цінним лише для класичних форм. Основна проблема може полягати у альтернативних рішеннях. Наприклад, гіпотеза про те, що інтелект і раціональна поведінка не виникають у нематеріальних (не впроваджених) системах, таких як системи доведення теорем або традиційних експертних системах. Інтелект є продуктом взаємодії певної багатозарової системи зі своїм оточенням (рис. 1). А інтелектуальна поведінка виникає із взаємодії архітектури, які організовані, з більш простих сутностей.

Головною ідеєю цього підходу є припущення, що „при побудові великих інтелектуальних систем представлення є неправильною одиницею абстракції”. Таким чином явні представлення світу можна реалізувати лише на нижчих рівнях інтелекту. Категоріальна архітектура передбачає побудову завершеної системи на кожному рівні програмної архітектури і забезпечити надійність її функціонування.

Отже, по завершенні "індустріальної революції" є висока ймовірність появи штучного інтелекту високого рівня.

#### Список використаної літератури

1. Klaus Schwab. The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond ((англ.)). World Economic Forum. E-ресурс: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond>;
2. Клаус Шваб. Четверта промислова революція: як до неї готуватися (переклад). Національний університет біоресурсів і природокористування України. E-ресурс: <http://nubip.edu.ua/node/23076>;
3. H. Kagermann, W.-D. Lukas, W. Wahlster. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution ((нім.)). VDI nachrichten. E-ресурс: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>;
4. Фабіан Шмідт, Захар Бутирський. Ганноверський ярмарок: інтернет зливається з заводом. Deutsche Welle. E-source: <http://www.dw.com/uk/ганноверський-ярмарок-інтернет-зливається-з-заводом/a-16728837>;
5. Олександр Крамар. Погляд із периферії. E-source: <http://tyzhden.ua/Economics/162508>;
6. Mario Hermann, Tobias Pentek, Boris Otto. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. E-source: [http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4\\_0-Scenarios.pdf](http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf);
7. Klaus Schwab. The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond. E-source: <https://www.foreignaffairs.com/articles/2015-12-12/fourth-industrial-revolution>;
8. e-source: <https://hi-news.ru/games/algorithm-google-obygral-60-igrokov-v-go-bez-edinogo-porazheniya.html>;
9. Boston dynamic. E-source: <http://www.bostondynamics.com/>
10. Asilomar AI Principles. E-source: <https://futureoflife.org/ai-principles/>
11. Безумовний дохід. E-source: <http://ua.euronews.com/2017/02/21/universal-income-a-game-changer-or-futile>;
12. E-source: <http://www.businessinsider.com/bank-of-america-wonders-about-the-matrix-2016-9?IR=T>
13. Business Insider, <http://www.businessinsider.com/cyborgs-are-the-future-of-financial-advice-2017-2>;
14. <https://www.wsj.com/articles/how-ai-is-transforming-the-workplace-1489371060>
15. <http://science.sciencemag.org/content/354/6314/900>;
16. [https://www.buzzfeed.com/venessawong/the-computerized-lettuce-factory-of-the-future?utm\\_term=.ksDgr2oOq#.rtwBvDLwn](https://www.buzzfeed.com/venessawong/the-computerized-lettuce-factory-of-the-future?utm_term=.ksDgr2oOq#.rtwBvDLwn);
17. <https://futureoflife.org/ai-principles/>
18. Nick Bostrom. Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies.// Oxford. – 2014. – 411p.
19. Lee, Jay; Bagheri, Behrad; Kao, Hung-An (January 2015). "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems". Manufacturing Letters. **3**: 18–23. doi:10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
20. Lee, Jay (January 1998). "Teleservice engineering in manufacturing: challenges and opportunities". International Journal of Machine Tools and Manufacture. **38**: 901–910. doi:10.1016/S0890-6955(97)00135-1.
21. Lee, Jay (1993). "Analysis of machine degradation using a neural network based pattern discrimination model". Journal of Manufacturing Systems. **12**: 379–387. doi:10.1016/0278-6125(93)90306-E.
22. [https://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical_system)

УДК 004.82 : 004.896

М.В. ДАВИДОВСЬКИЙ

Запорізький обласний інститут післядипломної педагогічної освіти

**ЕВОЛЮЦІЙНО-ФРАГМЕНТАРНИЙ МЕТОД УЗГОДЖЕННЯ ОНТОЛОГІЙ**

Сьогодні розвиток семантичних технологій призвів до широкого застосування методів і моделей подання знань в сучасних корпоративних інформаційних системах. Однак складність і динамізм предметних областей, які моделюються, породжують проблему гетерогенності моделей подання знань. Ця проблема може бути вирішена за допомогою спеціальних методів узгодження моделей подання знань. Одним з методів узгодження моделей знань, представлених у вигляді формальних онтологій (логічних описових теорій) є метод, заснований на використанні онтологічних контекстів. Цей метод дає якісно хороший результат, але задача побудови множини контекстів на основі перебору концепції онтології, а також задача знаходження відображення множин цих контекстів є NP-повними задачами. У даній статті автор представляє еволюційно-фрагментарний метод, що дозволяє з прийнятною складністю вирішувати задачу узгодження онтологій на основі побудови множин онтологічних контекстів.

*Ключові слова:* онтологія, узгодження онтологій, онтологічні контексти, еволюційно-фрагментарний алгоритм.

М.В. ДАВИДОВСКИЙ

Запорожский областной институт последипломного педагогического образования

**ЭВОЛЮЦИОННО-ФРАГМЕНТАРНЫЙ МЕТОД СОГЛАСОВАНИЯ ОНТОЛОГИЙ**

Сегодня развитие семантических технологий привело к широкому применению методов и моделей представления знаний в современных корпоративных информационных системах. Однако сложность и динамизм моделируемых предметных областей порождают проблему гетерогенности моделей представления знаний. Эта проблема может быть решена с помощью специальных методов согласования моделей представления знаний. Одним из методов согласования моделей знаний, представленных в виде формальных онтологий (логических описательных теорий) является метод, основанный на использовании онтологических контекстов. Этот метод даёт качественно хороший результат, но задача построения множества контекстов на основе перебора концепций онтологий, а также задача нахождения отображения множеств этих контекстов являются NP-полными задачами. В данной статье автор представляет эволюционно-фрагментарный метод, позволяющий с приемлемой сложностью решать задачу согласования онтологий на основе построения множеств онтологических контекстов.

*Ключевые слова:* онтология, согласование онтологий, онтологические контексты, эволюционно-фрагментарный алгоритм.

M.V. DAVIDOVSKY

Zaporizhzhya Regional Institute of Postgraduate Pedagogical Education

**AN EVOLUTIONARY-FRAGMENTARY METHOD FOR ONTOLOGY MATCHING**

Today the development of semantic technologies has led to a wide application of knowledge representation methods and models in modern enterprise information systems. However, the complexity and dynamism of the modeled domains give rise to the problem of heterogeneity of knowledge representation models. This problem can be solved with the help of special methods for reconciling knowledge representation models. One of the methods for reconciling knowledge models represented in the form of formal ontologies (logical descriptive theories) is the ontology matching method based on the use of ontological contexts. This method produces qualitatively good results, but the task of constructing a set of contexts using exhaustive search of ontology concepts, as well as the task of finding the mapping between the sets of these contexts – are NP-complete problems. In this article, the author presents an evolutionary-fragmentary method that allows solving the ontology matching problem on the basis of the sets of ontological contexts, with acceptable complexity.

*Keywords:* ontology, ontology matching, ontological contexts, evolutionary-fragmentary algorithm.

**Problem statement**

Let us consider the process of matching 2 ontologies  $O^s$  and  $O^t$ . At first, let us provide necessary definitions.

**Definition 1.** Ontology  $O$  – is a tuple  $O = \langle C, R, I, T, V, \leq, \perp, \in, = \rangle$ , where  $C$  – is a set of concepts (or classes);  $R$  – a set of relations (object properties and datatype properties);  $I$  – a set of individuals (or instances);  $T$  – a set of data types;  $V$  – a set of values;  $\leq$  – reflexive, anti-symmetric, and transitive relation on  $(C \times C) \cup (R \times R) \cup (T \times T)$ , called specialization, (subsumption) that form partial orders on  $C$  and  $R$ , which called concept and property hierarchies respectively;  $\perp$  – irreflexive and symmetric relation on  $(C \times C) \cup (R \times R) \cup (T \times T)$ , called exclusion;  $\in$  – relation over  $(I \times C) \cup (V \times R)$ , called instantiation;  $=$  – relation over  $I \times P \times (I \cup V)$ , called assignment; (sets  $C, R, I, T, V$  pairwise disjoint).

**Definition 2.** *Ontology matching* is a process of discovering the correspondences (or mappings) between the elements of different ontologies. A *mapping* (or a *mapping rule* [1]) is a tuple  $m = \langle e, e', \mathfrak{R}, n \rangle$ , where:  $e, e'$  are the elements  $C, R, I, T, V$  of the respective ontologies  $O$  and  $O'$ ;  $\mathfrak{R} = \{ \subset, \subseteq, \equiv, \supset, \supseteq \}$  is a set of relations; and  $n$  is a confidence value (typically in the range of  $[0,1]$ ).

**Definition 3.** *Ontology alignment* is denoted as the result of applying the discovered set of mapping rules to the respective ontologies.

Based on these definitions we define the problem of ontology matching in decentralized settings as that of finding an alignment between ontologies  $O^s$  and  $O^t$  associated with operational agents  $Ag^s$  and  $Ag^t$ . There could be some other parameters that can extend the definition of matching: (i) the use of some off-the-shelf input alignment  $A$ ; (ii) the matching parameters, such as predefined weights and thresholds; and (iii) external resources, such as common knowledge and domain specific thesauri (see Figure 1 below).

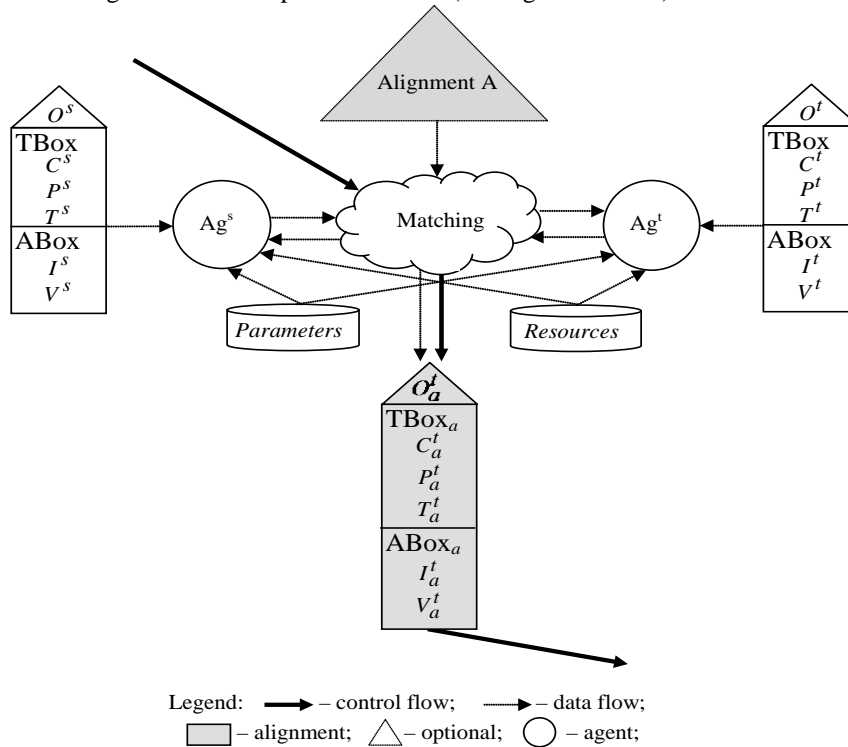


Fig. 1. Ontology matching operation.

Note that in general alignments can be of various cardinalities: 1:1 (one-to-one), 1:m (one-to many), n:1 (many-to-one) or n:m (many-to-many). Recall that, given two ontologies, a correspondence (or a mapping) is a 4-tuple:  $m = \langle e, e', \mathfrak{R}, n \rangle$ , where:  $e, e'$  are the elements of  $C, R, I, T, V$  of corresponding ontologies  $O^s$  and  $O^t$ ;  $\mathfrak{R} = \{ \subset, \subseteq, \equiv, \supset, \supseteq \}$  is a set of relations;  $n$  – is a confidence value (typically in the range of  $[0,1]$ ), reflecting the degree of confidence regarding the correctness of the mapping – the higher the confidence, the higher the likelihood that the relation holds.

**Analysis of recent research and publications**

Today, one of the topical tasks in the development of modern enterprise information systems is knowledge representation. This is confirmed by numerous publications describing applications of knowledge representation methods and models in the broadest spheres of industry and business (see, for example, [2,3,4,5] and many others).

Knowledge representation facilitate the use of human experience in decision-making in various professional fields, accumulated by leading professionals and experts, and allow using and disseminating this experience by developing appropriate automated decision-making technologies [6], management [7], design [8] and production [9] technologies, as well as other advanced modern computer technologies in industry [10]. Indeed, knowledge-based information systems allow solving different topical problems with greater efficiency and flexibility. However, the complexity and dynamism of the modeled subject domains cause heterogeneity and ambiguity of knowledge representation models. Therefore, knowledge-based information systems inevitably encounter the problem of knowledge heterogeneity. This problem can be solved by aligning the knowledge representation models, i.e. discovering the semantic relationships between these models or, in other words, their matching and harmonization.

Ontology matching methods can be classified in different ways depending on their genesis and the viewpoint on the ontology alignment problem. Most of the surveys of ontology matching methods and approaches confirm this fact. For example, in [11], Rahm and Bernstein overview the methods aimed at alignment problems arising in solving various tasks in the field of database applications such as data warehousing, semantic query processing, data integration, etc. Kalfoglou and Schorlemmer [12] consider the problem of ontology alignment in the emerging field of artificial intelligence and focus on finding mappings between ontologies used by different applications in distributed environments, such as the Semantic Web. For detailed overview and analysis of different ontology matching methods a reader may refer to our papers [13] and [14].

In [15], we proposed an approach to matching different, but semantically overlapping knowledge models represented in the form of formal ontologies (logical descriptive theories). The approach is iterative and is based on the implementation of negotiations between intelligent software agents, where at each round of negotiations, agents compare ontological contexts and use propositional substitutions to reduce the semantic difference between the ontological contexts. In [16] we showed that the approach gives good results in terms of the quality of the resulted ontology alignment. However, when using the approach in industrial knowledge-based systems, some difficulties may arise due to the high computational complexity of the algorithm.

#### The purpose of the study

In [17] the author showed that in general, mathematically the problem of constructing a set of contexts can be actually reduced to a simple search of the stars that are the subgraphs of a given graph (where the graph represents the structure of the knowledge representation model).

In addition, in [17] a mathematical formulation of the problem of constructing a set of ontology contexts was presented in the form of a combinatorial problem on graphs (the problem of finding a specific covering of a graph by stars). Moreover, special fragmentary algorithms were proposed that allows constructing sets of contexts with acceptable complexity. Based on these findings, in this article, the author introduces an evolutionary-fragmentary method that allows solving the problem of matching ontologies based on the construction of sets of ontological contexts with acceptable complexity.

#### Presentation of the main stuff of the research

In [17] the author presented a fragmentary model of ontology schema matching problem and proposed two algorithms for constructing fragmentary structures based on sets of ontological contexts which allow to avoid exhaustive search of contexts. Now, let us devise the evolutionary-fragmentary method for ontology matching which uses the constructed fragmentary structures as its base. For that, let us introduce a generalized evolutionary model. Further, the author will show the process of constructing a new fragmentary structure from the fragmentary structures  $\Phi^A$  and  $\Phi^B$  obtained by the algorithms described in [17]. Then, on the basis of the obtained fragmentary structure, the author will present 2 algorithms for solving the problem of matching ontology schemes with acceptable complexity – a greedy fragmentary algorithm and an evolutionary-fragmentary algorithm.

**Generalized Evolutionary Model.** Consider the classical problem of one-dimensional optimization.

Suppose that on the set of feasible solutions  $V$  it is required to find a point  $v^*$  such that the function  $F : V \rightarrow R^1$  reaches its maximum (minimum) value. In order to find an approximate solution of the optimization problem it is usually introduced the following mathematical model of the problem. The set  $V$  in the model is substituted by some set  $X$  of rather simple nature – a basic solution set (called the base set), and the objective function is respectively substituted by a function defined on this basic set. The transition from a set of admissible solutions to a base set  $X$  is essentially the coding of a set of admissible solutions. The reverse transition from a point  $x \in X$  in the base set to the corresponding admissible solution is called decoding. Summarizing approaches to evolutionary modeling, which were used in various studies [18], [19], [20] we define the evolutionary model as follows [21]:

**Definition 4.** An evolutionary model of an optimization problem includes the following components.

1. **Base solution set.** The basic set of solutions  $X$  on which the optimal solution is sought. Finite non-empty subsets of the set  $X$  called *populations*. Setting the base set involves a description of the procedure for coding solutions by the points of the base set and the reverse procedure of decoding by restoring the solutions in the points of the base set  $X$ .
2. **Criterion** is a function defined on the base set with values in  $R^1$  (or  $R^n$  in cases of multicriteria models with objective functions  $f : X \rightarrow R^n$ ). Basically it represents a rule which allows to establish the

- value of the objective function on an admissible solution of the problem by a given code of the admissible solution in the set  $X$ .
3. **Constructing rule for the initial population.** This is basically an operator which selects a non-empty subset  $X_0 \subseteq X$  on the set  $X$ .
  4. **Sampling rule.** This is a rule that allows selecting for any population  $Y \subseteq X$  a set of pairs of parent elements in this population for the subsequent execution of the crossover operation.
  5. **Crossover rule** is set by the operator  $Kr: X \times X \rightarrow X$  which constructs a new child-solution (or several such solutions) on two parent solutions from the set  $X$ .
  6. **Mutation rule.** A mutation rule is specified by the mutation operator  $M: X \rightarrow X$  and a real number  $a_{mut} \in [0,1]$  which is essentially a probability of the mutation. For any population  $Y$ , the set of descendants of this population is obtained by successive and consistent application of selection, crossover and mutation rules.
  7. **Selection rule.** Selection rule allows obtaining a new population from the union of parent and descendant sets. Usually this rule is specified by indicating the size (a number of elements) of the population and the linear order or function that represents the selection criterion. The elements of the union of parent and descendant sets are ordered and those with the highest criterion value are selected.
  8. **Stop rule.** The stop rule is the rule that determines the condition for stopping the algorithm.

The search for an approximate optimal solution within the framework of the evolutionary model is carried out using an evolutionary algorithm. Below, we will describe a variant of the evolutionary algorithm for finding approximate solutions of the optimization problem within the framework of the evolutionary model under consideration. The step of the evolutionary algorithm, which we will further call the *evolutionary step*, is as follows. Let the current population which we call a  $k$ -th generation  $Y_k \subseteq X$  is determined on the  $k$ -th step. On the initial step 0 we have an initial population  $Y_0$  which is obtained by the rule for constructing an initial population. The set of parent pairs  $P_k \subseteq Y_k \times Y_k$  in the current population  $Y_k$  is selected using the sampling rule. The crossover operator is applied to each parent pair and the set  $C_k = Kr(P_k)$  is constructed. Then, the mutation rule is applied to all elements of the set  $C_k$  and the descendant set  $C'_k$  is constructed. Namely, each element  $c \in C_k$  is substituted by the element  $c' = M_a(c)$  with the probability  $a$  or remains unchanged with the probability  $1-a$ . After that, according to the model we should apply the selection rule. The elements of the union  $Y_k \cup C'_k$  are ordered. First  $m$  elements by the criterion value form the population  $Y_{k+1}$  (where  $m$  is the size of the population). Finally, the stop condition is checked. If the condition is not met, then we should proceed to the next step of the algorithm. Otherwise, the algorithm is stopped. Thus, we get an approximate solution of the problem which is the best one within the last population in terms of the value of the objective function.

The first and one of the main stages in the construction of the evolutionary model is the choice of the base set and the description of encoding and decoding procedures. Particularly, in the classical model of Holland [22] the base set is represented as a set of binary sequences of fixed length. In many later models, the base set is consisted of integer (or even non-integer) vectors of given dimensions. In our case, for further development of EVF-algorithms aimed at solving the ontology alignment problems, we will use the metric space of permutations  $S_n$  for the construction of base sets. An every element of this space is represented by a permutation  $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ , where all coordinates are pairwise different numbers from the set  $\{1, 2, \dots, n\}$ .

**Fragmentary Algorithms for Ontology Mapping and Schema Matching.** The task of matching ontological schemes (and thus finding the resulting alignment of ontologies) can be considered as finding the optimal set of context mappings (r.t. [17] for details). In other words, we must find such a combination of mappings that maximize the context similarity function with the highest degree of confidence. For that we first need to construct a new fragmentary structure on top of  $\Phi^A$  and  $\Phi^B$  for further optimization (please, r.t. [17] for respective details on the construction of fragmentary structures  $\Phi^A$  and  $\Phi^B$ ). Obviously, the easiest way to obtain such a structure is using the Cartesian product  $\Phi^A \times \Phi^B$ . However, the complexity order of solving the optimization problem on this structure remains NP-complete, though in such a way we reduce the number of considered elements if compared to the initial quantity (from  $n$  and  $m$  to  $n'$  и  $m'$ , where  $n$  and  $m$  are numbers of entities in the ontologies  $A$  and  $B$  respectively, while  $n'$  and  $m'$  are numbers of stars covering the structures of  $A$  and  $B$ ) due to the construction of  $\Phi^A$  and  $\Phi^B$ . For ontologies with large terminological parts, such a reduction in computational complexity may not be sufficient for obtaining a result in acceptable time. Recall that fragments in the fragmentary structures  $\Phi^A$  and  $\Phi^B$  are ordered, so we can select the subsets of fragments from  $\Phi^A$  and  $\Phi^B$  which elements can potentially produce values of similarity function with higher degree of

confidence. Selection of the subsets of fragments can be performed either in accordance with the criterion of coverage or according to the estimated characteristics of the required computing power. In decentralized systems, the quantitative selection criterion may also be a number of available processing agents.

Now, let us consider a greedy algorithm for finding the optimal alignment.

**Step 1.** Form a matrix in which the rows will correspond to the elementary fragments from  $\Phi^B$ , and columns correspond to those from  $\Phi^A$ . In the cells of the matrix, we write down the values of the similarity function calculated for each pair of fragments.

**Step 2.** Find the maximal values of the similarity metric for each row.

**Step 3.** Find the maximal values of the similarity metric for each column.

**Step 4.** Sort the rows in a descending order of the maximal value of the similarity metric.

**Step 5.** In the first row, find the column numbers corresponding to the maximum value in this row. Add the fragments, corresponding to the elements of the matrix located at the intersection of the row and the selected columns, into the resulting alignment.

**Step 6.** Consider the next row and select the cells with the maximal values of the objective function and mark the numbers of the corresponding columns.

**Step 7.** Examine the next in order column from the marked columns upwards and check if there is a value higher than the one in the cell. If not, then transfer the corresponding pair of fragments to the resulting alignment.

**Step 8.** If the selected columns are run out – go back to the Step 5.

The algorithm terminates when all the pairs having values of similarity metrics higher than the predefined threshold are selected. The fragments that remain unselected are included into the subsequent selections. The fragments that remain unselected after considering all the selections are discarded.

It should be noted that the above algorithm possesses the stability property and produces a pseudo-exact solution. This solution will not depend on the order in which the pairs are considered and the way the objective function is actually calculated. At the same time, this algorithm does not guarantee an absolutely exact solution, because potentially useful knowledge can be lost at the stage of fragment construction and when discarding the selections remaining after consideration. This algorithm has a polynomial complexity order. Below we present an EVF-algorithm having a lower complexity, but not possessing the stability property.

Let us now consider an EVF-algorithm for finding the optimal alignment.

**Step 1.** From  $\Phi^A$  and  $\Phi^B$  obtain a new fragmentary structure  $\Phi^{AB}$ , which fragments are Cartesian products of the fragments belonging to  $\Phi^A$  and  $\Phi^B$ .

**Step 2.** Using the procedure of constructing structure numbers, transform  $\Phi^{AB}$  into  $\Phi_S^{AB}$  – a fragmentary structure, which fragments are structural numbers<sup>1</sup>, obtained from the respective matrices  $\Phi^{AB}$ .

**Step 3.** Divide  $\Phi_S^{AB}$  into the subsets of a given power  $2 \leq Q \leq \frac{N}{2}$  – chromosomes of a given length,

where  $N$  is the power of the set  $\Phi_S^{AB}$ . The criterion for the length of a chromosome can be estimated characteristics of the required computing power<sup>2</sup>.

**Step 4.** Randomly select a pair of chromosomes.

**Step 5.** Crossing over the chromosomes is carried out as follows. Chromosomes are considered in the order of their genes (elements of subsets). The minimal of the first two elements is selected and added to the permutation-descendant.

**Step 6.** The selected element is removed from the parent chromosomes. If there are no genes left in the parent chromosomes, then go to the Step 7. If there are no genes left in the one of the parent chromosomes, and there is only one left in the other, then we write it into the permutation-descendant and go to the Step 7. Otherwise, go to the Step 5.

**Step 7.** Remove the considered chromosomes from the initial chromosome set.

**Step 8.** If more than one chromosome is left in the initial set – go to the Step 4. If there is only one chromosome left, add it to the new population.

**Step 9.** Select a set of chromosomes from the population, having the values of the selection criterion (the integral value of similarity function) above the threshold value. Add the selected chromosomes to the resulting population.

<sup>1</sup> The procedure for obtaining structure numbers is described in details in [17]

<sup>2</sup> The higher the available computational power, the longer the chromosomes can be

**Step 10.** If the number of generations has not reached the limit value and at least one chromosome has been selected at the Step 9, then delete those fragments from  $\Phi_S^{AB}$  that correspond to the genes of already selected chromosomes. If  $\Phi_S^{AB}$  is not empty, then go to the Step 3.

**Step 11.** The end of the algorithm. The best set of chromosomes (with regard to the value of the selection criterion) of the resulting population determines the approximate solution of the problem.

It is important to note that at the Step 5 we select the minimal element since the numbers are basically the order numbers of elements in the sorted set. I.e., in such a way we select the maximal fragment with regard to the degree of confidence.

### Conclusions

Analysis of the straightforward context-based ontology matching algorithms showed that they provide good results in terms of quality of the resulted alignment, but their computational complexity is NP-complete. Thus, new computationally effective algorithms are needed as NP-complete algorithms are hardly applicable to large ontologies (e.g., industrial or biomedical ones). In order to solve these complexity issues the author proposed two algorithms which have lower computational complexity, videlicet, a greedy fragmentary algorithm and a representative of evolutionary-fragmentary algorithms. These algorithms allow processing of large-size ontologies preserving the acceptable quality of results. Also, in this article the author briefly presented the theory of fragmentary structures and the generalized evolutionary model. On the basis of this theory the author described the overall approach for constructing fragmentary and evolutionary-fragmentary algorithms and showed the way how more computationally efficient algorithms can be constructed for solving the ontology alignment class of problems.

It should be mentioned that it is possible to obtain more accurate solutions apart from the one presented in this article, if already selected chromosomes are subjected to crossing with the newly created ones on a next pass of the algorithm, starting from the Step 3 of the algorithm. But then we need to exclude the criterion "if at least one chromosome has been selected at the Step 9" from the Step 10. In addition, we should also exclude the addition to the resulting population from the Step 9, since in this case the resultant will be the population obtained from the chromosomes selected at the last pass of the algorithm.

Above, the author presented only one of possible genetic algorithms as a solution. One can also propose other EVF-algorithms for the solution of the problem. For example, in the formation of chromosomes in the fragmentary set  $\Phi_S^{AB}$  we could not only cross the chromosomes with each other, but also introduce some mutations to them using as mutagens those genes that were originally not included in the first generation of chromosomes. Besides, the mutation operator can perform a random transposition in a permutation.

### References

1. Euzenat J. *Ontology matching*, 2nd edition / J. Euzenat, P. Shvaiko. – Berlin Heidelberg (DE): Springer-Verlag, 2013. – 511 p.
2. Silver G., Hassan O.H., Miller J. *From Domain Ontologies to Modeling Ontologies to Executable Simulation Models* / G. Silver, O.H. Hassan, J. Miller // *Proc. of the 2007 Winter Simulation Conference*, 2007. – P. 1108–1117.
3. Novák P. *Applications of Ontologies for Assembling Simulation Models of Industrial Systems* / P. Novák, R. Šindelář / Meersman, R., Dillon, T., Herrero, P. (eds.) // *OTM-WS 2011. LNCS*, Springer, Heidelberg. – 2011. – V. 7046. – P. 148-157.
4. Ding Y. *The Role of Ontologies in eCommerce* / Y. Ding, D. Fensel, M. Klein, B. Omelayenko, E. Schulten / Staab, S., Studer, R. (eds.) // *Handbook on Ontologies. International Handbooks on Information Systems*, Springer. – 2004. – P. 593-616.
5. Hepp M. *Products and Services Ontologies: A Methodology for Deriving OWL Ontologies from Industrial Categorization Standards* / M. Hepp // *Int. J. on Sem. Web & Inf. Systems*. – 2006. – V. 2(1). – P. 72-99.
6. Kryssanov V.V. *A Decision-Making Support System Based on Know-How* / V.V. Kryssanov, V.A. Abramov, Y. Fukuda, K. Konishi // *Proc. Of the 29th CIRP Int-l Sem. On Manufacturing Sys-s*, 1997. – P. 382-387.
7. Tzafestas S.G. *Artificial Intelligence in Industrial Decision Making, Control and Automation* / S.G. Tzafestas, H.B. Verbruggen. – Springer Science & Business Media, 2012. – 767 p.
8. Толок А.В. *Обзор методов и моделей представления знаний в САПР* / А.В. Толок, М.В. Давидовский // *Труды Международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта" (CAD/CAM/PDM)*. – 2014). – М.: Аналитик, 2014. – С. 69-73.
9. Prasad B. *What Distinguishes KBE from Automation* / B. Prasad // *Technical Report*, 2005. – DOI: 10.13140/2.1.4370.5602
10. Kendal S.L. *An Introduction to Knowledge Engineering* / S.L. Kendal, M. Creen. – London: Springer, 2007. – 287 p.



11. Rahm E. A survey of approaches to automatic schema matching / E. Rahm, P.A. Bernstein // *The Int. J. on Very Large Data Bases.* – New York: Springer-Verlag, 2001. – Vol. 10. – Issue 4. – P. 334-350.
12. Kalfoglou Y. *Ontology mapping: the state of the art* / Y. Kalfoglou, M. Schorlemmer // *The Knowledge Engineering Review.* – NY: Cambridge University Press, 2003. – Vol. 18. – Issue 1. – P. 1–31.
13. Davidovsky M. *A Survey on Agent-based Ontology Alignment* / M. Davidovsky, V. Ermolayev, V. Tolok // In: *Proceedings of 4th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, ICAART 2012* / Filipe, J., Fred, A.L.N. (eds.). – SciTe Press. – 2012. – Vol. 2 (2012). – P. 355-361.
14. Ermolayev V. *Agent-Based Ontology Alignment: Basics, Applications, Theoretical Foundations, and Demonstration. Tutorial* / V. Ermolayev, M. Davidovsky // In *Proceedings of the 2nd International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics.* –New York: ACM, 2012. – DOI:10.1145/2254129.2254136.
15. Davidovsky M. *Agent-Based Implementation for the Discovery of Structural Difference in OWL-DL Ontologies* / M. Davidovsky, V. Ermolayev, V. Tolok // In: *Kop, C. (ed.) UNISCON 2012. LNBIP, Springer, Heidelberg.* – 2013. – V. 137. – P. 87-95.
16. Davidovsky M. *Evaluation of the Ontology Instance Migration Methodology and Solution in Industrial Settings* / M. Davidovsky, V. Ermolayev, V. Tolok // In: *Ermolayev, V., et al. (Eds.) ICT in Education, Research, and Industrial Applications. Rev. Sel. Papers of ICTERI 2013, CCIS, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2013.* – V. 412. – P. 163-189.
17. Давидовский М.В. *Фрагментарная модель задачи согласования онтологий* / М.В. Давидовский // *Материалы 18-го международного научно-практического семинара "Комбинаторные конфигурации и их применение" (г. Кировоград, 15-16 апреля 2016 г.).* – Кировоград: КЛА НАУ, 2016. – С. 43-52.
18. Schmitt L.M. *Theory of Genetic Algorithms* / L.M. Schmitt // *Theoretical Computer Science.* – 2001. – Vol. 259. – P. 1-61.
19. Schmitt L.M. *Theory of Genetic Algorithms II: models for genetic operators over the string-tensor representation of populations and convergence to global optima for arbitrary fitness function under scaling* / L.M. Schmitt // *Theoretical Computer Science.* – 2004. – Vol. 310. – P. 181-231.
20. Hingston P. *Design by Evolution: Advances in Evolutionary Design* / P. Hingston, L. Barone, Z. Michalewicz. – Springer, 2008. – 350 p.
21. Полюга С.І. *Фрагментарні оптимізаційні моделі в задачах покриття графів типовими підграфами* : дис. ... кандидата фіз.-мат. наук : 01.05.02 / Полюга Світлана Ігорівна. – Запоріжжя, 2015. – 146 с.
22. Holland J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems* / J.H. Holland. – Boston, MA : MIT Press, 1992. – 288 p.

УДК 004.8:004.912:001.811

Г.А. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ, Н.Г. КЕБЕРЛЕ, П.П. ПРОХОРЕНКО  
Запорізький національний університет

### ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ТА АНАЛІЗУ МЕРЕЖІ ЦИТУВАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ БІБЛІОГРАФІЧНОГО ПОКАЖЧИКА З МЕТОДІВ ПЕРСОНАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО НАВЧАННЯ ВИМОВИ

*Розглядається застосування методу та інформаційної технології побудови і аналізу мережі цитування наукових публікацій з метою виявлення найбільш значущих статей в спеціальній області - методи персоналізації систем комп'ютерного навчання вимови. Технологія комбінує контрольований метод снігової кулі і аналіз головних шляхів. Розмір снігової кулі регулюється за допомогою ймовірнісної тематичної моделі і симетричної дивергенції Кульбака-Лейблера для відбору схожих статей. Головні шляхи в мережі цитування відображають розвиток знань у дослідженій області.*

*Ключові слова: аналіз текстів, короткі тексти, тематичне моделювання, метод головних компонент, розріджена симетрична невід'ємна матрична факторизація, мережа цитування, аналіз головних шляхів, метод снігової кулі, порушення вимови, адаптація до особливостей вимови, оцінка вимови.*

Г.А. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ, Н.Г. КЕБЕРЛЕ, П.П. ПРОХОРЕНКО  
Запорізький національний університет

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗА СЕТИ ЦИТИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ БИБЛИОГРАФИЧЕСКОГО УКАЗАТЕЛЯ ПО МЕТОДАМ ПЕРСОНАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ОБУЧЕНИЯ ПРОИЗНОШЕНИЮ

*Рассматривается применение метода и информационной технологии построения и анализа сети цитирования научных публикаций с целью обнаружения наиболее значимых статей в специальной области - методы персонализации систем компьютерного обучения произношению. Технология комбинирует контролируемый метод снежного шара и анализ главных путей. Размер снежного шара регулируется с помощью вероятностной тематической модели и симметричной дивергенции Кульбака-Лейблера для отбора похожих статей. Главные пути в сети цитирования отражают развитие знаний в исследованной области.*

*Ключевые слова: анализ текстов, короткие тексты, тематическое моделирование, метод главных компонент, разреженная симметричная неотрицательная матричная факторизация, сеть цитирования, анализ главных путей, метод снежного шара, нарушения речи, адаптация к особенностям произношения, оценка произношения.*

Н. DOBROVOLSKYI, N. KEBERLE, P. PROKHORENKO  
Zaporizhzhya National University

### CITATION NETWORK CONSTRUCTION AND ANALYSIS METHOD APPLICATION TO BIBLIOGRAPHIC INDEX PREPARATION FOR PERSONALIZATION METHODS IN COMPUTER-AIDED PRONUNCIATION TRAINING

*The paper presents an application of the method and correspondent information technology for construction and analysis of a citation network of scientific publications aimed at detecting the seminal papers in the particular domain of research - personalization methods in computer-aided pronunciation training.*

*The method relies on an initial set of seed papers arbitrarily selected by the domain(s) experts, adopts and combines probabilistic topic model, greedy restricted snowball sampling, and path analysis of the collected citation network. The topic model is built on the base of word-word co-occurrence probability with combination of sparse symmetric nonnegative matrix factorization and principal component approximation. Greedy restricted snowball sampling size is regulated with probabilistic topic model and symmetrized Kullback-Leibler divergence as measure of publication similarity. Path analysis allows further selection of the most important paths in the citation network and, hence, evaluation of the scientific value of each publication within the domain of interest. The method is robust with respect to the variations of initial set of seed papers, it preserves the scale-free property of a citation network, the restricted snowball sampling provides saturation of the publications set and reliable semantic distance between publications.*

*The research domain selected to apply the method lies at intersection of two scientific domains - speech disorders and computer-assisted pronunciation training, and as such it does not have a single seminal paper or*

*review to read. The constructed citation network allows a scientist willing to get acquainted with the domain to have a reading plan consisting of the most relevant, important and recognized publications.*

*The method applied can be used when a research domain is at intersection of several scientific domains, when a scientist joins a research field and does not have an experience in it, when a research domain is actively evolving and has been experiencing explosive growth in the number of publications.*

*Keywords: text mining, short text document, topic modelling, principal component analysis, sparse symmetric nonnegative matrix factorization, citation network, main path analysis, snowball sampling, speech disorder, speaker adaptation, pronunciation assessment.*

### **Постановка проблеми**

Автоматична оцінка якості вимови є важливою частиною комп'ютерних систем навчання вимові. Але у більшості випадків такі системи налаштовані на сприйняття мови типового учня, і чим більше відрізняється голос від ідеального, тим більшою є систематична помилка в оцінках. На практиці такі системи є занадто чутливими до індивідуальних особливостей голосу, що особливо помітно у випадках, якщо людині притаманні картавість, шепелявість, нерозбірлива вимова [1]. Серйозні захворювання, такі як дизартрія, зазвичай поєднують декілька особливостей вимови. Один із шляхів покращення точності оцінки є врахування персональних особливостей вимови автоматичними системами оцінки вимови. Дослідження [2,3] показало, що кожному окремому учню притаманно значно менше помилок вимови, ніж якщо брати усі можливі помилки вимови усіх учнів. Тому підвищення уваги автоматичної системи до персонального набору помилок набагато підвищує точність оцінки вимови. Дослідження такого типу відноситься до перетину кількох дисциплін: комп'ютеризовані системи оцінки вимови (САРТ), логопедія, обробка аудіо сигналів. Очевидно, не існує бібліографічних показників, що включали б всі значущі дослідження з усіх названих дисциплін, тому створення такого показника є актуальною задачею.

Якість аналізу існуючих публікацій у заданій області досліджень - проблема добре відома кожному науковцю. У процесі підготовки аналізу потрібно знайти публікації, які містять всі важливі наукові результати, виділити серед них головні ідеї та прослідкувати їх еволюцію. Але якісний підбір літератури стикається із перепонами: відсутність досвіду у заданій області досліджень, міждисциплінарні дослідження, велика кількість публікацій, якщо область знань активно розвивається.

Існують різноманітні способи автоматичного аналізу існуючих колекцій наукових публікацій: вивчення співавторства [4, 5], дослідження ключових слів та тем [6], пошук та аналіз термінології [7], обчислення різних статистичних показників [8], аналіз цитування [9, 8, 10]. Згадані методи успішно застосовуються до існуючих, ретельно зібраних та очищених даних, але збір нових репрезентативних колекцій на задану тему залишається складним та актуальним завданням із кількох причин. По-перше, існуючі колекції наукових статей не перекривають всі відомі напрямки досліджень, по-друге, збір репрезентативного та водночас повного бібліографічного показника у деякій області досліджень потребує тривалої роботи експертів.

### **Мета дослідження**

Поточна робота присвячена застосуванню запропонованого авторами методу побудови та аналізу мережі цитувань [11, 12] до укладання бібліографічного показника з теми "Методи персоналізації систем комп'ютерного навчання вимови".

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Наукові статті, які стосуються деякої області досліджень, можуть бути знайдені на основі ключових слів за допомогою запитів до баз даних, в збірниках праць спеціалізованих конференцій або журналів [7], на основі співавторства [4,5], на основі автоматичної класифікації текстів [6] та автоматично укладених онтологій [13], або методом снігової кулі [14, 15, 8, 9, 12].

Однак не для кожної теми дослідження існує відповідна конференція або журнал, онтології та автоматична класифікація текстів не показують наукової цінності праць, науковці можуть публікувати результати із кількох тем. Пошук за ключовими словами [16] страждає від індивідуальних варіацій тезаурусу. Кожен науковець – як автор наукових публікацій, так і експерт, який укладає бібліографічний показник, – використовує лише частину термінів своєї предметної області. І тому пошук на основі ключових слів знаходить не всі наукові публікації на задану тему.

Метод снігової кулі або "вибірка за ланцюжком знайомств" широко використовується в соціології [14, 17] для отримання репрезентативної вибірки із важкодоступних популяцій. Останнім часом метод снігової кулі знайшов використання в бібліографічних дослідженнях [15, 8, 9, 11, 12], де застосовується для формування бібліографічних показників. Аналогічно до оригінального методу снігової кулі, статті, які посилаються на початкові статті, формують перший рівень, потім статті, які посилаються на перший рівень, формують другий рівень і т.д. Ця техніка формує мережу релевантних статей, побудовану навколо зародку, яка надає набагато більше можливостей для аналізу, ніж простий упорядкований перелік – результат пошуку за ключовими словами. Дослідник контролює кількість рівнів, а також відбір публікацій для

наступного рівня снігової кулі. Було показано [18], що мережі цитування є безмасштабними, а тому у більшості випадків достатньо зібрати снігову кулю трьох рівнів [4].

Відбір публікацій для наступного рівня снігової кулі виконувався за допомогою Google PageRank [15, 8], косинусної міри схожості [9], імовірнісної статистичної моделі [11, 12]. Також можливим є застосування методів машинного навчання із вчителем [19]. Кандидатами на міру впливовості публікацій є традиційні показники: індекс цитування та індекс Гірша [20], кількість шляхів цитування [21].

Індекс Гірша для автора кількісно дорівнює числу його статей, кількість посилань на які у базах даних дорівнює або перевищує значення індексу Гірша. Індекс Гірша є кількісною характеристикою продуктивності вченого за весь період наукової діяльності, і тому він не може бути використаний для оцінки впливу однієї наукової публікації на розвиток окремої області знання.

Індекс цитування – прийнята в науковому світі міра значущості наукової роботи будь-якого науковця або наукового колективу [22]. Величина індексу цитування визначається кількістю посилань на публікацію, або на прізвище автора в інших джерелах. PageRank [23] – сімейство алгоритмів оцінки важливості веб-сторінок, які враховують як кількість посилань на документ, так і вагу документів, які посилаються на задану веб-сторінку. Звичайно PageRank та індекс цитування обчислюються для всіх проіндексованих документів, тому їх використання приводить до завищеної оцінки класичних робіт, довідників, підручників, які стосуються не обраної теми, а суміжних областей знань.

Перспективними для селекції є методи, що спираються на зміст публікацій. Основною ідеєю таких підходів є порівняння кандидатів на включення до снігової кулі із статтями, що складають зародок. Для порівняння використовуються підходи застосування косинусної міри схожості [9], різноманітні міри схожості рядків [24] та імовірнісні статистичні моделі [11, 12]. Перший підхід використовує векторну модель документа та порівнює множини слів у двох текстах, другий спосіб вимірює схожість написання, третій використовує один із різновидів тематичного моделювання [25]. Тематичні моделі дозволяють порівнювати зміст текстів, враховувати синоніми та виявляти зв'язки між термінами.

Ще одним способом відбору найважливіших документів із уже зібраної колекції публікацій є аналіз отриманої мережі цитування – напрямленого графа, у якому вузлами є публікації, а ребрами – посилання з однієї публікації на іншу. Аналіз основного шляху, вперше запропонований Гуммоном і Доріаном [21], частково автоматизований засобами програмного пакета Pajek [26] та повністю автоматизований одним із авторів статті [27], виявляє найбільш значимі ланцюжки цитувань. Спочатку для кожного посилання обчислюється кількість шляхів, які проходять через нього, а потім відбираються посилання із найбільшою кількістю шляхів. Метод застосовний до будь-якої діяльності людини, яка може бути представлена у вигляді напрямленого графа: для відстеження шляхів потоку знань або траєкторій розвитку галузі науки і техніки за допомогою бібліографічних цитат або патентних цитат; до судових рішень, щоб відстежити зміну юридичних висновків; під час укладання бібліографічних покажчиків [28, 29, 30, 31, 10, 15, 8].

Застосований у поточній роботі метод збору бібліографічного покажчика [12] поєднує в одній інформаційній технології метод снігової кулі, тематичне моделювання та аналіз мережі цитування методом підрахунку шляхів, що дозволяє автоматизувати процес складання бібліографічних покажчиків і отримати незміщений повний і стійкий перелік літератури на задану тему.

### **Викладення основного матеріалу досліджень**

#### **Метод побудови та аналізу мережі цитування**

Загальна послідовність методу обмеженої снігової кулі [32, 12] містить наступні кроки:

1. Збір початкової множини публікацій – зародку вибірки – і її додавання до черги нульового рівня.
2. Ітерації звичайного алгоритму снігової кулі з метою збору текстів для побудови тематичної моделі. Для  $n \in 0, 1, 2, 3$  виконуються наступні кроки:
  - 2.1 вибірка порції публікацій із  $n$ -ї черги;
  - 2.2 завантаження публікацій, які посилаються на вибрану порцію;
  - 2.3 завантаження публікацій, на які посилаються статті із вибраної порції;
  - 2.4 додавання всіх завантажених публікацій у  $(n + 1)$ -у чергу.
3. Створення тематичної моделі на основі завантажених на попередньому кроці публікацій:
  - 3.1 отримання заголовків та анотацій всіх документів;
  - 3.2 розділення всіх заголовків та анотацій на речення;
  - 3.3 створення словника термінів, який містить всі знайдені у реченнях іменники та прикметники;
  - 3.4 утворення із термінів, які зустрічаються в одному реченні, всіх можливих пар та підрахунок їх кількості з метою оцінки сумісної ймовірності;
  - 3.5 знаходження стоп-слів, характерних для предметної області, та виключення їх з подальшого розгляду;
  - 3.6 виконання розрідженої симетричної невід'ємної факторизації матриці сумісної ймовірності [33] для визначення параметрів тематичної моделі;
  - 3.7 відображення кожної із статей зародку вибірки у вектор ймовірностей тем.

4. Виконання пакетного завантаження методом обмеженої снігової кулі: для  $n \in 0, 1, 2, 3$ 
  - 4.1. вибірка порції публікацій із  $n$ -ї черги;
  - 4.2. завантаження публікацій, які посилаються на вибрану порцію;
  - 4.3. завантаження публікацій, на які посилаються статті із вибраної порції;
  - 4.4. перетворення кожного завантаженого документа на мішок слів та стемінг;
  - 4.5. відображення кожної із завантажених статей у вектор ймовірностей тем;
  - 4.6. обчислення міри відмінності між статтями із зародку вибірки та завантаженими статтями;
  - 4.7. додавання в  $(n + 1)$ -у чергу тих завантажених публікацій, які є достатньо близькими до зародку вибірки, у черзі зберігаються назва, анотація, посилання та ймовірності тем для кожної статті.
5. Аналіз отриманої мережі цитування
  - 5.1 визначення ваги кожного посилання та документа методом підрахунку шляхів пошуку;
  - 5.2 вибір найвагоміших глобальних шляхів у мережі цитування.

Результатом аналізу є скорочена мережа цитування, яка містить тільки найважливіші наукові публікації з обраної теми.

#### Укладання бібліографічного покажчика

Збір початкової множини публікацій - зародку вибірки - відбувався за допомогою пошуку за ключовими словами "PERSONALIZATION IN COMPUTER-AIDED PRONUNCIATION TRAINING" в базі наукових публікацій SemanticScholar. Із знайдених публікацій було обрано 20 статей, які здалися підходящими за тематикою, наприклад [3, 35, 36, 38, 53, 54, 60, 65]. Простий метод снігової кулі завантажив 65035 анотацій та заголовків статей, на основі яких було складено словник об'ємом 10453 термінів, із яких 7348 були позначені як рідкісні слова і 62 - як специфічні для зібраних текстів стоп-слова. У скорочений словник потрапили 3045 термінів, які містять 95% всіх слів у зібраній колекції. До рідкісних слів потрапили всі помилкові терміни та рідкісні словосполучення. Стоп-словами виявились характерні для предметної області терміни "operation", "major", "properties", "computation", "processing", "particular", "number", "addit", "details" і т.д. Пакетне завантаження методом обмеженої снігової кулі дозволило створити мережу цитування із 466 публікацій, у якій було знайдено 50 найголовніших шляхів цитування, які проходять через 43 статті, що і складають бібліографічний покажчик.

#### Аналіз бібліографічного покажчика

Було проведено широке дослідження дизартрії, яка зазвичай містить більшість дефектів вимови [1]. Системи автоматичного розпізнавання мови (САРМ), які спрямовані на "розуміння" дизартричної вимови можуть бути згруповані за наступними напрямками: корекція звукового сигналу, використання знань про артикуляцію, використання фонологічних особливостей мови, моделювання вимови, а також адаптація лексичних, акустичних та математичних моделей. Нами також були виявлені декілька суміжних областей досліджень, які пов'язані з адаптацією до дизартричної вимови.

Роботи, в яких застосовуються знання про артикуляцію були розглянуті в роботах [2, 34-38]. В [2] описується обчислювальна модель вимови людини, яка спроможна вловлювати ефекти від найменших акустичних відмінностей при розпізнаванні вимови. САРМ з акустичною моделлю, що базується на субфонетичних частинах і багатьох фонологічних особливостях була запропонована в [34]. Басова мережа, що застосовується для розпізнавання послідовностей фонем розглянута в [35]. Рекурентні нейронні мережі та нейронні мережі прямого поширення, а також радіально базовані та послідовно базовані опірні вектори для розпізнавання дизартричної вимови було запропоновано в [36]. Емпіричні знання з голосового тракту при дефектах вимови, таких як дизартрична вимова, були досліджені в [37]. Інверсія від акустичної складової до артикуляційної для оцінки положення голосового тракту, використовуючи нелінійну систему Хаммерштейна була запропонована в [38].

Про адаптацію математичних моделей було звітано в [39-49], починаючи з обчислення мінімуму залишку передбачення [39]. Приховані Марковські моделі (Hidden Markov Models, НММ) були використані для декомпозиції сигналів в [40]. Адаптація спікера, що базується на прихованих Марковських моделях неперервної щільності (СДНММ), де параметри моделі сформульовані як Басова навчальна процедура, досліджена в [41]. НММ для розпізнавання ізольованих слів у автоматичній моделі з великою кількістю варіацій вимови було розглянуто в [42]. У [43] була презентована стратегія адаптації, яка базується на кусково-лінійній функції, параметрами якої є характеристики спікера та характеристики зразкового спікера. Метод максимальної правдоподібності лінійної регресії адаптації спікера для СДНММ була запропонована в [44]. Проблема з кількістю даних для адаптації була вирішена в [45], за допомогою техніки стриманого оцінювання для моделі Гаусової суміші. Акустичне моделювання для САРМ за допомогою лінійної динамічної моделі, тобто підвиду моделі простору станів запропоновано в [46]. Адаптація до спікерів зі спастичною дизартрією шляхом використання ПММ та методу опорних векторів розглянута в [47]. Математичне моделювання також використовується для виправлення помилок в розпізнаванні дизартричної вимови, як показано у [48], де перетворювач вагових коефіцієнтів, що базується на контексті вимови слугує цій цілі. У [49] був наданий огляд декількох математичних підходів до адаптації розпізнавання вимови.

Методи адаптації звуку були розглянуті в [50-54]. Спочатку дослідження фокусувалися на виявленні та зменшенні фонового шуму [50]. В [51] було взято до уваги виявлення різномірних шумів. Метод представлення звукової форми мови в термінах абстрактних, лінгвістичних відмінностей для отримання множини дискримінаційних ознак для подальшого використання в мові було представлено в [52]. Перетворення звукової хвилі спікера з дефектами вимови в більш зрозумілий для слухачів вид був представлений у [53]. Використання вирівнювання для заходження довгих пауз та застосування інтервалів цих пауз, як опорних точок було запропоновано в [54].

Різноманітні акустичні методи, методи моделювання вимови, методи лексичної адаптації з використанням фонологічних особливостей та комбіновані методи були розглянуті нижче. Акустичне та лексичне моделювання дизартричної вимови було використано в [55]. Акустична адаптація разом зі знаннями про артикуляцію були використані для пристосування артикуляційної динаміки в розпізнаванні мови [3]. Матриця неточностей та словник звуків були використані в акустичній адаптації та артикуляційних знаннях у [56]. Принципи подолання проблеми підготовки бази зразків та архітектура системи розпізнавання вимови в системі з великим словниковим запасом були описані в [57]. Фонологічні властивості були розглянуті в [58], де була запропонована нейронна мережа для їх знаходження. У [59] було розглянуте розпізнавання мови шляхом фонетично розмічених складів для встановлення ефективності використання фонетичних особливостей у розпізнаванні фонем. Особлива увага була приділена базам зразків вимови, серед яких TORGUS [60], база дизартричної вимови Nemours [61], AVICAR – аудіовізуальна база зразків записаних в автомобілі [62] та DARPA – база однієї тисячі слів на тематику менеджменту [63]. На кінець в [64-65] був розглянутий метод підбору спікерів для найбільш правильного тренування акустичної моделі дизартричної вимови.

### Висновки

Робота показує практичне застосування запропонованої раніше інформаційної технології автоматичного створення бібліографічних покажчиків до теми “Методи персоналізації систем комп’ютерного навчання вимови”. Перевагою методу є автоматизація процесу складання переліку публікацій: отримуючи пошуковий запит у вигляді вибраних вручну зразків публікацій, він створює скорочену мережу цитування, яка містить найважливіші наукові публікації з обраної теми. Основними компонентами технології є ймовірнісне тематичне моделювання, вдосконалений метод снігової кулі та аналіз отриманої мережі цитування.

В результаті отримано та проаналізовано перелік публікацій з методів персоналізації систем комп’ютерного навчання вимови. Для адаптації застосовуються знання про артикуляцію, можливі варіації фонем та складів сама адаптація виконується або шляхом зміни математичних моделей - переважно прихованих Марківських моделей, Баєсівських або нейронних мереж, або трансформацією вхідного сигналу. Особлива увага була приділена базам зразків вимови. Майже всі методи адаптації перевірялися на дизартричній вимові - як на крайньому випадку порушення усного мовлення.

### Список використаної літератури

1. Gifford M. F. Speech defects and disorders // California and western medicine. — 1926. — Vol. 24, №. 1. — P. 72.
2. Scharenborg O. Towards capturing fine phonetic variation in speech using articulatory features / O. Scharenborg, V. Wan, R.K. Moore // Speech Communication. — 2007. — Vol. 49, №. 10-11. — P. 811-826.
3. Improving speech recognition for children using acoustic adaptation and pronunciation modeling. / Prashanth Gurunath Shivakumar, Alexandros Potamianos, Sungbok Lee, Shrikanth Narayanan // WOCCI. — 2014. — P. 15-19.
4. Newman M. E. The structure of scientific collaboration networks / M. E. Newman // Proceedings of the national academy of sciences. — 2001. — Vol. 98, №. 2. — P. 404-409.
5. Newman M. E. Coauthorship networks and patterns of scientific collaboration / M. E. Newman // Proceedings of the national academy of sciences. — 2004. — Vol. 101, №. suppl 1. — P. 5200-5205.
6. A new technique for building maps of large scientific domains based on the cocitation of classes and categories / Félix Moya-Anegón, Benjamín Vargas-Quesada, Victor Herrero-Solana et al. // Scientometrics. — 2004. — Vol. 61, №. 1. — P. 129-145.
7. Ontologies of time: Review and trends. / Vadim Ermolayev, Sotiris Batsakis, Natalya Keberle et al. // International Journal of Computer Science & Applications. — 2014. — Vol. 11, №. 3. — P. 57-115.
8. Mapping the historical development of physical activity and health research: A structured literature review and citation network analysis / Andrea Ramirez Varela, Michael Pratt, Jenine Harris et al. // Preventive medicine. — 2018. — Vol. 111. — P. 466-472.
9. Ahad A. Navigation through citation network based on content similarity using cosine similarity algorithm / A. Ahad, M. Fayaz, A. S. Shah // Int. J. Database Theory Appl. — 2016. — Vol. 9, №. 5. — P. 9-20.

10. Data envelopment analysis 1978–2010: A citation-based literature survey / John S Liu, Louis YY Lu, Wen-Min Lu, Bruce JY Lin // *Omega*. — 2013. — Vol. 41, №. 1. — P. 3–15.
11. Érdi P. Patent citation network analysis: Topology and evolution of patent citation networks /P. Érdi // *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2016, Proceedings of the 25th International Conference on Artificial Neural Networks, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9886*. —Springer. — 2016. — P.543.
12. Dobrovolskyi H. Collecting the seminal scientific abstracts with topic modelling, snowball sampling and citation analysis / H. Dobrovolskyi, N. Keberle // *CEUR Workshop Proceedings*. — 2018. — Vol. 2015. — P. 179-192.
13. Osborne F. Klink-2: integrating multiple web sources to generate semantic topic networks / F. Osborne, E. Motta // *The Semantic Web - ISWC 2015 (Part 1)*. — Springer. — 2015. — Vol. 9366. — P. 408–424.
14. Biernacki P. Snowball sampling: Problems and techniques of chain referral sampling / P. Biernacki, D. Waldorf // *Sociological methods & research*. — 1981. — Vol. 10, №. 2. — P. 141–163.
15. Leczy J. Representative literature reviews using constrained snowball sampling and citation network analysis [Електронний документ] / J. Leczy, K. Beatty // SSRN eLibrary. — 2012. — Режим доступу до ресурсу : <https://ssrn.com/abstract=1992601>.
16. Petticrew M. Planning and conducting systematic reviews /M. Petticrew, S. Gilbody // *Health Psychology in Practice*. — 2009. — P. 150–179.
17. Heckathorn D. D. Comment: Snowball versus respondent-driven sampling // *Sociological methodology*. — 2011. — Vol. 41, №. 1. — P. 355–366.
18. de Solla Price D. J. Networks of scientific papers // *Science*. — 1965. — P. 510–515.
19. Valenzuela M. Identifying meaningful citations / M. Valenzuela, V. Ha, O. Etzioni // *Workshops at the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*. — 2015.
20. Hirsch J. E. An index to quantify an individual’s scientific research output / J. E. Hirsch // *Proceedings of the National academy of Sciences*. — 2005. — Vol. 102, №. 46. — P. 16569–16572.
21. Hummon N. P. Connectivity in a citation network: The development of dna theory / N. P. Hummon, P. Dereian // *Social networks*. — 1989. — Vol. 11, №. 1. — P. 39–63.
22. Сухий О. Л. Методичні рекомендації “Алгоритми пошуку в інформаційних системах” [Електронний ресурс] / О.Л. Сухий, В.М.Міленін, В.М.Тарадайнік. // Інститут обдарованої дитини НАПН України — Режим доступу до ресурсу : [http://biblos.iod.gov.ua/docview.php?doc\\_id=2613](http://biblos.iod.gov.ua/docview.php?doc_id=2613).
23. The PageRank citation ranking: Bringing order to the web (Technical Report) / L. Page, S. Brin, R. Motwani, T. Winograd // *Stanford InfoLab*. — 1999.
24. Concordance Between the Findings of Epidemiological Studies and Randomized Trials in Nutrition: An Empirical Evaluation and Citation Analysis. Appendix B: Details on the construction of citation graphs / Denish Moorthy, Mei Chung, Jounghye Lee et al. // *Technical Review, №.17*. — Vol.6. — (Prepared by the Tufts Medical Center Evidence-based Practice Center under Contract №. 290-2007-10055-I.) AHRQ Publication №.13-EHC067-EF. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality, May 2013.
25. Vorontsov K. Tutorial on probabilistic topic modeling: Additive regularization for stochastic matrix factorization / K. Vorontsov, A. Potapenko // *Communications in computer and information science*. — 2014. — Vol. 436. — P. 29–46.
26. Batagelj V. Efficient algorithms for citation network analysis. [Електронний ресурс] / V. Batagelj // *Cornell University Library* — 2003. — Режим доступу до ресурсу : <https://arxiv.org/abs/cs/0309023>.
27. Кучерян К. М. Реалізація алгоритму підрахунку шляхів пошуку для аналізу мережі цитування / К.М. Кучерян, Г.А. Добровольський // *Збірка тез доповідей Дев’ятої Всеукраїнської, шістнадцятої регіональної наукової конференції молодих дослідників «Актуальні проблеми математики та інформатики» Запоріжжя / ЗНУ*. — 2018. — P. 46.
28. Knowledge flows - Analyzing the core literature of innovation, entrepreneurship and science and technology studies / Samyukta Bhupatiraju, Önder Nomaler, Giorgio Triulzi, Bart Verspagen // *Research Policy*. — 2012. — Vol. 41, №. 7. — P. 1205–1218.
29. Calero-Medina C. Combining mapping and citation network analysis for a better understanding of the scientific development: The case of the absorptive capacity field / C.Calero-Medina, E.C. Noyons // *Journal of Informetrics*. — 2008. — Vol. 2, №. 4. — P. 272–279.
30. Colicchia C. Supply chain risk management: a new methodology for a systematic literature review / C. Colicchia, F. Strozzi // *Supply Chain Management*. — 2012. — Vol. 17, №. 4. — P. 403–418.
31. Mapping the multidisciplinary field of public health services and systems research / Jenine K. Harris, Kate E. Beatty, Jesse D. Leczy et al. // *American Journal of Preventive Medicine*. — 2011. — Vol. 41, №. 1. — P. 105–111.
32. Dobrovolskyi H. Probabilistic Topic Modelling for Controlled Snowball Sampling in Citation Network Collection / H. Dobrovolskyi, N. Keberle, O. Todoriko // *Communications in Computer and Information Science*. — 2017. — Vol. 786. — pp. 85-100.

33. Dobrovolskyi H. Sparse symmetric nonnegative matrix factorization applied to face recognition / H. Dobrovolskyi, N. Keberle, Y. Ternovyy // 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). — 2017. — P. 1042–1045.
34. Metze F. Discriminative speaker adaptation using articulatory features / F. Metze // Speech Communication. — 2007. — Vol. 49, №. 5. — P. 348–360.
35. Rudzicz F. Applying discretized articulatory knowledge to dysarthric speech / F. Rudzicz // 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. — 2009. — P. 4501–4504.
36. Rudzicz F. Phonological features in discriminative classification of dysarthric speech / F. Rudzicz // Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009. ICASSP 2009. IEEE International Conference on / IEEE. — 2009. — P. 4605–4608.
37. Rudzicz F. Articulatory knowledge in the recognition of dysarthric speech / F. Rudzicz // IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. — 2011. — Vol. 19, №. 4. — P. 947–960.
38. Rudzicz F. Using articulatory likelihoods in the recognition of dysarthric speech / F. Rudzicz // Speech Communication. — 2012. — Vol. 54, №. 3. — P. 430–444.
39. Itakura F. Minimum prediction residual principle applied to speech recognition / F. Itakura // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. — 1975. — Vol. 23, №. 1. — P. 67–72.
40. Varga A., Moore R. Hidden markov model decomposition of speech and noise / A. Varga, R. Moore // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-90. — IEEE. — 1990. — P. 845–848.
41. Lee C.-H. A study on speaker adaptation of the parameters of continuous density hidden markov models / C.-H. Lee, C.-H. Lin, B.-H. Juang // IEEE Transactions on Signal Processing. — 1991. — Vol. 39, №. 4. — P. 806–814.
42. Deller Jr J. On the use of hidden markov modelling for recognition of dysarthric speech / J. Deller Jr., D. Hsu, L. J. Ferrier // Computer Methods and Programs in Biomedicine. — 1991. — Vol. 35, №. 2. — P. 125–139.
43. Robust speaker adaptation using a piecewise linear acoustic mapping / Jerome R Bellegarda, Peter V de Souza, Arthur J Nadas et al. // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-92. — IEEE. — Vol. 1. — 1992. — P. 445–448.
44. Leggetter C. J. Maximum likelihood linear regression for speaker adaptation of continuous density hidden markov models / C. J. Leggetter, P. C. Woodland // Computer speech & language. — 1995. — Vol. 9, №. 2. — P. 171–185.
45. Digalakis V. V. Speaker adaptation using constrained estimation of gaussian mixtures / V. V. Digalakis, D. Rtischev, L. G. Neumeyer // IEEE Transactions on speech and Audio Processing. — 1995. — Vol. 3, №. 5. — P. 357–366.
46. Frankel J. Linear dynamic models for automatic speech recognition : PhD thesis / Frankel J. — University of Edinburgh — 2004. — 355 p.
47. Hmm-based and svm-based recognition of the speech of talkers with spastic dysarthria / Mark Hasegawa-Johnson, Jon Gunderson, Adrienne Perlman, Thomas Huang // International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2006. — IEEE. — Vol. 3. — 2006. — P. III–III.
48. Seong W. K., Park J. H., Kim H. K. Dysarthric speech recognition error correction using weighted finite state transducers based on context-dependent pronunciation variation // Lecture Notes in Computer Science. — 2012. — Vol. 7383. — P. 475–482.
49. Shinoda K. Speaker adaptation techniques for automatic speech recognition / K. Shinoda // Proceedings APSIPA ASC. — 2011.
50. A. Speech recognition using noise-adaptive prototypes / A. Nádas, D. Nahamoo, M. A. Picheny // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. — 1989. — Vol. 37, №. 10. — P. 1495–1503.
51. Hermansky H. Rasta processing of speech / H. Hermansky H., N. Morgan // IEEE transactions on speech and audio processing. — 1994. — Vol. 2, №. 4. — P. 578–589.
52. Eide E. Distinctive features for use in an automatic speech recognition system / E. Eide // Seventh European Conference on Speech Communication and Technology. — 2001.
53. Rudzicz F. Adjusting dysarthric speech signals to be more intelligible / F. Rudzicz // Computer Speech & Language. — 2013. — Vol. 27, №. 6. — P. 1163–1177.
54. Yeung Y.T. Improving automatic forced alignment for dysarthric speech transcription / Y.T. Yeung, K.H. Wong, H. Meng // Sixteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. — 2015.
55. Mengistu K.T. Adapting acoustic and lexical models to dysarthric speech / K.T. Mengistu, F. Rudzicz // 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP-2011. — IEEE. — 2011. — P. 4924–4927.



56. Rudzicz F. Correcting errors in speech recognition with articulatory dynamics / F. Rudzicz // Proceedings of the 48th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics / Association for Computational Linguistics. — 2010. — P. 60–68.
57. Young S. A review of large-vocabulary continuous-speech / S. Young // IEEE signal processing magazine. — 1996. — Vol. 13, №. 5. — P. 45.
58. King S. Detection of phonological features in continuous speech using neural networks / S. King, P. Taylor // Computer Speech & Language. — 2000. — Vol. 14, №. 4. — P. 333–353.
59. Speech recognition via phonetically-featured syllables / Simon King, Paul Taylor, Joe Frankel, Korin Richmond. — 2000.
60. Rudzicz F. The TORGO database of acoustic and articulatory speech from speakers with dysarthria /F. Rudzicz, A. K. Namasivayam, T. Wolff // Language Resources and Evaluation. — 2012. — Vol. 46, №. 4. — P. 523–541.
61. The Nemours database of dysarthric speech / X. Menéndez-Pidal, J.B. Polikoff, S.M. Peters, J.E. Leonzio, H.T. Bunnell et al. // Proceedings of the Fourth International Conference on Spoken Language Processing. IEEE. — 1996.
62. Avicar: Audio-visual speech corpus in a car environment / Bowon Lee, Mark Hasegawa-Johnson, Camille Goudeseune et al. // Eighth International Conference on Spoken Language Processing. — 2004.
63. The DARPA 1000-word resource management database for continuous speech recognition / Patti Price, William M Fisher, Jared Bernstein, David S Pallett // Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1988. ICASSP-88., 1988 International Conference on / IEEE. — 1988. — P. 651–654.
64. Lippmann R. P. Speech recognition by machines and humans // Speech communication. — 1997. — Vol. 22, №. 1. — P. 1–15.
65. Mengistu K. T. Comparing humans and automatic speech recognition systems in recognizing dysarthric speech /K.T. Mengistu, F. Rudzicz // Canadian Conference on Artificial Intelligence / Springer. — 2011. — P. 291–300.

УДК 681.3.06

Н.Л. ДОРОШ, А.М. ГАЛУЗОВА  
Національна металургійна академія України**РОЗРОБКА ВЕБ-ДОДАТКА ДЛЯ АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ З  
ВИКОРИСТАННЯМ БІБЛІОТЕКИ JSXGRAPH**

*Розроблено веб-додаток для аналізу часових рядів. Реалізовано завантаження та перегляд даних часового ряду, експоненціальне згладжування, нелінійне перетворення Бокса-Кокса, графічна візуалізація результатів обробки часового ряду та можливість налаштування сітки, збереження у файлі числових та графічних даних часового ряду до- і після обробки. Використано можливості JSXGraph-бібліотеки.*

*Ключові слова: веб-додаток, часові ряди, експоненціальне згладжування, Box-Cox transformation, бібліотека jsxgraph, api, html, css, javascript.*

Н.Л. ДОРОШ, А.Н. ГАЛУЗОВА  
Национальная металлургическая академия Украины**РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ JSXGRAPH**

*Разработано веб-приложение для анализа временных рядов. Реализованы загрузка и просмотр данных временного ряда, экспоненциальное сглаживание, нелинейное преобразование Бокса-Кокса, графическая визуализация результатов обработки временного ряда и возможность настройки сетки, сохранение в файле числовых и графических данных временного ряда до- и после обработки. Используются возможности JSXGraph-библиотеки.*

*Ключевые слова: веб-приложение, временные ряды, экспоненциальное сглаживание, box-cox transformation, библиотека jsxgraph, api, html, css, javascript.*

N.L. DOROSH, A.N. HALIUZOVA  
National Metallurgical Academy of Ukraine**DEVELOPMENT OF WEB APPLICATIONS FOR ANALYSIS OF TIME SERIES WITH USING THE  
JSXGRAPH LIBRARY**

*A Web application for time series analysis has been developed.*

*The urgency of developing an open source software (web application) is due to the popularity of using time series to predict different data sets and easy access to web applications.*

*A review of the capabilities of the JSXGraph library, which is used to display geometric drawings in browsers. It is shown that JSXGraph is a cross-browser library for interactive geometry, graphing of functions and visualization of data. JSXGraph is implemented in JavaScript, it does not reference any other library. The JSXGraph library functions are publicly available.*

*A web application that is developed uses the functions of the JSXGraph library. The JSXGraph library provides API that is used in scripts to import files with the rendering of results to a web page and creating on-line interactive geometric environment.*

*The content of web pages is created using HTML, and the appearance of their elements is determined by the styles that are described in CSS.*

*The web application is designed for time series analysis and contains a number of functions. Loading of time series data can be done: from the clipboard, txt-file, json-file. The methods of exponential smoothing and the non-linear Box-Cox transformation are implemented. The results of smoothing are presented on the screen in tabular and graphical forms. In a Web application, you can change the grid settings on the graphs. The results of smoothing can be saved in a file.*

*The work of the web application is shown. A time series describing sunspots has been considered, the study period from 1750 to 1849. The data shows the number of groups of spots (100 values).*

*A comparative analysis of the results is carried out. Exponential smoothing and non-linear Box-Cox transformation in the ITSM2000 system are performed. The discrepancy does not exceed 0.03%. Thus, functions of smoothing time series of a web application are tested.*

*A Web application that is developed provides for the addition of other time series research functions.*

*Keywords: Web application, time series, exponential smoothing, Box-Cox transformation, JSXGRAPH library, API, HTML, CSS, JavaScript, sunspots, ITSM2000.*

### Постановка проблеми

В нинішній час в нашій країні все більш популярним є створення програмних продуктів з використанням відкритого коду. У даній роботі розглянуто задачу розробки алгоритму та web-додатка для аналізу часових рядів з використанням вільного програмного забезпечення.

В інформаційному просторі існує величезна кількість інструментів для досліджень часових рядів. Це і електронні таблиці (MS Excel), і спеціальні системи (PROPHET[1], ITSM 2000[2] та ін.). Але розповсюдженість та зручність веб-сторінок давно зробили їх одним з найпопулярніших видів систем, до яких звертається велика кількість користувачів різного рівня підготовки.

Актуальність розробки відкритого програмного засобу (веб-додатка) обумовлена популярністю використання часових рядів для прогнозування різноманітних наборів даних та простою доступу до веб-додатків.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розробка web-додатку – це багатоетапний творчий процес, участь в якому зазвичай беруть дизайнери, програмісти, спеціалісти з верстки та менеджменту проектів. Створення web-додатку – важливий крок, який дозволить розширити бізнес та здобути нових клієнтів.

Вміст веб-сторінок створюється за допомогою мови HTML, а зовнішній вигляд їх елементів визначається стилями, які описуються на мові CSS. Існує також можливість написати невеликі програми на мові JavaScript, які вбудовуються в саму web-сторінку і змінюють її вміст у відповідь на дії відвідувача – web-сценарії [3].

Таким чином, для розробки web-додатку обрано програмне забезпечення: мови HTML, CSS, JavaScript. Використано бібліотеку JSXGraph.

JSXGraph – крос-браузерна Javascript-бібліотека для інтерактивної геометрії, побудови графіків функцій та візуалізації даних в web-браузері [4].

JSXGraph реалізована в чистому JavaScript, вона не посилається на будь-яку іншу бібліотеку і використовує SVG та VML.

Для web-сайтів існує SVG (Scalable Vector Graphic – масштабована векторна графіка), яка є мовою для опису двовимірної графіки в XML. SVG включає в себе три типи об'єктів: фігури, зображення і текст.

Переваги SVG:

Масштабування: на відміну від растрової графіки, SVG не втрачає в якості при масштабуванні.

Зменшення HTTP-запитів: при використанні SVG скорочується кількість звернень до сервера, відповідно збільшується швидкість завантаження сайту.

Стайлінг і скриптинг: за допомогою CSS можна змінювати параметри графіки на сайті, наприклад фон, прозорість або межі.

Анімація і редагування: за допомогою JavaScript можна анімувати SVG, а також редагувати в текстовому або графічному редакторі.

Малий розмір: об'єкти SVG важать набагато менше растрових зображень.

VML (Vector Markup Language – мова вектора розмітки) - це та ж сама векторна графіка що й SVG, тільки для старих версій Internet Explorer.

JSXGraph – написана на JavaScript та призначена для відображення геометричних креслень в web-браузері. Вона надає API (application programming interface – інтерфейс прикладного програмування), який використовується в скриптах для імпортування файлів геометричних креслень на сторінку. Ця бібліотека практично всеплатформенна. Той же самий API може бути використаний для побудови креслень з нуля, або для зміни завантажених готових креслень, тобто для створення повноцінного он-лайн інтерактивного геометричного середовища.

JSXGraph-бібліотека дозволяє надавати геометричні об'єкти, графіки та діаграми. Можливості JSXGraph-бібліотеки: геометрія Евкліда: точки, лінії, кола, перетини, перпендикулярні лінії, кути; графіки: параметричні криві, полярні криві, ділянки даних, криві Безьє; диференційне рівняння; слайдери; анімація; поліноміальна інтерполяція, сплайни; нормалі; вектори.

Переваги JSXGraph-бібліотеки: вона працює у всіх основних браузерах і є крос-платформенною; вона навіть працює на Apple iPod touch, iPhone та iPad, оскільки вона не є Flash, або Java-апплет; немає завантаження будь-яких файлів – все програмування виконується в тегах <script> на сторінці; розміри файлів дуже малі – набагато менше, ніж Java-апплети; немає необхідності в будь-якому плагіні – просто javascript, який за замовчуванням увімкнене практично у всіх браузерах; є багато демонстраційних прикладів, на яких можливо засновувати нові проекти; у порівнянні з графіками з SVG існує менша проблема сумісності; якщо потрібно щось змінити – це просто зміна коду. Це набагато простіше порівняно з розробкою у Flash, де потрібно буде відкрити сторонню програму (Flash), внести зміни, створити SWF-файл, а потім завантажити його на сервер.

Недоліки JSXGraph-бібліотеки: потрібно мати хороше розуміння JavaScript; документації майже немає (оскільки це досить нова розробка); JSXGraph не веде себе так добре в Internet Explorer (IE), але це не є провинною JSXGraph – це лише один з недоліків IE.

Веб-додаток, який розроблено, забезпечує додаткові функціональні можливості обробки часових рядів завдяки бібліотеці JSXGraph.

### Мета дослідження

Створення web-додатку для дослідження часових рядів з використанням вільного програмного забезпечення, у тому числі і можливостей функцій бібліотеки JSXGraph.

### Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі надані результати розробки програмного засобу за веб-технологією на основі вільно-розповсюджені бібліотеки JSXGraph, яка забезпечує додаткові можливості обробки часових рядів у будь-якому браузері.

Веб-додаток, який розроблено, використовує низку функцій. У функціях реалізовано: завантаження та перегляд даних часового ряду, експоненціальне згладжування, нелінійне перетворення Бокса-Кокса (Box-Cox Transformation), графічна візуалізація результатів обробки часового ряду та можливість налаштування сітки, збереження у файлі даних часового ряду до- і після обробки, графічне відображення результатів, довідкова інформація з методів обробки часових рядів та інструкція користувачеві. На рис. 1 відображено головне вікно веб-додатку для аналізу часових рядів. Ліворуч вертикально відображене меню: "Дані", "Обробка", "Допомога", "Про програму".

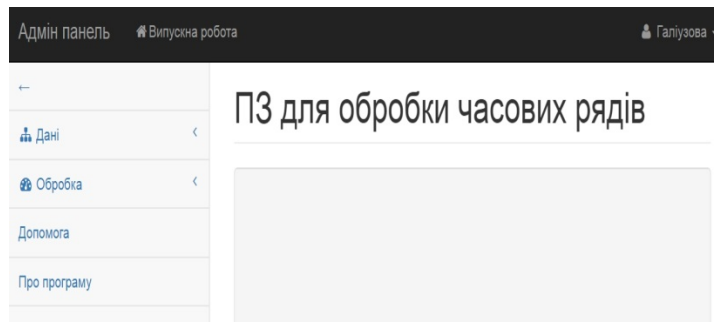


Рис. 1. Головне вікно веб-додатку

Продемонструємо послідовність дій після авторизації на веб-сторінці (рис. 2).

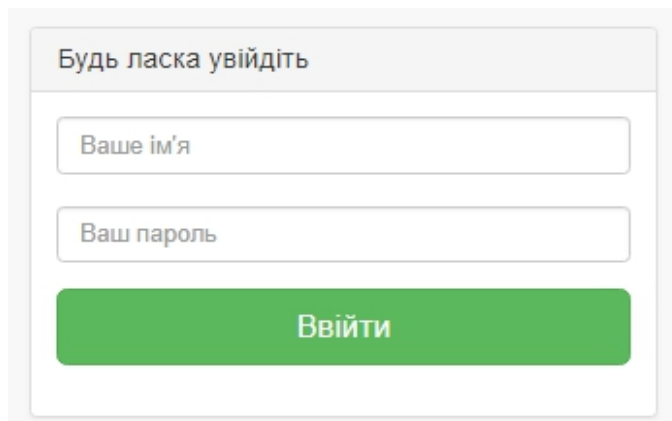


Рис. 2. Вікно входу до веб-додатку для обробки часових рядів

Завантажимо часовий ряд (Рисунок 3), для демонстрації скористаємось декількома варіантами.

1. Завантаження даних з коду самого веб-додатку (для відображення часового ряду потрібно натиснути будь-які тестові дані: авіаперевезення, сонячні плями).
2. Завантаження даних з буфера обміну (попередньо копіюючи часовий ряд).
3. Завантаження даних з txt-файлу (необхідно обрати текстовий файл формату txt).
4. Завантаження даних з json-файлу (необхідно обрати текстовий файл формату json).

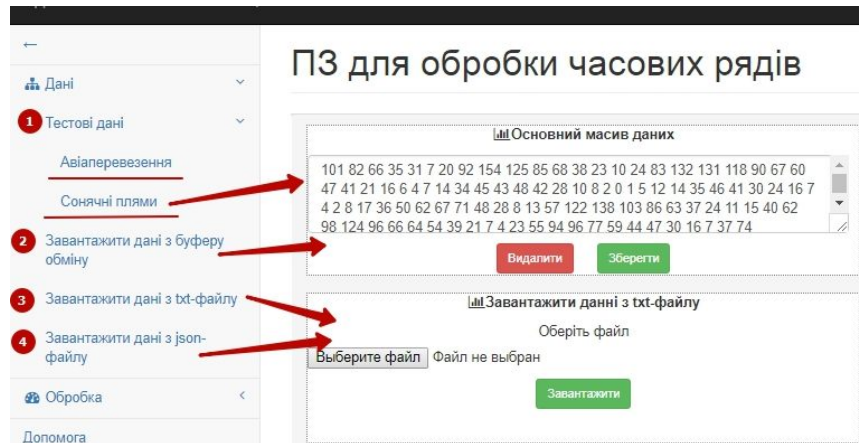


Рис. 3. Завантаження часового ряду

У наданій версії веб-додатку для аналізу часових рядів реалізовані метод експоненціального згладжування та нелінійне перетворення Бокса-Кокса (Box-Cox Transformation).

Експоненціальне згладжування часового ряду здійснюється за рекурентною формулою [5]:

$$S(t) = \alpha \cdot x(t) + (1 - \alpha) \cdot S(t-1), \tag{1}$$

де  $\alpha$  – параметр згладжування;  $S(t)$  – згладжене значення часового ряду  $X = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_t\}$ .

Значення параметру згладжування  $\alpha$  знаходиться у межах  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

Нелінійне перетворення сигналу по методу Бокса-Кокса [6]. Згладжування часового ряду  $X$  здійснюється за формулою:

$$S(t) = \begin{cases} \frac{X(t)^\lambda - 1}{\lambda} & \text{якщо } \lambda \neq 0 \\ \ln(X(t)) & \text{якщо } \lambda = 0 \end{cases}, \tag{2}$$

де  $S(t)$  – згладжене значення,  $\lambda$  - параметр.

Для дослідження часового ряду у головному вікні веб-додатка (рис. 1) нагиснемо на елемент меню "Обробка" – "Вибір методу обробки". Після введення даних (меню "Дані"), вибору методу і виконання розрахунків одержимо результати. Результати обробки методом експоненціального згладжування надані на рис. 4.

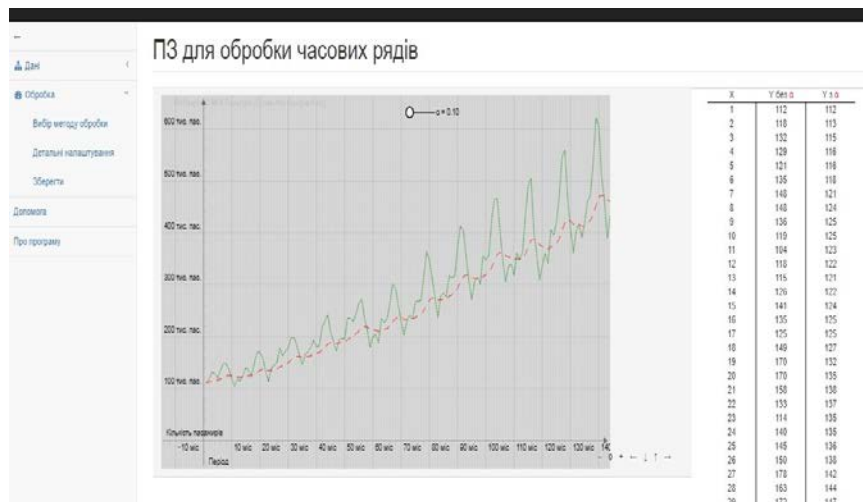


Рис. 4. Метод експоненціального згладжування

Результат отриманий при коефіцієнті згладжування альфа, рівному 0,1. Можлива зміна коефіцієнта за допомогою перетаскування бігунка слайдеру "α".

Друга функція веб-додатку дозволяє провести обробку за допомогою нелінійного перетворення Бокса-Кокса. На рис. 5 показані результати (Лямбда = 0,92).

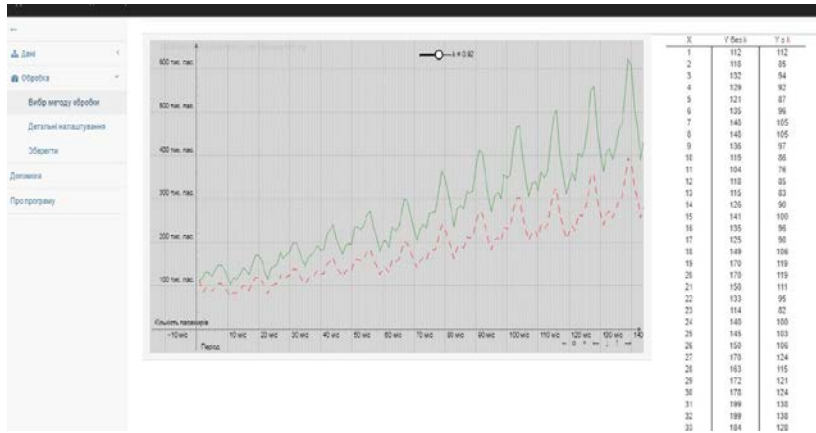


Рис. 5. Обробка методом Бокса-Кокса

Дані до обробки й після застосування методу експоненціального згладжування, нелінійного перетворення Бокса-Кокса наведені у графічному та табличному виді. Таблицю результатів у вигляді числових значень можна переглянути за допомогою колеса прокрутки миші.

Проведено порівняльний аналіз результатів з використанням системи ITSM 2000.

Розглянемо часовий ряд, що характеризує сонячні плями, період дослідження з 1750 року по 1849 рік. Дані представлені у вигляді стовпця чисел і показують кількість груп плям. Усього 100 точок. Дані взяті з файлу SUNSPOTS.dat [2] і є відомим тестовим сигналом.

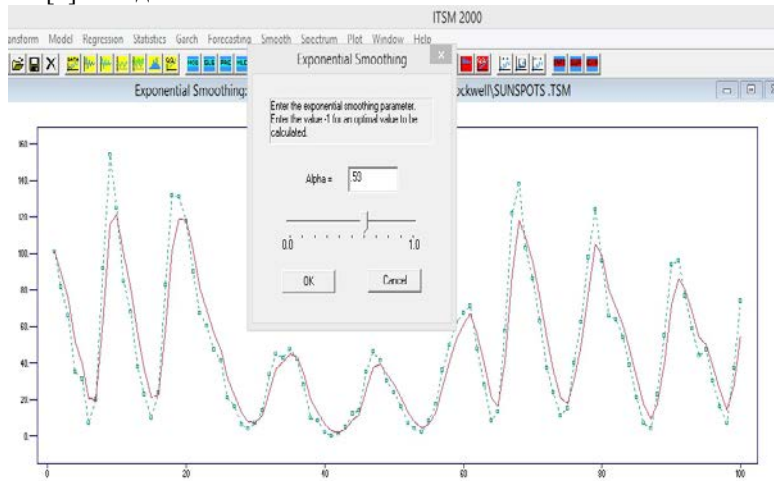


Рис. 6. Експоненціальне згладжування в ITSM 2000

Види екранів системи ITSM2000 та веб-додатку для дослідження часових рядів показані для алгоритму експоненціального згладжування (рис.6, рис.7) та перетворення Бокса-Кокса (рис.8, рис.9).

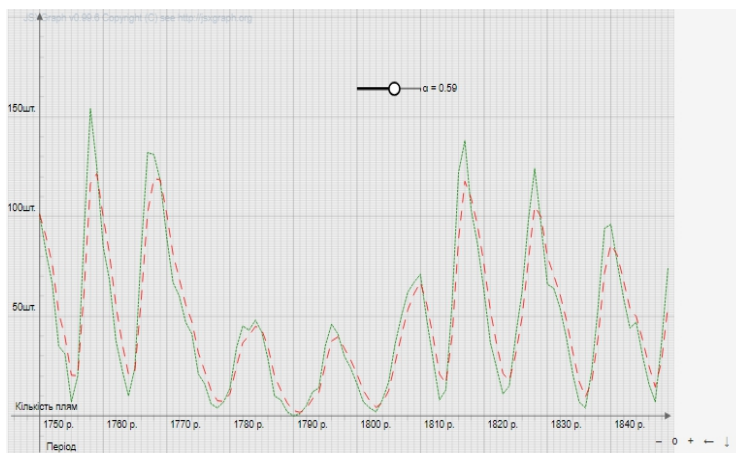


Рис. 7. Експоненціальне згладжування у веб-додатку

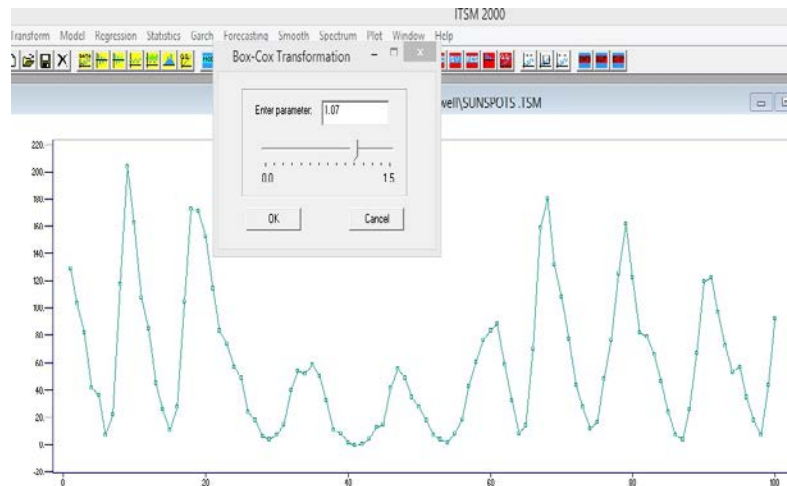


Рис. 8. Нелінійне перетворення Бокса-Кокса в ITSM 2000

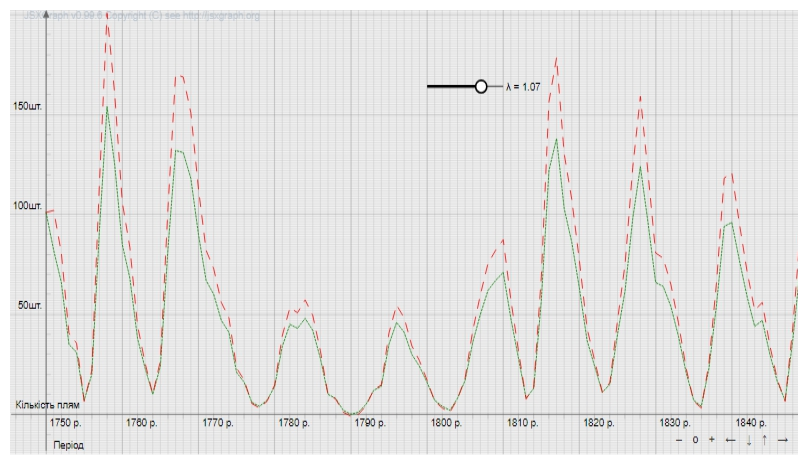


Рис. 9. Нелінійне перетворення Бокса-Кокса у веб-додатку

Порівняльний аналіз по рисункам є якісним. Кількісний аналіз тестування алгоритмів експоненціального згладжування та нелінійного перетворення Бокса-Кокса виконано. Результати співпадають.

### Висновки

Розроблено веб-додаток для аналізу часових рядів. Використано вільне програмне забезпечення. У веб-додатку передбачено перегляд та завантаження даних часового ряду. Реалізовані функції згладжування даних методами експоненціального згладжування та перетворення Бокса-Кокса.

Результатом дослідження часових рядів є масив даних, який не є наглядним, тому виникає інтерес до інструментів для візуалізації даних у графічному вигляді. Для пошуку такого інструменту проведені дослідження та знайдена бібліотека JSXGraph. JSXGraph-бібліотека реалізована на JavaScript і використовується для відображення геометричних креслень в браузері.

Проведено порівняльний аналіз результатів дослідження часових рядів з використанням пакету ITSM 2000. Доведено, що веб-додаток працює якісно. Веб-додаток, який розроблено, передбачає доповнення іншими функціями з дослідження часових рядів.

### Список використаної літератури

1. Taylor Sean J. Prophet: forecasting at scale / Sean J. Taylor, Ben Letham. – Режим доступа: <https://research.fb.com/prophet-forecasting-at-scale/>
2. Brockwell Peter J. Introduction to Time Series and Forecasting / Peter J. Brockwell, Richard A. Davis. – New York: Springer, 2002. – 449 с
3. Дронов В.А. HTML 5, CSS 3 и Web 2.0. Разработка современных Web-сайтов / В.А. Дронов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2011. – 414 с.
4. Интернет-ресурс <https://jsxgraph.uni-bayreuth.de/wp/index.html>
5. Садовникова Н.А. Анализ временных рядов и прогнозирование / Н.А. Садовникова, Р.А. Шмойлова. – М.: Издательский дом Университет "Синергия", 2016. – 152 с.
6. Отнес Р. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. Пер. с англ. / Под ред. В.И. Хохлова / Р. Отнес, Л. Эноксон. – М. – Мир, 1982. – 428 с.



УДК 004.93'12

В.І. ДУБРОВІН, С.О. ІКОЛ  
Запорізький національний технічний університет

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ТА ВІДСТЕЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ВІДЕО ПОСЛІДОВНОСТІ

*Розпізнавання об'єктів є надзвичайно складним завданням в області комп'ютерного зору і однією з основних проблем, що виникають при розробці практичних систем візуального відстеження. У даній роботі було проаналізовано методи відстеження та розпізнавання об'єктів. Виділено основні підходи до розпізнавання об'єктів: шаблони, оптичний потік, віднімання фону, нейронна мережа. Розглянуто основні підходи до спостереження за об'єктами: відстеження точок, відстеження локального максимуму, відстеження силуету. Також був проведений аналіз останніх досліджень і публікацій в області підтримки прийняття рішень в управлінні безпілотним наземним транспортним засобом (БНТЗ) на основі візуального відстеження.*

*Ключові слова: візуальне відстеження, кооперація БНТЗ, розпізнавання об'єктів, режим реального часу.*

В.И. ДУБРОВИН, С.А. ИКОЛ  
Запорожский национальный технический университет

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ И ОТСЛЕЖИВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

*Распознавание объектов является чрезвычайно сложной задачей в области компьютерного зрения и одной из основных проблем, возникающих при разработке практических систем визуального отслеживания. В данной работе проведен анализ методов отслеживания и распознавания объектов. Рассмотрены основные подходы к распознаванию объектов: шаблоны, оптический поток, вычитание фона, нейронная сеть. Выделены основные подходы к слежению за объектами: слежение за точками, слежение за локальными максимумами, слежение за силуэтом. Также проведен анализ последних исследований и публикаций в области поддержки принятия решений в управлении беспилотным наземным транспортным средством (БНТС) на основе визуального отслеживания.*

*Ключевые слова: визуальное отслеживание, кооперація БНТС, распознавания объектов, режим реального времени.*

V.I. DUBROVIN, S.A. IKOL  
Zaporozhye National Technical University

## ANALYSIS OF METHODS OF RECOGNITION AND TRACKING OBJECTS ON VIDEO SEQUENCE

*An unmanned ground vehicle (UGV) ability to track and go behind a moving target is in demand in different applications, especially in situations where the coordination of several UGV is needed. The column movement is one of the common tasks where the UGV cooperation is required.*

*In implementing the decision support system in the UGV management in the column, the visual tracking module is essential one. It allows you to recognize and then track the target silhouette in the image.*

*Object recognition is an extremely difficult task in the computer vision field and one of the main problems that arise in the development of practical systems of visual tracking. An unmanned ground vehicle is an object of increased danger, since it works at high speed and in close proximity to a person. The basic requirements for image processing techniques are presented for usage in the visual tracking system. In this work, tracking and object recognition methods are analyzed. There are such main approaches to object recognition as patterns, optical flow, background subtraction, neural network. Such main approaches to tracking objects are identified: points tracking, kernel tracking, silhouette tracking. Also, recent studies and publications in the field of decision support in the UGV management based on visual tracking are analyzed. Comparative tables are based on such characteristics as processing time of single frame, processing of occlusion and accuracy of methods. The conclusions are that in view of the presented limitations for tracking, it is proposed to use in future several methods of recognition and tracking simultaneously: the YOLO object recognition method for the classification of objects; SURF technique as a key point detector for object identification in class space; and the correlation filter for tracking an object on a video sequence. Usage of a combination of given methods will increase the system's fault-tolerance to the disappearance of the master image from the image or its partial occlusion.*

*Keywords: visual tracking, cooperation of an unmanned ground vehicles, object recognition, real-time mode.*



### Постановка проблеми

Способность беспилотного наземного транспортного средства (БНТС) отслеживать и передвигаться за движущейся целью востребована в самых различных приложениях, особенно в ситуациях, когда необходима координация нескольких БНТС. Кооперация БНТС требует, чтобы отдельные транспортные средства (ТС) имели информацию о позициях и поведении окружающих их ТС перед любыми совместными действиями. Одной из наиболее распространенных задач, в которых требуется кооперация БНТС, является передвижение в колонне. Das [1] дал определение этой задачи как проблемы управления относительной позицией и ориентацией роботов в группе. Предложено много различных форм взаимодействия роботизированных платформ в группе, одной из самых распространенных является модель ведущий/ведомый. Данная форма взаимодействия лучше всего подходит для управления несколькими БНТС путем визуального отслеживания без передачи информации по внешнему каналу связи.

### Анализ последних исследований и публикаций

Задача поддержки принятия решений в управлении БНТС в колонне требует, чтобы мобильный робот следовал за целью, поддерживая определенную дистанцию и ориентацию в пространстве относительно нее. Такая задача особенно полезна для роботизированных конвоев, когда ведущий автомобиль удаленно управляется по радиоканалу, а остальные автомобили двигаются за ним, формируя колонну и позволяя транспортировать предметы снабжения или транспортные средства через опасные районы без риска для жизни людей. Один пользователь может управлять всей группой роботов, явно не указывая управляющие команды для каждого из них. В альтернативном сценарии ведущее БНТС может быть оснащено более совершенными датчиками и вычислительными возможностями для общего планирования и навигации, в то время как ведомые БНТС в колонне являются простыми и/или специализированными. Децентрализация одного большого и дорогого робота снижает вероятность катастрофического сбоя миссии. Использование нескольких мобильных роботов позволяет достичь решения более сложных задач. БНТС, оснащенные возможностью следить за людьми, могут оказаться особенно полезными в индустрии робототехники [2]. Роботизированные "муллы" могли бы следовать за людьми до определенной точки, а затем перемещаться самостоятельно по записанному маршруту, перевозя грузы.

Еще одно потенциальное применение БНТС – поиск и спасение, когда БНТС следует за командами медиков и возвращает стабилизированных пациентов в стационарные больницы, при этом только один медик должен находиться возле БНТС, оставляя остальных свободно продолжать работу с другими пациентами в зоне бедствия.

БНТС должны не только обнаруживать, распознавать и отслеживать свои цели в реальном времени, но и ориентироваться на их поведение. В результате решающее значение имеет распознавание целей и их поведения. БНТС, как правило, оснащены разнообразной комбинацией датчиков для отслеживания целей. Gockley в своей работе [3] использовал активную оптическую систему (LIDAR) для обнаружения цели (человека) и создания траекторий его движения, чтобы роботизированная платформа могла передвигаться по той же траектории. Технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных оптических систем обеспечивает точные измерения, но не освобождает от двусмысленности в идентификации объекта. Методы электронного троса, использующие радиочастотную идентификацию (RFID), являются эффективными, но требуют дополнительных датчиков для более точных измерений. Одним из примеров систем слежения за человеком с использованием нескольких датчиков являются работы Germa [4] и Fiala [5], в которых исследователи объединили данные, полученные с RFID-датчиков и данные, полученные путем обработки изображений. Многие системы используют компьютерное зрение из-за исчерпывающей информации об окружающей среде, пассивной работы и относительно высокой частоты обновления данных.

При реализации системы поддержки принятия решений в управлении БНТС одним из важнейших модулей является модуль визуального отслеживания. Он позволяет распознавать и впоследствии отслеживать силуэт цели на изображении. Под БНТС в данном случае подразумевается полнометражный автомобиль [6], оснащенный системой управления. БНТС является объектом повышенной опасности, поскольку работает на больших скоростях и в непосредственной близости от человека. Поэтому к системе визуального отслеживания выдвигаются дополнительные требования для повышения безопасности:

- обработка одного кадра видеопоследовательности не должна превышать 2 мс (режим реального времени);
- система визуального отслеживания должна быть устойчивой к изменениям освещения, масштаба образа объекта на изображении и его частичной окклюзии;
- система визуального отслеживания должна обладать функцией повторного нахождения объекта слежения после того, как он пропал на несколько кадров из видеопоследовательности.

### Цель исследования

Цель данной работы заключается в анализе методов распознавания и отслеживания объектов на двумерном изображении, которые позволят БНТС отслеживать образ ведущего автомобиля или человека.

**Изложение основного материала исследования**  
**Распознавание объектов**

Распознавание объектов является важной задачей в любом алгоритме слежения. Существует несколько основных направлений в реализации методов распознавания (рис. 1).

**Шаблоны.** Распознаваемый объект может быть представлен моделью шаблона. Модель шаблона может быть создана с использованием базовой формы геометрии, силуэтов объектов или их уникальных точек. Она может содержать как внешний вид, так и специальную информацию об интересующем объекте. Данный подход может использоваться для распознавания объектов, не подверженных большим искажениям на изображении, поскольку увеличение количества характеристик в модели шаблона приводит к уменьшению скорости вычислений.

**Уникальные точки.** Одним из методов распознавания объектов является поиск уникальных точек на изображении. Этот метод обычно используется для обнаружения точек на изображении, которые имеют уникальные характеристики в своей конкретной области. Под уникальными точками подразумеваются некоторые участки изображения, которые являются отличительными в пределах данного изображения. Самые распространённые методы поиска уникальных точек – это методы Harris [7], SIFT, SURF, BRIEF, ORB [8].

**Оптический поток** предназначен для расчета поля оптического потока изображения и дальнейшей кластеризации [9, 10]. Этот метод рассчитывает векторы перемещения всех пикселей на изображении, что позволяет более эффективно обнаруживать движущиеся объекты. Однако большое количество вычислений и высокая чувствительность к шуму на изображении делают его непригодным для использования в режиме реального времени.

**Фазовая корреляция** [11] – это метод для оценки относительного трансляционного смещения между двумя похожими изображениями (корреляция цифрового изображения) или другими наборами данных. Он обычно используется при регистрации изображений и зависит от представления данных в частотной области, как правило, вычисляется быстрыми преобразованиями Фурье.

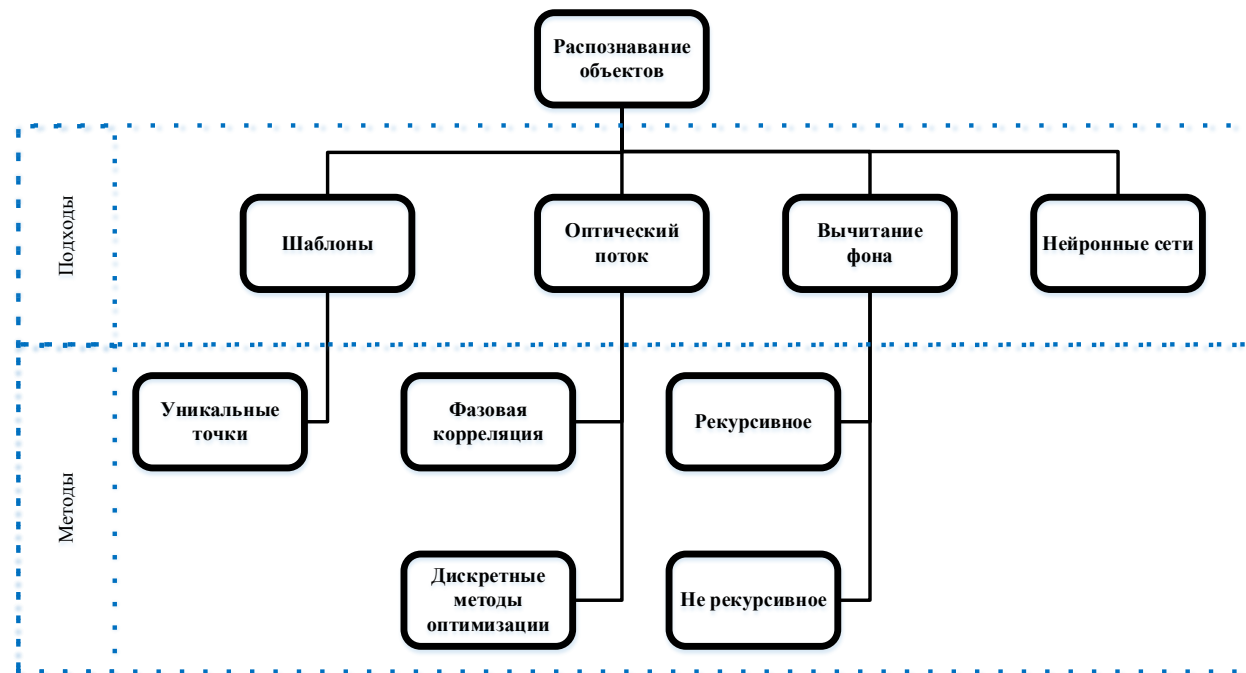


Рис. 1. Методы и подходы к распознаванию объекта.

**Дискретные методы оптимизации.** Вычисление оптического потока может быть достигнуто путем квантования поискового пространства, затем каждому пикселю изображения ставится в соответствие метка таким образом, чтобы расстояние между последовательными кадрами было минимальным [12].

**Вычитание фона.** Обнаружение объекта может быть достигнуто путем создания модели сцены и после этого для каждого последующего изображения выполняется расчет отклонения от модели. Области изображения, в которых отклонение от модели превышает пороговое значение, принадлежат движущемуся объекту. В данном подходе выделяют два основных метода. Это рекурсивное и нерекурсивное вычитание фона. Рекурсивный метод [13] не поддерживает буфер для оценки фона. Вместо этого он обновляет фоновую модель на основе каждого входящего кадра. В нерекурсивном методе [13] для оценки фона

используется скользящее окно. Он хранит буфер предыдущих видеокладов и оценивает фоновое изображение на основе временного изменения каждого пикселя в буфере. В результате ошибка в фоновой модели может задерживаться в течение длительного периода времени.

**Нейронные сети** [14] – это раздел искусственного интеллекта, в котором для обработки сигналов используются явления, аналогичные происходящим в нейронах живых существ. Важнейшая особенность нейронных сетей, свидетельствующая об их широких возможностях и огромном потенциале, состоит в параллельности обработки данных при аппаратной реализации. При большом количестве межнейронных связей это позволяет значительно ускорить процесс обработки информации. Во многих случаях становится возможным преобразование сигналов в реальном времени. Кроме того, при большом числе межнейронных соединений сеть приобретает устойчивость к ошибкам, возникающим на некоторых линиях. Функции поврежденных связей берут на себя исправные линии, в результате чего деятельность сети не претерпевает существенных возмущений.

Таблица 1

Сравнение методов распознавания объектов

Подходы	Методы	Скорость (к/с)	Окклюзия	Точность	Автор
Шаблоны	Уникальные точки	30	+	средняя	[7, 8, 23, 28]
Оптический поток	Фазовая корреляция	30	–	средняя	[11]
	Дискретные методы оптимизации	<30	–	средняя	[12]
Вычитание фона	Рекурсивное	<30	–	средняя	[13]
	Не рекурсивное	30	–	средняя	[13, 24]
Нейронная сеть		>30	+	высокая	[14, 31]

Для распознавания образов сеть накапливает в процессе обучения знания об основных свойствах образов, таких как геометрическое отображение структуры образа, распределение главных компонент или о других характеристиках. При обобщении подчеркиваются отличия образов друг от друга, которые и составляют основу для выработки классификационных решений.

Так как общего решения для задачи распознавания объектов на изображении не существует, часто эти методы приходится совмещать со знаниями из предметной области.

#### Слежение за объектом

Слежение за объектом можно охарактеризовать как проблему оценки траектории движения объекта на плоскости изображения. В случае использования методов слежения за объектами для БНТС необходимо учитывать относительное движение камеры и сцены, что в свою очередь усложняет задачу. Цель отслеживания объектов – генерировать маршрут для объекта в реальном времени, находя его положение в каждом отдельном кадре видеопоследовательности [15]. Согласно работе [16], отслеживание объектов можно классифицировать как слежение за точками, отслеживание локального максимума и отслеживание силуэта. Как описано в работе [16], методы отслеживания можно разделить на следующие категории (рис. 2):

**Слежение за точками.** В структуре изображения движущиеся объекты могут быть представлены в виде набора уникальных точек. Слежение за особыми точками [16] представляет собой сложную проблему, особенно в отношении случаев окклюзий или ошибочного распознавания объекта.

**Фильтр Калмана.** Данный тип отслеживания основан на алгоритме оптимальной рекурсивной обработки данных. Фильтр Калмана [17] представляет собой набор математических уравнений, который является эффективным вычислительным средством для оценки состояния процесса по нескольким аспектам: он поддерживает расчет оценки прошлых, настоящих и будущих состояний, в том числе при условиях, когда точный характер моделируемой системы неизвестен. Уравнения для фильтров Калмана делятся на две группы: уравнения обновления по времени и уравнения обновления измерений. Уравнения обновления по времени отвечают за прогнозирование вперед (по времени) текущего состояния и оценки ковариации ошибок для получения априорной оценки для следующего шага времени. Уравнения измерения отвечают за обратную связь.

**Множественные гипотезы.** Данный алгоритм [16] является итеративным, и для достижения лучших результатов рассматривается несколько кадров в один момент времени. Итерация начинается с набора существующих гипотез пути. Каждая гипотеза – это набор разобренных треков. Для каждой гипотезы делается прогноз положения объекта в последующем кадре. Затем прогнозы сравниваются путем вычисления меры расстояния. Метод множественных гипотез способен отслеживать несколько объектов, обрабатывать окклюзии и вычислять оптимальные решения.

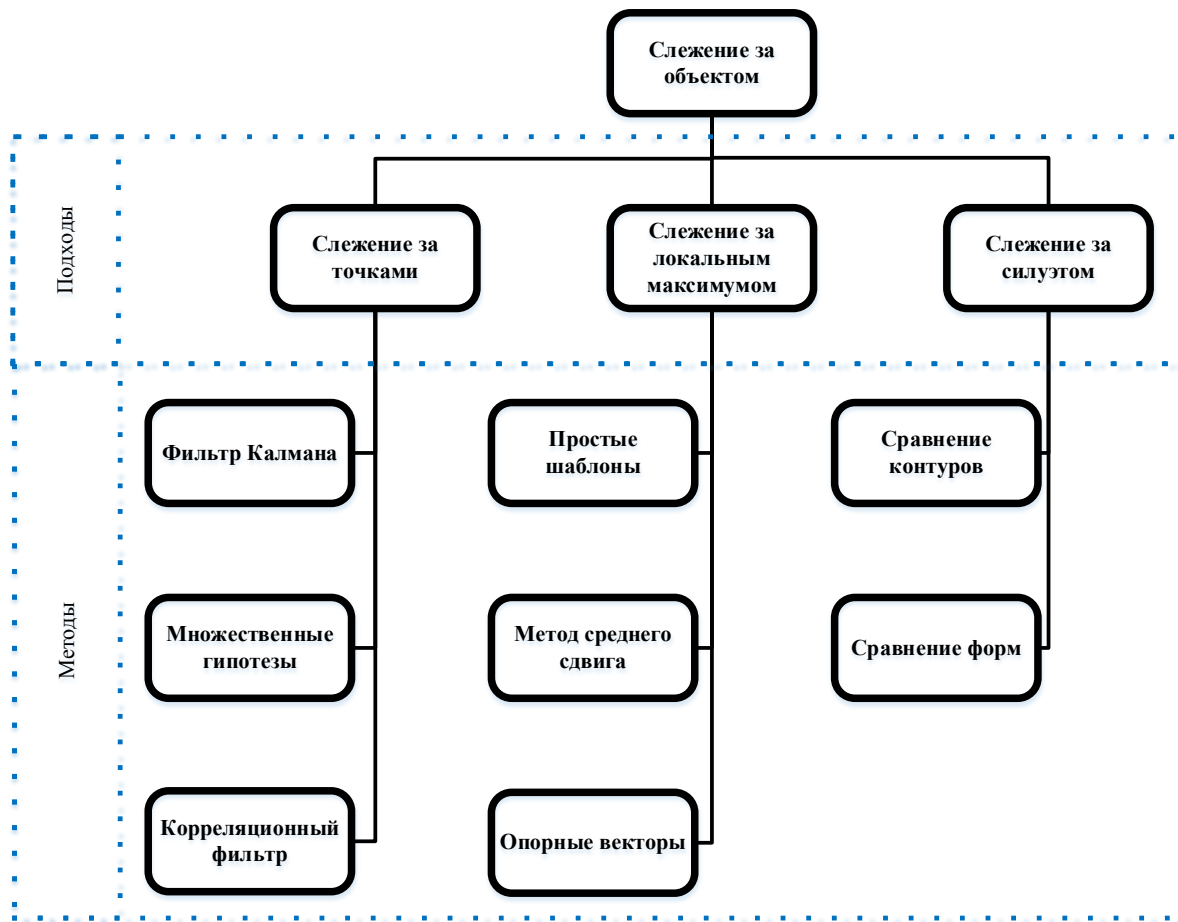


Рис. 2. Методы и подходы слежения за целью.

**Корреляционные фильтры.** Большинство корреляционных фильтров обучаются по набору уникальных точек (областей), наблюдаемых на первом кадре. Позиция объекта определяется корреляционным отношением уникальных точек с текущим и предыдущим кадром. Однако, как только объект частично или полностью закрыт, корреляционное отношение, с каждым последующим кадром начинает уменьшаться, что в итоге приводит к потере объекта слежения или ошибочному отслеживанию.

**Слежение за локальным максимумом.** В данном подходе объекты отслеживаются путем вычисления движения ядра (локального максимума) на каждом кадре. Методы различаются по принципу представления внешнего вида, количества отслеживаемых объектов и техники, используемой для оценки движения объекта.

**Простые шаблоны** [18] – это метод обработки цифровых изображений для поиска небольших частей изображения, соответствующего модели с изображением (шаблоном) в каждом кадре. Процедура сопоставления содержит шаблон изображения для всех возможных позиций в исходном изображении и вычисляет числовой индекс, который определяет, насколько хорошо модель соответствует изображению этой позиции. Данный метод устойчив к частичной окклюзии объекта.

**Метод среднего сдвига** имеет целью найти область изображения, которая наиболее похожа на ранее инициализированную модель. Область изображения, подлежащая отслеживанию, представлена гистограммой. Процедура подъема градиента используется для перемещения трекера в место, которое максимизирует оценку подобию между моделью и текущей областью изображения. Целевая модель обычно представлена функцией плотности вероятностей.

**Опорные векторы** [19] – это метод классификации, использует наборы положительных и отрицательных результатов для обучения. Положительные образцы содержат изображения отслеживаемого объекта, а отрицательные образцы состоят из фона. Данный метод устойчив к окклюзии при отслеживании одного объекта на изображении. Также для инициализации данного метода необходимо указывать начальную позицию объекта.

**Слежение за силуэтом.** Некоторые объекты на изображении могут иметь сложную форму и не могут быть четко определены простыми геометрическими фигурами. Методы, основанные на силуэте [18], дают точное описание фигуры для таких объектов. Целью отслеживания объектов на основе силуэта

является поиск области объекта в каждом кадре с помощью его модели, сгенерированной на предыдущих кадрах.

**Метод сравнения контуров** [18], работает по принципу итеративного перемещения первичного контура в предыдущем кадре к его новой позиции в текущем кадре. Перемещение контура требует, чтобы определенная часть изображения объекта в текущем кадре перекрывалась с областью изображения объекта в предыдущем кадре. Сравнение контуров может выполняться с использованием двух разных подходов. В первом подходе используются модели пространства состояний для моделирования формы и движения контура. Второй подход непосредственно развивает контур, сводя к минимуму его энергию, используя методы прямой минимизации.

**Сравнение форм.** Данный метод производит сопоставление двоичного изображения с известной базой данных изображений. Он используется для распознавания фигур и обеспечивает статистические отношения между просматриваемым объектом и хранящимся в базе данных изображений. Сопоставление формы основано на фактической форме объекта на изображении а не на прямом сопоставлении пикселей, как это сделано при сопоставлении шаблонов изображений. Таким образом, совпадения инвариантны к преобразованию формы, размеру и ориентации.

Таблица 2

Сравнение методов слежения за объектами

Подходы	Методы	Скорость (к/с)	Окклюзия	Точность	Автор
Слежение за точками	Фильтр Калмана	30	–	низкая	[17]
	Множественные гипотезы	<30	+	низкая	[16]
	Корреляционный фильтр	30	+	средняя	[32]
Слежение за локальным максимумом	Простые шаблоны	30	+/-	средняя	[18]
	Метод среднего сдвига	30	–	низкая	[20, 27]
	Опорные векторы	<30	+	средняя	[19]
Слежение за силуэтом	Сравнение контуров	<30	–	средняя	[18, 21]
	Сравнение форм	<30	+/-	средняя	[29, 30]

### Практическое применение методов распознавания и отслеживания объектов на двумерном изображении

Распознавание объектов является чрезвычайно сложной задачей в области компьютерного зрения и одной из основных проблем, возникающих при разработке практических систем визуального отслеживания. Методы распознавания объектов, основанные на внешнем виде, такие как сопоставление гистограммы цвета (Gevers [20]), часто используются в приложениях визуального отслеживания из-за простоты их реализации. К сожалению, сопоставление только цветовой характеристики объекта приводит к низкой точности идентификации. Использование цветowych маркеров устраняет потенциальные несоответствия, но требует дополнительного вмешательства в визуальные характеристики объекта, что не всегда представляется возможным. Методы распознавания геометрических объектов являются перспективными альтернативами подходам на основе внешнего вида. Здесь распознавание основано на форме объекта, в отличие от методов, основанных на его цветовой характеристике. Эти методы используют обнаружение контуров и геометрической информации об объекте для его классификации. Так в работе [21] используется фильтр Гаора для отслеживания игроков на футбольном поле. Исходное изображение проходит несколько стадий обработки: применения пороговой обработки, оконтуривания полученных объектов на изображении и определения геометрических центров игроков. В данном подходе контуры используются для выделения всех объектов одного класса (одной команды) без учета индивидуальных характеристик образов игроков. Kass в своей работе [22] предлагает использовать метод «змеи» или энергосберегающий сплайн для извлечения характеристик контуров. Активные модели контуров эффективны, но довольно медленны, и подвержены ошибкам при окклюзии объекта на изображении.

Weng в своей работе [23] предложил алгоритм улучшения производительности распознавания объектов. В этой работе использована улучшенная версия SURF – метода для извлечения уникальных точек на изображении. Для определения матрицы позиции использовались гомографические методы. Результат моделирования показал, что этот алгоритм эффективно отслеживает и распознает объект. Однако его скорости и точности недостаточно для использования в системах визуального отслеживания реального времени.

Zhang в своей работе [24] предложил подход, основанный на комбинировании разности кадров и непараметрического метода для отслеживания изменений на видеопоследовательности. Результаты моделирования показали, что эффективность этого подхода выше, по сравнению с методом GMM [25] и непараметрическим методом моделирования фона [26]. Кроме того, он может удалять шум из фона, который

дает возможность более точно определять движущийся объект. Существенным недостатком этого подхода является низкая точность в условиях передвижения и камеры и объекта исследования одновременно.

Coşkun в своей работе [27] использовал метод CAMShift (Continuously Apative Mean-Shift) для отслеживания объекта на видеопоследовательности. Кроме того, он продемонстрировал работу этого метода на летательной платформе с изменением размера объекта слежения и освещения. Недостатком данного метода является большая зависимость от цветовой характеристики исследуемого объекта.

Chen [28] разработал систему визуального отслеживания на основе одной камеры для мобильного робота, подверженного ограничениям в движении. Колесный мобильный робот мог передвигаться по траектории, которая была заложена в видеоряд посредством предварительной съемки. Система позиционирования использовала геометрические отношения сравнимых координат уникальных точек для получения преобразования, которое связывает фактическое положение и ориентацию мобильного робота с проложенными в видеоряде. Данная система может использоваться в случаях повторного прохождения БНТС по уже известной траектории, но не подходит для движения по заранее неизвестному маршруту.

Luigi Freda [29] предложил двухуровневую систему отслеживания и передвижения за целью. На нижнем уровне работает подвижная камера, установленная на роботе, задача которой заключалась в отслеживании цели и удержании ее образа в центре изображения. На верхнем уровне на основе координат цели на изображении и угла наклона камеры рассчитывались управляющие сигналы. Экспериментальные исследования проводились на роботе MagelanPro. Основной задачей исследования было отслеживание мяча и передвижение за ним. Для отслеживания положения мяча на изображении использовалась бинаризация по цвету с последующим сглаживанием шума и определения формы объекта.

Celine Teuli в своей работе [30] предложил метод для визуального отслеживания на основе данных, полученных с видеокamеры. В эксперименте был задействован беспилотный летательный аппарат, который следил за миниатюрной машинкой. Система распознавания цели была основана на бинаризации по цвету по нескольким пороговым значениям. Затем информация, полученная от системы распознавания, использовалась для управления положением и углом рыскания БПЛА для преследования положения цели. Методы к распознаванию целей используемые в работах [29, 30] сильно подвержены влиянию освещения и могут давать ложные срабатывания, из-за чего не могут применяться для визуального отслеживания на БНТС.

Redmon в своей работе [31] предложил новый подход к распознаванию объектов (YOLO – you only look onse). Отличительной чертой данного подхода является то, что распознавание объектов рассматривается как единая регрессионная проблема. Это позволило сделать прямой переход от пикселей на изображении к координатам ограничивающего прямоугольника и классификации объектов. В то время как схожие методы используют схему скользящего окна, где вначале используется метод расчета региона для генерации ограничивающих прямоугольников на изображении, а потом для каждого прямоугольника используется классификатор. Данный метод имеет высокую скорость работы, но не может использоваться для идентификации объектов.

Danelljan в своей работе [32] представил корреляционный фильтр для многомерных уникальных точек. В данном методе объединены гистограммы направленных градиентов с локального максимума интенсивности на изображении. Для оценки изменения масштаба используются одномерные фильтры, для оценки геометрических преобразований используются двумерные фильтры, и для локализации объекта на изображении используются трехмерные фильтры. Недостатком данного метода является возрастание ошибки идентификации объекта при условии частичной окклюзии или временного исчезновения с видеоряда.

#### Выводы

В работе рассмотрены методы распознавания и отслеживания объектов на двумерном изображении. Основное внимание уделяется методам, имеющим высокую скорость обработки изображений для возможности их использования в системе визуального отслеживания.

Поддержка принятия решений в управлении БНТС является достаточно сложной задачей, поскольку само БНТС является объектом повышенной опасности. Ввиду представленных ограничений для слежения в дальнейшем предлагается использование одновременно нескольких методов распознавания и отслеживания: метод распознавания объектов YOLO для классификации объектов, метод распознавания уникальных точек SURF для идентификации объекта в пространстве класса и корреляционный фильтр для отслеживания объекта на видеопоследовательности. Использование комбинации данных методов позволит повысить отказоустойчивость системы к исчезновению образа мастера с изображения или его частичной окклюзии.

#### Список использованной литературы

1. Das A.K. A vision based formation control framework / A.K. Das, R. Fierro, R.V. Kumar, J.P. Ostrowski, J. Spletzer, C.J. Taylor // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 2002. – P. 813-825.
2. Троценко Э.А. Система управления БНТС в дистанционном режиме при помощи жестов / Э.А. Троценко, Н.А. Миняйло, С.А. Икол, П.Н. Веропотвелян // Системные технологии. – Днепропетровск: НМетАУ, 2016. – Т.1. – С. 70-84.

3. Gockley R. Natural person-following behavior for social robots / R. Gockley, J. Forlizzi // Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction, 2007. – P. 17-24.
4. Germa T. Vision and RFID-based person tracking in crowds from a mobile robot / T. Germa, F. Lerasle, N. Ouadah, V. Cadenat // Computer Vision and Image Understanding. – 2010. – P. 641-651.
5. Fiala M. Vision Guided Control of Multiple Robots // Proceedings of the First Canadian Conference on Computer and Robot Vision, 2004. – P. 241-246.
6. Обзор беспилотного наземного транспортного средства на базе автомобиля Jeep Cherokee. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ia.ua/ru/solutions-ru/bespilotnye-technologii/unmanned-jeep-ru> (дата обращения: 29.06.2018).
7. Tuytelaars T. Local Invariant Feature Detectors: A Survey / T. Tuytelaars, K. Mikolajczyk. – B.: Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision, 2008. – 104 p.
8. Karami E. Image Matching Using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: Performance Comparison for Distorted Images / E. Karami, S. Prasad, M. Shehata // Conference: Computer Vision and Pattern Recognition, 2015. – P. 120-125.
9. Rupali S. Rakibe. Background Subtraction Algorithm Based Human Motion Detection / Rupali S. Rakibe, Bharati D. Patil // International Journal of Scientific and Research Publications. – 2013. – Vol. 3. – I. 5. – P. 230-234.
10. Abhishek K. C. Moving Object Tracking Using Gaussian Mixture Model and Optical Flow / K. C. Abhishek, K. Prashant // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. – 2013. – Vol. 3. – I. 4. – P. 243-246.
11. Stone H.S. A fast Direct Fourier-Based Algorithm for Subpixel Registration of Images / H.S. Stone, M.T. Orchard, Ee-Chien Chang, S.A. Martucci // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001. – P. 2235-2242.
12. Glocker B. Dense Image Registration through MRFs and Efficient Linear Programming / B. Glocker, N. Komodakis, G. Tziritas, N. Navab, N. Paragios // Medical Image Analysis Journal. – 2008. –Vol. 12. – I. 6. – P. 731-741.
13. Sen-Ching S. Robust techniques for background subtraction in urban traffic video / S. Sen-Ching, Cheung and Chandrika Kamath // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2003. – P. 120-132.
14. Simon Haykin Neural Networks and Learning Machines / Simon Haykin. – B.: McMaster University Hamilton, Ontario, 2009. – 938 p.
15. Ruolin Z. Object Tracking and Detecting Based on Adaptive Background Subtraction / Z. Ruolin, D. Jian // Procedia Engineering Journal. – 2012. – Vol. 29. – P. 1351-1355.
16. J. Joshan Athanesious. Systematic Survey on Object Tracking Methods in Video / J. Joshan Athanesious, P. Suresh // International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET). – 2012. – Vol. 1. – I. 8. – P. 242-247.
17. Welch G. An introduction to the Kalman Filter / G. Welch, G. Bishop. – B.: In University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, 2001. – 81 p.
18. Mr. Joshan Athanesious J. Implementation and Comparison of Kernel and Silhouette Based Object Tracking / Mr. Joshan Athanesious J., Mr. Suresh P. // International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology. – 2013. – Vol. 2. – I. 3 – P. 1298-1303.
19. Mishra R. Multiple Object Tracking by Kernel Based Centroid Method for Improve Localization / R. Mishra, Mahesh K. Chouhan, Dr. Dhiiraj Nitnawwre // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. – 2012. – Vol. 2. – I. 7. – P. 137-140.
20. Gevers T. Color-based Object Recognition / T. Gevers, A.W.M. Smeulders // Image Analysis and Processing: 9th International Conference, 2006. – P. 319-326.
21. Дубровин В.И. Обработка видеоряда спортивных игр с использованием фильтра Габора / В.И. Дубровин, Ю.В. Твердохлеб, Д.В. Панченко // Радиоэлектроника и информатика научно-технический журнал. – Харьков: ХНУРЭ, 2014. – № 1. – С. 46-49.
22. Kass M. Snakes: Active Contour Models / M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos // International Journal of Computer Vision. –1988. –Vol. 1. – I. 4. – P. 321-331.
23. Weng E.N.G. Objects Tracking from Natural Features in Mobile Augmented Reality / E.N.G. Weng, R.U. Khan, S.A.Z. Aduce, O.Y. Bee // Procedia-Soc. Behav. Sci. – 2013. – Vol. 97. – P. 753-760.
24. Zhang J. Moving Object Detection Based on Nonparametric Methods and Frame Difference for Traceability Video Analysis. / J. Zhang, J. Cao, B. Mao // Procedia Comput. Sci. – 2016. –Vol. 91. – P. 995-1000.
25. Zivkovic Z. Efficient Adaptive Density Estimation per Image Pixel for the Task of Background Subtraction / Z. Zivkovic, F. van der Heijden // Pattern recognition letters. – 2006. – Vol. 27. – I. 7. – P. 773-780.
26. Elgammal A. Non-parametric Model for Background Subtraction / A. Elgammal, D. Harwood, L. Davis // Proceedings of Computer Vision—ECCV 2000, 2000. – P. 751-767.

27. Coşkun M. Implementation of Tracking of a Moving Object Based on Camshift Approach with a UAV / M. Coşkun, S. Ünal. // *Procedia Technol.* – 2016. – №22. – P. 556-561.
28. Chen J. Adaptive Homography Based Visual Servo Tracking for Fixed and Camera-in-Hand Configurations / J. Chen, M. Dawson, W. Dixon, and A. Behal // *IEEE Transactions on Control Systems Technology.* – 2005. P. 814- 825.
29. Freda L. Vision-based interception of a moving target with a nonholonomic mobile robot / L. Freda, G. Oriolo // *Robotics and Autonomous Systems.* – 2007. – P. 419-432.
30. Teuliere C. Chasing a moving target from a flying UAV / C. Teuliere, L. Eck, and E. Marchand // *In Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems.* – 2011. – P. 4929-4934.
31. Redmon J. You only look once: Unified, real-time object detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi // *Conference: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016.* – P. 1-11. – Режим доступа: <https://pjreddie.com/media/files/papers/yolo.pdf>
32. Danelljan M. Accurate Scale Estimation for Robust Visual Tracking. [Електронний ресурс] / M. Danelljan, G. Häger, F. S. Khan, and M. Felsberg // *Proceedings of the British Machine Vision Conference.* – 2014. – №24. – P. 1-11. – Режим доступа: <http://www.bmva.org/bmvc/2014/files/paper038.pdf>.



УДК 004.4 + 519.6

Н.М. ЗАЩЕПКИНА, К.М. БОЖКО, Д.С. МЕЛЬНИЧЕНКО

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

## ГРАФІЧНІ ЗАДАЧІ З КОМБІНАТОРИКИ НА ОСНОВІ ЦИФРОВОЇ КЛАВІАТУРИ

Мобільні додатки у наш час є предметом бурхливого розвитку та дослідження. Для розробки мобільних додатків використовують класичні алгоритми. Проте, підготовка програмістів для мобільних пристроїв потребує більшого використання прикладів і задач із графічним наповненням.

Запропоновано, як колись це сталося із шахівницею, використати цифрову клавіатуру телефону для створення та розв'язання задач комбінаторики. В статті сформульовано задачу на розміщення: розбити клавіатуру мобільного телефону на три групи по три клавіші таким чином, щоб вони утворили трійку простих чисел. Цифру 0 не використовувати.

Дана задача є наочною і може бути вирішена із застосуванням аналітичних та графічних засобів. Наочні задачі комбінаторики посідають чільне місце в збірках задач з дискретної математики, теорії алгоритмів, програмування тощо. Графічні або графоаналітичні методи розв'язання задач комбінаторики можна зустріти на багатьох прикладах із шахівницею. Поширеними задачами комбінаторики є пошук різних комбінацій із простих чисел. Прості числа знаходять за допомогою алгоритму Ератосфена або його похідних.

Запропоновані задачі пошуку простих чисел та їх комбінацій із додаванням графічного інструментарію, в якості якого є цифрова клавіатура телефону або іншого побутового пристрою. Загальний алгоритм розв'язання задачі розбиття клавіатури телефону на три групи по три цифри (без нуля) так, щоб утворити три простих числа. Було отримано додаткову умову для обмеження пошуку: не може бути в знайденому числі трьох цифр із набору.

Розв'язано задачу пошуку розміщення по три цифри для дев'яти цифр клавіатури із максимальною сумою:  $947 + 821 + 653 = 2421$ . Мовою Java був створений мобільний додаток із розв'язанням задачі розбиття клавіатури телефону на три простих числа. Задачі комбінаторики із графічною складовою є наочними і сприятимуть швидкому опануванню алгоритмів розв'язання задач програмування та вивчення мов, зокрема такої складної для початківців, якою є мова Java. Програма наведена в статті. Запропоновано додати до наочних інструментів комбінаторики цифрову клавіатуру, яка є звичним елементом побуту сучасної людини.

Ключові слова: алгоритм Ератосфена, прості числа, мобільний додаток.

Н.М. ЗАЩЕПКИНА, К.М. БОЖКО, Д.С. МЕЛЬНИЧЕНКО

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

## ГРАФИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ПО КОМБИНАТОРИКИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ КЛАВИАТУРЫ

Мобильные приложения в наше время является предметом бурного развития и исследования. Для разработки мобильных приложений используют классические алгоритмы. Однако, подготовка программистов для мобильных устройств требует большего использования примеров и задач с графическим наполнением.

Предложено, как когда-то это случилось с шахматной доской, использовать цифровую клавиатуру для создания и решения задач комбинаторики. В статье сформулирована задача на размещение: разбить клавиатуру мобильного телефона на три группы по три клавиши таким образом, чтобы они образовали тройку простых чисел. Цифру 0 не использовать.

Данная задача является наглядной и может быть решена с применением аналитических и графических средств. Наглядные задачи комбинаторики занимают видное место в сборниках задач по дискретной математике, теории алгоритмов, программирование и тому подобное. Графические или графоаналитические методы решения задач комбинаторики можно встретить на многих примерах с шахматной доской. Распространенными задачами комбинаторики является поиск различных комбинаций из простых чисел. Простые числа находят с помощью алгоритма Эратосфена или его производных. Предложенные задачи поиска простых чисел и их комбинаций с добавлением графического инструментария, в качестве которого является цифровая клавиатура телефона или другого бытового устройства. Общий алгоритм решения задачи разбиения клавиатуры телефона на три группы по три цифры (без нуля) так, чтобы образовать три простых числа. Было получено дополнительное условие для

ограничения поиска: не может быть в найденном числе трех цифр из набора. Решена задача поиска размещения по три цифры для девяти цифр клавиатуры с максимальной суммой:  $947 + 821 + 653 = 2421$ .

На языке Java был создан мобильное приложение с решением задачи разбиения клавиатуры телефона на три простых числа. Задачи комбинаторики с графической составляющей является наглядными и способствуют быстрому овладению алгоритмов решения задач программирования и изучение языков, в частности такой сложной для начинающих. Программа приведена в статье. Предложено добавить в наглядные инструменты комбинаторики цифровую клавиатуру, которая является обычным элементом быта современного человека.

Ключевые слова: алгоритм Эратосфена, простые числа, мобильное приложение.

N.M. ZASHCHERKINA, K.M. BOZHKO, D.S. MELNICHENKO  
National Technical University of Ukraine  
"Ihor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute"

## GRAPHIC PROBLEMS FROM COMBINATORS ON THE BASIS OF DIGITAL KEYBOARD

Mobile additions in our time are the article of rapid development and research. For development of mobile additions use classic algorithms. However, preparation of programmers for mobile devices need the greater use of examples and tasks with the graphic filling. It offers, as once it happened to chess-board, to use the digital keyboard of telephone for creation and decision of tasks of combinatorics.

In the article a task is set forth on placing: to divide the keyboard of mobile telephone into three groups for three keys thus, that they formed three of prime numbers. Not to use a number 0.

This task is evident and can be decided with application of analytical and graphic facilities. The evident tasks of combinatorics occupy a main place in collections of tasks from discrete mathematics, theories of algorithms, programming and others like that. The graphic or graphico-analytical methods of decision of tasks of combinatorics can be met on many examples with chess-board.

The widespread tasks of combinatorics is a search of different combinations from prime numbers. Prime numbers find by means of algorithm of Eratosfen or his derivatives. Offer tasks of search of prime numbers and their combinations are with addition of graphic tool, as that there is a digital keyboard of telephone or other domestic device.

A general algorithm of decision of task of laying out of keyboard of telephone is on three groups for three numbers (without a zero) so that to form three prime numbers. An additional condition was got for limitation of search : it can not be in the found number of three numbers from a set. The task of search of placing is decided for three numbers for nine numbers of keyboard with a maximal sum:  $947 + 821 + 653 = 2421$ .

By the language of Java mobile addition was created with the decision of task of laying out of keyboard of telephone on three prime numbers. Tasks of combinatorics with a graphic constituent are evident and will assist the rapid capture of algorithms of decision of tasks of programming and study of languages, in particular such difficult for beginners.

The program is presented in the article. It offers to add to the evident instruments of combinatorics a digital keyboard that is the usual element of way of life of modern man.

Keywords: Eratosfenes algorithm, simple numbers, mobile application.

### Постановка проблеми

Наочні задачі комбінаторики посідають чільне місце в збірках задач з дискретної математики, теорії алгоритмів, програмування тощо. Графічні або графоаналітичні методи вирішення задач комбінаторики можна зустріти на багатьох прикладах із шахівниці [1].

Мобільні додатки у наш час є предметом бурхливого розвитку та дослідження. Для розробки мобільних додатків використовують класичні алгоритми. Проте, підготовка програмістів для мобільних пристроїв потребує, на нашу думку, більшого використання прикладів і задач із графічним наповненням. Нами запропоновано, як колись це сталося із шахівницею, використати цифрову клавіатуру телефону для створення та розв'язання задач комбінаторики.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Поширеними задачами комбінаторики є пошук різних комбінацій із простих чисел. Прості числа знаходять за допомогою алгоритму Ератосфена або його похідних. Так, для знаходження всіх простих чисел, які не перевищують задане число  $n$ , відповідно до методу Ератосфена необхідно виконати наступні кроки:

1. Виписати підряд всі цілі числа від 2 до  $n$ .
2. Нехай змінна  $p$  спочатку дорівнює двом – першому простому числу.
3. Закреслити у списку числа від  $2p$  до  $n$ . При цьому рахують кроками по  $p$  (це будуть числа, які є кратними до  $p$ :  $2p, 3p, 4p, \dots$ ).
4. Знайти перше незакреслене число у списку, яке є більшим за  $p$ .

5. Повторювати кроки 3 та 4 доки змінна  $p$  не досягне значення  $n$ .  
 Результат: усі незакреслені числа від 2 до  $n$  є простими.  
 Алгоритм Ератосфена реалізовано на C++ та іншими мовами програмування [2, 3].  
 Алгоритм Ератосфена досліджений на складність [4], яку для максимального цілого числа  $n$  визначають за формулою:

$$S = (n \ln(\ln n)). \tag{1}$$

У монографіях та підручниках з теорії чисел [5] можна знайти точний доказ формули (1).  
 Великі прості числа використовують у алгоритмі роботи криптографічної системи із відкритим ключем RSA [6], що надає задачам із простими числами практичного інтересу.

**Мета дослідження**

Розв’язати задачу на розміщення: розбити клавіатуру мобільного телефону на три групи по три клавіші таким чином, щоб вони утворили трійку простих чисел. Цифру 0 не використовувати. Одне із рішень зображене на рис. 1. Дана задача є наочною і може бути вирішена із застосуванням аналітичних та графічних засобів.

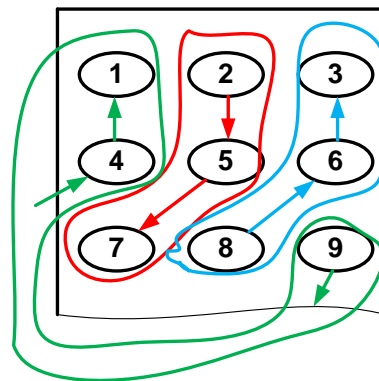


Рис. 1. Розбиття цифрової клавіатури на групи, які утворюють три простих числа: червона зона – число 257, синя зона – число 863, зелена зона – число 941

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Задачу на розміщення формулюють таким чином: розбити множину із  $n$  різних елементів на групи по  $k$  різних елементів в кожній. При цьому вважають розбиття новим, якщо при однакових елементах в групі порядок їх слідування є іншим. Кількість варіантів розміщення визначають за формулою:

$$A(n, k) = n!/(n-k)! \tag{2}$$

Для 9 цифр і 3 груп маємо:  $A = 504$ . Таким чином, із 9 цифр можна утворити 504 комбінації по три числа із різними цифрами.

При розв’язанні поставленої задачі, а саме знайти прості числа, основним є алгоритм Ератосфена. Загальний алгоритм розв’язання задачі розбиття клавіатури телефону на три групи по три цифри (без нуля) так, щоб утворити три простих числа сформулюємо наступним чином:

1. Знайти тризначні числа, які є простими.
2. Знайдені числа не мають цифри "0".
3. Усі цифри в кожному із знайдених чисел є різними.
4. Нами отримано також додаткову умову для обмеження пошуку: не може бути в знайденому числі трьох цифр із набору {1, 3, 7, 9}.

Усього було знайдено 67 чисел, які задовольняють вимогам 1–4. Проте, тільки 59 чисел утворюють розміщення із трьох чисел (групи по три числа із різних цифр). В табл. 1 наведені ці числа та їх кількість по сотнях.

Таблиця 1

Прості тризначні числа та їх кількість по сотнях									
Прості числа	149	241, 251, 257, 263, 269, 281, 283, 293	347, 359, 367, 389	419, 421, 431, 457, 461, 463, 467, 479, 487, 491	521, 523, 541, 563, 569, 571, 587, 593	613, 619, 631, 641, 643, 647, 653, 659, 673, 683	743, 751, 769,	821, 823, 827, 829, 839, 853, 857, 859, 863, 893	941, 947, 953, 967, 983
Усього	1	8	4	10	8	10	3	10	5

Вирішено також задачу пошуку розміщення по три цифри для дев'яти цифр клавіатури із максимальною сумою:  $947 + 821 + 653 = 2421$ .

Мовою Java був створений мобільний додаток із вирішенням задачі розбиття клавіатури телефону на три простих числа. Текст програми наведено нижче.

```
//Класс для проверки цифр в трехзначных числах на повторение
public class PrimeNumberCombination {
public void Combination(int One, int Two, int Three)
{//Три числа которые нам передал главный метод
boolean good = true; //Переменная для подтверждения удачной комбинации //
int ComboNumber[] = new int [9]; //Создаем массив длиной в 9 чисел
ComboNumber[0] = One%10; //Последняя цифра первого числа
ComboNumber[1] = (One/10)%10; //Вторая цифра первого числа
ComboNumber[2] = One/100; //Первая цифра первого числа
ComboNumber[3] = Two%10; //Первая цифра второго числа
ComboNumber[4] = (Two/10)%10; //Первая цифра второго числа
ComboNumber[5] = Two/100; //Первая цифра второго числа
ComboNumber[6] = Three%10; //Первая цифра третьего числа
ComboNumber[7] = (Three/10)%10; //Первая цифра третьего числа
ComboNumber[8] = Three/100; //Первая цифра третьего числа

//Будем сравнивать цифры с 0 по 9 потом с 1 по 9 и т.д
for(int sravn = 0; sravn < 9; sravn++) {
for(int sravnTwo = sravn+1; sravnTwo < 9; sravnTwo++) {
//Если хоть одна цифра совпадет в двух числах, то good поменяется с
True на false
if(ComboNumber[sravn] == ComboNumber[sravnTwo]) {
good = false;
break; //Выйти из цикла, который sravn+1
}
}
if(good == false) {
break; //Если good = false, то выйти из цикла того, что sravn
}
}
// если после операции сравнения good не поменялось на false, то мы
выведем все 3 числа
if(good == true) {
System.out.println(" "+One+" "+Two+" "+Three);
}
}
}
PrimeNumberCombination.java
/*Класс для нахождения простых чисел
методом перебора делителей до корня из числа*/
public class PrimeNumberFound {
public int found(int number){ //В метод приходит число из главного класса
double squerNumber = Math.sqrt(number); //Ищем корень полученного числа
int sqrtNumber = (int) squerNumber; //Убираем все после точки из корня
//Начиная с двойки перебираем все числа с 2 до корня и если на хоть одно
делиться без остатка, то оно нам не подходит
for (int point = 2; point < sqrtNumber; point++) { //Шаг 3
if(number%point==0) {
return 0;
}
}
}
//Если Шаг 3 прошел и не вернул ноль, то значит число простое и вернем
его в качестве результата работы
return number;
}
}
```

```

PrimeNumberFound.java
public class TestMainClass {

    public static void main(String[] args) {
        int FirstNumber;

int LastNumber=999;//Последнее число, до которого мы дойдем во время проверки
int primeMass [];//Место для простых чисел
    primeMass = new int[1000];
    PrimeNumberFound OnceNumber = new PrimeNumberFound();//Создаем экземпляр
из класса для простых чисел
    for(FirstNumber = 100; FirstNumber<LastNumber; FirstNumber++)
    { //(Шаг 1)Цикл с первого числа до последнего
int primeNumber = OnceNumber.found(FirstNumber);//вызываем метод found
if(primeNumber != 0) { //Если метод возвращает не ноль,
    то записать возвращенное число в массив
    primeMass[FirstNumber] = primeNumber;//Запись в массив
    }
    }
int length=primeMass.length;//Узнаем длину полученного массива простых чисел
//Данный цикл нужен, чтобы убрать простые числа с 0 (Шаг 2)
for(int Zero = 0; Zero<length; Zero++) {
if(((primeMass[Zero]/10)%10) == 0) {
primeMass[Zero] = 0;
    }
    }
//поскольку после Шаг 1 и Шаг 2 в массиве полно нулей,
его нужно отсортировать, чтобы нули были в конце
    for(int serialO = 0; serialO<length; serialO++) {
        for(int serialT = 0; serialT<length; serialT++) {
            int timel = 0;
            if(primeMass[serialT]<primeMass[serialO]) {
                timel = primeMass[serialO];
                primeMass[serialO] = primeMass[serialT];
                primeMass[serialT] = timel;
            }
        }
    }
//Дальше нужно обрезать уже отсортированный массив по последнему нулю,
для этого узнаем номер в массиве первого нуля
int primeMassLength = 0;//Запомним номер первого нуля
for(int cut = 0; cut<length; cut++) {
    if(primeMass[cut] == 0) { //как только число в массиве равно
нулю, записать его и прервать цикл
        primeMassLength = cut;
        break;
    }
}
//Теперь будем по очереди выбирать числа из массива для комбинации
for(int pointOne = 0; pointOne < primeMassLength; pointOne++ ) {
    int One = primeMass[pointOne]; //Запомнить первое выбранное число
for(int pointTwo = 0; pointTwo < primeMassLength; pointTwo++) {
    int Two = primeMass[pointTwo]; //Второе выбранное число
for(int pointThree = 0; pointThree< primeMassLength; pointThree++ ){
    int Three = primeMass[pointThree]; //Третье выбранное число
PrimeNumberCombination Don = new PrimeNumberCombination();
//Создаем экземпляр класса для проверки комбинаций из трех выбранных чисел
Don.Combination(One, Two, Three);
//Передаем 3 выбранных числа в гл. метод
    }
}
}

```

```

    }
}
TestMainClass.java

```

Результат роботи програми виведено у вигляді таблиці на екран. Фрагмент розв'язку наведено на рис. 2. Розв'язок – це трійки чисел, що задовольняють вимогам 1-4, які були визначені вище.

```

<terminated> TestMainClass [Java Application] D:\Java\bin\javaw.exe (26 февр. 2018 г., 8:36:40)
983 647 521
983 647 251
983 641 257
983 521 647
983 521 467
983 467 521
983 467 251
983 461 257
983 257 641
983 257 461
983 251 647
983 251 467
967 853 421
967 853 241
967 841 523
967 823 541
967 541 823
967 541 283
967 523 841
967 421 853
967 283 541
967 241 853
961 823 547
961 823 457
961 547 823
961 547 283
961 523 487
961 487 523
961 457 823
961 457 283
961 283 547
961 283 457
953 827 641
953 827 461
953 821 647
953 821 467
953 647 821
953 647 281
953 641 827
953 467 821
953 467 281
953 461 827
<

```

Рис. 2. Результат роботи мобільного додатку: розміщення по три різні цифри із 9 цифр клавіатури, які утворюють тризначні прості числа

### Висновки

Задачі комбінаторики із графічною складовою є наочними і сприятимуть швидкому опануванню алгоритмів вирішення задач програмування та вивчення мов, зокрема такої складної для початківців. Якою є мова Java. Нами запропоновано додати до наочних інструментів комбінаторики цифрову клавіатуру, яка є звичним елементом побуту сучасної людини.

### Список використаної літератури

1. Виленкин Н.Я. Популярная комбинаторика [Текст] / Н.Я. Виленкин – М. :Наука, 1975. – 208 с.
2. Седжвик Р. Алгоритмы на C++ . 2-е изд. [Текст] / Р. Седжвик. – М. : Интуит, 2016. – 1000 с.
3. Sorenson Jonathan. An Introduction to Prime Number Sieves [Текст] / Jonathan Sorenson // Computer Sciences Technical Report #909, Department of Computer Sciences University of Wisconsin-Madison. – January 2 1990. – 15 p.
4. Pritchard Paul. Linear prime-number sieves: a family tree [Текст] / Р. Pritchard // Sci. Comput. Programming. – 1987. – № 9:1. – Р. 17-35.
5. Hardy G.H. An Introduction to the Theory of Numbers 4-ed. [Текст] / G.H. Hardy, E.M. Wright – Oxford. : Clarendon Press? 1975. – 421 p.
6. Кормен Т. Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд. [Текст] / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – К.: Вильямс, 2012. – 1296 с.

УДК 004.056.53

К.В. ЗАЩОЛКІН, О.М. ІВАНОВА  
Одеський національний політехнічний університет**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТРОЛЮ ЦІЛІСНОСТІ ПРОГРАМНОГО КОДУ FPGA-  
БАЗОВАНИХ ПРИСТРОЇВ**

*Розглянуто проблему контролю цілісності програмного коду мікросхем FPGA. Обґрунтовано важливість вирішення цієї проблеми для забезпечення безпеки функціонування обчислювальних та керуючих систем, реалізованих на відповідній елементній базі. Описано основні підходи до контролю цілісності програмного коду, зазначено їх переваги та недоліки. В якості найбільш ефективного виділено підхід, в межах якого контрольна інформація вбудовується в інформаційний об'єкт програмного коду у вигляді цифрового водяного знаку. Запропоновано формалізовану процедуру, яка являє собою послідовність дій, призначених для реалізації методу контролю цілісності на основі вбудовування цифрового водяного знаку. Запропоновано структуру програмного забезпечення, що реалізує наведену процедуру. Відзначено можливість взаємодії програмного забезпечення з САПР Intel Quartus через відповідний програмний інтерфейс API Quartus.*

*Ключові слова:* цілісність програмного коду, FPGA, LUT-орієнтована архітектура, цифровий водяний знак, програмовані обчислювальні блоки, Quartus.

К.В. ЗАЩЕЛКИН, Е.Н. ІВАНОВА  
Одесский национальный политехнический университет**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОДА FPGA-БАЗИРОВАННЫХ  
УСТРОЙСТВ**

*Рассмотрена проблема контроля целостности программного кода микросхем FPGA. Обоснована важность решения этой проблемы для обеспечения безопасности функционирования вычислительных и управляющих систем, реализованных на соответствующей элементной базе. Описаны основные подходы к контролю целостности программного кода, указаны их преимущества и недостатки. В качестве наиболее эффективного выделен подход, в рамках которого контрольная информация встраивается в информационный объект программного кода в виде цифрового водяного знака. Предложена формализованная процедура, которая представляет собой последовательность действий, предназначенных для реализации метода контроля целостности на основе встраивания цифрового водяного знака. Предложена структура программного обеспечения, реализующего приведенную процедуру. Отмечена возможность взаимодействия программного обеспечения с САПР Intel Quartus через соответствующий программный интерфейс API Quartus.*

*Ключові слова:* целостность программного кода, FPGA, LUT-ориентированная архитектура, цифровой водяной знак, программируемые вычислительные блоки, Quartus.

K.V. ZASHCHOLKIN, O.M. IVANOVA  
Odessa National Polytechnic University**ENSURING INTEGRITY MONITORING OF THE PROGRAM CODE OF FPGA-BASED DEVICES**

*The problem of integrity monitoring of the FPGA chip program code is considered. The importance of solving this problem is substantiated for ensuring the safety of the operation of computing and control systems implemented on the corresponding element base. The main approaches to monitoring the integrity of the program code are described, their advantages and disadvantages are indicated. As the most effective, the approach is chosen in which the monitoring information is embedded in the information object of the program code in the form of a digital watermark. It is noted that this approach requires the recovering of the initial state of the information object of the program code during the process of reading the digital watermark when performing integrity monitoring. A formalized procedure is proposed, which is a sequence of actions designed to implement the integrity monitoring method based on the embedding of a digital watermark. The main stages of the procedure consist in obtaining, processing and saving the global information object of the FPGA chip code, as well as the local program codes of the programmable units. Embedding of the digital watermark in the framework of the proposed procedure is performed by equivalent modifications of the program code for a plurality of pairs of sequentially connected units LUT (Look-Up Table). A software structure is proposed that implements the above procedure. According to this structure, software was developed. The analysis of CAD Intel Quartus structure, in the environment of which the target procedure is to be implemented, was made. The possibility of interaction of the software with Intel Quartus*

CAD through the corresponding interface Quartus API is noted. The possibility to obtain the information necessary for the creation of LUT-circuit information model through API Quartus was researched. In the environment of the developed software, testing was carried out, which showed the feasibility of using the theoretical proposals of this work. The proposed procedure and the software that it implements can find application in the organization of the digital watermarks embedding subsystem as part of the integrity monitoring system for FPGA chips.

*Keywords:* program code integrity, FPGA, LUT-oriented architecture, digital watermark, programmable computing units, Quartus.

### Постановка проблеми

Мікросхеми FPGA (Field Programmable Gate Array) є елементної базою, яка широко використовується для побудови цифрових обчислювальних та керуючих пристроїв. Основним конкурентом мікросхем типу FPGA є мікропроцесори та мікроконтролери. Однак структурна організація та принцип програмування мікросхем цих двох класів (класу FPGA і класу мікропроцесорів та мікроконтролерів) створюють для них істотно різні галузі використання. Мікросхеми FPGA характеризується високим ступенем природнього паралелізму їх структури, що дає можливість отримати значно більшу продуктивність в порівнянні з мікропроцесорами [1]. З іншого боку мікросхеми FPGA поступаються мікропроцесорам в оперативності процесу зміни програми. Таким чином, для мікросхем FPGA склалася галузь використання з характерними задачами, які вимагають рівня продуктивності, що не можуть в заданих умовах забезпечити мікропроцесори.

Структурно мікросхема FPGA являє собою матрицю елементарних програмованих блоків, в складі якої присутня система програмованих між'єднань. Номенклатура програмувальних блоків FPGA містить обчислювальні блоки загального призначення, блоки уведення-виводу, а також спеціалізовані блоки, такі як блоки зосередженої пам'яті, блоки множення, DSP-блоки, блоки PLL [2].

Найбільш масовими в структурі FPGA є обчислювальні блоки загального призначення [3], що містять у своєму складі програмований обчислювач LUT (Look-Up Table) і програмований елемент пам'яті. Блок LUT виконує обчислення логічної функції від  $n$  аргументів (зазвичай від 4 до 8 для різних поколінь FPGA). При цьому налаштування блоку LUT на реалізацію конкретної логічної функції виконуються за допомогою  $2^n$  розрядного програмного коду.

Програмний код (конфігураційна інформація, bitstream) FPGA задає функції всіх блоків мікросхеми, визначає комутацію блоків між собою та з'єднання блоків з виводами мікросхеми [4]. Програмний код блоків LUT є частиною програмного коду мікросхеми FPGA і відповідає тільки за налаштування цих блоків на реалізацію конкретних логічних функцій.

Як і для інших цифрових пристроїв, що керуються програмно, для FPGA характерна проблема забезпечення цілісності програмного коду [5]. Особливої уваги ця проблема потребує по відношенню до FPGA-базованих пристроїв, які забезпечують керування об'єктами підвищеного ризику [6, 7]. Порушення цілісності програмного коду FPGA-базованих пристроїв, що входять до складу систем критичного застосування потенційно може привести до виникнення неприйнятних наслідків. Це обумовлює актуальність задачі забезпечення цілісності програмного коду FPGA-базованих пристроїв.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомий підхід до контролю цілісності програмного коду [8], в межах якого для програмного коду за допомогою відповідної хеш-функції [9] обчислюється хеш-сума – унікальна двійкова послідовність фіксованої довжини, яка поставлена в однозначну відповідність програмному коду. При цьому обсяг хеш-суми значно менше обсягу програмного коду. Обчислена хеш-сума фіксується в якості еталонної для інформаційного об'єкта відповідного програмного коду. На етапі контролю цілісності для програмного коду, що контролюється, знову обчислюється його хеш-сума. Якщо обчислена хеш-сума збігається з еталонною, то робиться висновок про цілісність програмного коду. В іншому випадку цілісність вважається порушеною.

Недолік зазначеного підходу полягає в тому, що еталонна хеш-сума є відкритою та доступною для аналізу, а факт того, що цілісність програмного коду контролюється не є прихованим від зовнішнього спостерігача. Крім цього еталонна хеш-сума є фізично відокремленою від програмного коду. Всі ці фактори відкривають можливості для спроб приховати порушення цілісності шляхом фальсифікації хеш-суми.

Відомий більш складний підхід до контролю цілісності програмного коду [10], який усуває деякі з зазначених недоліків першого підходу. Для усунення відкритості еталонної хеш-суми виконується її шифрування. В цьому випадку для того, щоб мати доступ безпосередньо до еталонної хеш-суми необхідно її дешифрувати, використовуючи відповідний криптографічний ключ. Крім цього, для усунення відокремленого зберігання програмного коду (який контролюється) та еталонної хеш-суми виконується приєднання еталонної хеш-суми до інформаційного об'єкта програмного коду [11].

Для контролю цілісності в рамках цього підходу від інформаційного об'єкта програмного коду відокремлюється контрольна частина, яка містить еталонну хеш-суму. В результаті цього інформаційний об'єкт набуває первісного стану, якого він мав до приєднання до нього контрольної частини. Обчислена для первісного стану інформаційного об'єкта хеш-сума порівнюється з підданою розшифруванню еталонною



хеш-сумою. За результатами цього порівняння приймається рішення про цілісність інформаційного об'єкта програмного коду.

Недолік зазначеного удосконаленого підходу [12] полягає в складності (а в деяких випадках і неможливості) прямого включення зашифрованої хеш-суми в тіло інформаційного об'єкта програмного коду. Крім того, зберігається проблема відкритості факту наявності контролюючої інформації, що дає можливість виконати спроби злому шифру (шляхом перебору, або методами виконання складної атаки) та фальсифікації еталонної хеш-суми.

Також існує підхід до контролю цілісності програмного коду, який усуває основні недоліки попередніх зазначених підходів за рахунок того, що еталонна хеш-сума (або її зашифрована версія) вбудовується в інформаційний об'єкт програмного коду у вигляді цифрового водяного знаку (ЦВЗ) [13]. Такий підхід приховує факт наявності в об'єкті інформації, яка може використовуватися для контролю цілісності об'єкта. Методи застосування подібного підходу [14, 15] добре опрацьовані для пасивних інформаційних об'єктів (які виконують виключно функцію зберігання даних). Розробка та реалізація подібних методів для активних інформаційних об'єктів, до яких відноситься програмний код FPGA, являє собою важливу технічну задачу.

#### Мета дослідження

Відомий базовий метод [16] та його модифікації [17, 18], призначені для вбудовування ЦВЗ в інформаційний об'єкт програмного коду FPGA. В межах цього методу для всього програмного коду мікросхеми FPGA обчислюється хеш-сума, призначена для контролю цілісності. Обчислена хеш-сума вбудовується у вигляді ЦВЗ в програмний код блоків LUT. Вбудовування виконується за допомогою еквівалентного перетворення програмного коду на множенні послідовно з'єднаних пар блоків LUT. При цьому для виконання задачі контролю цілісності метод забезпечує відновлення первісного стану програмного коду при добуванні ЦВЗ з нього. Під первісним станом тут розуміється той стан, що програмний код мав до вбудовування в нього ЦВЗ.

Мета даної роботи полягає в розробці підходу до практичної реалізації зазначених методів [16–18]. Для досягнення зазначеної мети пропонується вирішення наступних задач: а) формалізація процедури вбудовування контрольної інформації в інформаційний об'єкт програмного коду мікросхем FPGA; б) визначення структури та загальних принципів функціонування програмного забезпечення, призначеного для реалізації запропонованої процедури.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Пропозиції даної роботи розглядаються на прикладі апаратного та програмного забезпечення компанії Altera, яка є підрозділом корпорації Intel. На поточний час Altera (Intel) є одними з основних виробників FPGA. Через уніфікацію архітектури мікросхем FPGA, а також структури і функціональностей програмного забезпечення проектування, пропозиції даної роботи справедливі також і для мікросхем інших виробників FPGA.

Інформаційний об'єкт програмного коду  $C_{FPGA}$ , для якого виконується контроль цілісності, являє собою структуровану сукупність двійкових даних, які безпосередньо виконують конфігурування мікросхеми FPGA. Процедура контролю цілісності цього інформаційного об'єкта складається з двох стадій:

- а) стадії вбудовування контрольної інформації в об'єкт програмного коду;
- б) стадії зчитування контрольної інформації з контрольованого об'єкта та прийняття рішення відносно його цілісності.

Відповідно до положень методів [16–18] приймачем ЦВЗ (який містить контрольну інформацію), є програмний код  $C_{LUT} \subset C_{FPGA}$  блоків LUT, що налаштовує ці блоки на реалізацію конкретних логічних функцій. За комунікацію блоків LUT між собою відповідає  $C_{comLUT} \subset C_{FPGA}$  – інша частина загального програмного коду  $C_{FPGA}$ . При цьому  $C_{LUT} \cap C_{comLUT} = \emptyset$ . Методи вбудовування ЦВЗ, що використовуються в даній роботі потребують наявності інформації не тільки про сам програмний код  $C_{LUT}$  блоків LUT, а й інформації про зв'язки блоків між собою.

Основною проблемою вбудовування ЦВЗ в інформаційний об'єкт програмного коду FPGA є отримання детальної інформації про зв'язки програмованих блоків мікросхеми, реалізовані для даного проекту, а також локального програмного коду цих блоків. Компанія Altera (Intel) забезпечує процес проектування FPGA-базованих пристроїв за допомогою САПР Intel Quartus Prime (далі Quartus). Інформація про розміщення програмованих блоків в просторі мікросхеми FPGA зберігається у внутрішній базі даних Quartus-проекту. При вбудовуванні ЦВЗ в процесі проектування пристрою ця інформація може бути отримана з Quartus-проекту. При вбудовуванні ЦВЗ в мікросхему FPGA, яка уже перебуває в експлуатації ця інформація може бути прочитана з конфігураційної пам'яті FPGA в середовищі Quartus. САПР Quartus має програмний інтерфейс API (Application Program Interface), через який може бути вирішена задача одержання інформації про розміщення програмованих блоків та їх програмний код. З урахуванням цих особливостей пропонується послідовність дій, яка складає процедуру вбудовування ЦВЗ в інформаційний об'єкт програмного коду FPGA (табл. 1) відповідно до методів [16–18].

Таблиця 1

**Процедура вбудовування ЦВЗ в інформаційний об'єкт програмного коду мікросхеми FPGA**

№ етапу	Дія, що виконується	Джерело первісних даних	Засіб виконання дії
1	Отримання інформаційного об'єкта програмного коду мікросхеми FPGA $C_{FPGA}$	Конфігураційний файл FPGA	САПР Quartus
2	Обчислення хеш-суми $H(C_{FPGA})$ для об'єкта $C_{FPGA}$	Об'єкт програмного коду $C_{FPGA}$	Стандартний програмний модуль
3	Отримання сукупності локальних програмних кодів блоків LUT $C_{LUT}$	База даних проекту в САПР Quartus	САПР Quartus та власний програмний модуль
4	Отримання інформації про з'єднання блоків LUT (програмний код $C_{comLUT}$ )	База даних проекту в САПР Quartus	САПР Quartus та власний програмний модуль
5	Побудова інформаційної моделі схеми, утвореної блоками LUT та їх зв'язками, яка містить дані про програмний код кожного блоку LUT	Етапи 2–4	Власні програмні модулі
6	Обробка отриманої інформаційної моделі	Етап 5	Власний програмний модуль
7	Аналіз інформаційної моделі, та обчислення нових значень програмних кодів цільових блоків LUT, відповідно до обраних методів контролю цілісності	Етап 6	Власний програмний модуль
8	Модифікація програмних кодів блоків LUT і занесення результатів в базу даних проекту та в загальний програмний код FPGA	Етап 7	САПР Quartus та власний програмний модуль

Наведена в табл. 1 пропонується процедура складається з восьми етапів. На етапі 1 з Quartus-проекту отримується глобальний програмний код мікросхеми FPGA, організований у вигляді конфігураційного файлу (інформаційний об'єкт програмного коду  $C_{FPGA}$ ). На етапі 2 для цього інформаційного об'єкта за допомогою визначеної хеш-функції обчислюється хеш-сума  $H(C_{FPGA})$ . Реалізація етапів 1 та 2 не потребує розробки власного програмного забезпечення, та може бути здійснена засобами САПР Quartus та стандартними програмними модулями.

На етапі 3 виконується отримання програмного коду блоків LUT, а на етапі 4 – інформації про схему з'єднання цих блоків. Зазначена інформація може бути отримана з САПР Quartus через програмний інтерфейс Quartus API. Для отримання інформації необхідна розробка відповідних власних програмних модулів.

На етапі 5 виконується побудова інформаційної моделі схеми, утвореної блоками LUT. Інформаційна модель містить структуровану сукупність даних про схему та локальні програмні коди її блоків, що забезпечує подальшу процедуру контролю цілісності програмного коду. Модель, являє собою п'ятикомпонентний кортеж:

$$M = \langle L, C_L, I, O, C_{LIO} \rangle,$$

де  $L$  – множина блоків LUT, що утворюють схему;  
 $C_L$  – множина зв'язків блоків LUT між собою;  
 $I$  – множина входів схеми;  
 $O$  – множина виходів схеми.  
 $C_{LIO}$  – множина зв'язків блоків LUT із зовнішнім середовищем (входами й виходами схеми).

Множина  $C_{LIO}$  складається із двох підмножин, які не перетинаються:  $C_{LIO} = C_{LO} \cup C_{LI}$ , де  $C_{LO}$  – множина зв'язків блоків LUT з виходами схеми,  $C_{LI}$  – множина зв'язків блоків LUT із входами схеми. Кожний елемент  $l$  множини  $L$  являє собою кортеж наступного виду:

$$l = \langle id_L, name_L, code_L, location_L, iPorts_L, oPort_L \rangle,$$

де  $id_L$  – унікальний ідентифікатор блоку LUT,  $name_L$  – символічне ім'я блоку;  $code_L$  – програмний код блоку;  $location_L$  – інформація про локалізацію блоку в матриці мікросхеми FPGA;  $iPorts_L$  – множина вхідних портів блоку;  $oPort_L$  – вихідний порт блоку.

На етапі 6 пропонується виконання попередньої обробки отриманої інформаційної моделі. Обробка полягає у видаленні з моделі інформації про блоки, які не можуть бути застосовані в процесі вбудовування ЦВЗ через обмеження, що накладають на цільові блоки методи [16–18]. Так блоки LUT в структурі мікросхем FPGA мають декілька запрограмованих режимів функціонування, основними з яких є нормальний

режим (normal mode) та арифметичний режим (arithmetic mode). В процесі обробки моделі з неї пропонується вилучати блоки LUT трьох типів:

- *тип 1*: блоки, які настроєні на функціонування в арифметичному режимі;
- *тип 2*: блоки, що функціонують в нормальному режимі, але є кінцевими вузлами в ланцюгу, утвореному блоками арифметичного режиму;
- *тип 3*: блоки, вихід яких підключений до більше, ніж  $N$  входів інших блоків LUT (параметр  $N$  не є фіксованим і задається в процесі роботи системи вбудовування ЦВЗ в програмний код FPGA).

Блоки LUT типу 1 вилучаються з інформаційної моделі через те, що методи [16–18] не застосовують блоки, які функціонують в арифметичному режимі для вбудовування розрядів ЦВЗ. Блоки виду типу 2 вилучаються через те, що блоки, кінцеві в ланцюгу, утвореному блоками арифметичного режиму мають додатковий вхід прийому переносу, що не дає можливості вбудовування в них розрядів ЦВЗ відповідно до методів [16–18]. Причина вилучення блоків типу 3 полягає в тому, що при вбудовуванні розряду ЦВЗ в блоки такого виду (виходи яких є входами для  $N$  інших блоків) програмний код всіх  $N$  цих блоків другого рівня потребує модифікації. Тому перед початком вбудовування ЦВЗ задається поріг  $N$ , який слугує критерієм віднесення блоків до типу 3.

На етапі 7 виконується безпосередньо вбудовування розрядів ЦВЗ в пари послідовно підключених блоків LUT. Базовий метод вбудовування використовує еквівалентне перетворення кодів пари таких блоків. Програмний код першого блоку пари інвертується для досягнення потрібного значення в заданому розряді коду. Програмний код другого блоку пари при цьому модифікується шляхом спеціальної перестановки розрядів для компенсації інверсії коду першого блоку пари. На етапі 8 обчислені нові значення програмних кодів блоків LUT заносяться до внутрішньої бази даних проекту. Після цього виконується оновлення інформаційного об'єкта програмного коду мікросхеми FPGA. Етапи 7 та 8 реалізуються через програмний інтерфейс Quartus API і потребують розробки власного програмного забезпечення.

На рис. 1 представлена модульна структура програмного забезпечення, яке реалізує запропоновану процедуру вбудовування ЦВЗ в інформаційний об'єкт програмного коду FPGA. Основу зазначеної структури складають програмні модулі, що визначені в табл. 1 у якості власних програмних модулів. Засобами передачі даних між модулями слугують файли формату JSON, а також структуроване подання інформаційної моделі LUT-схеми.

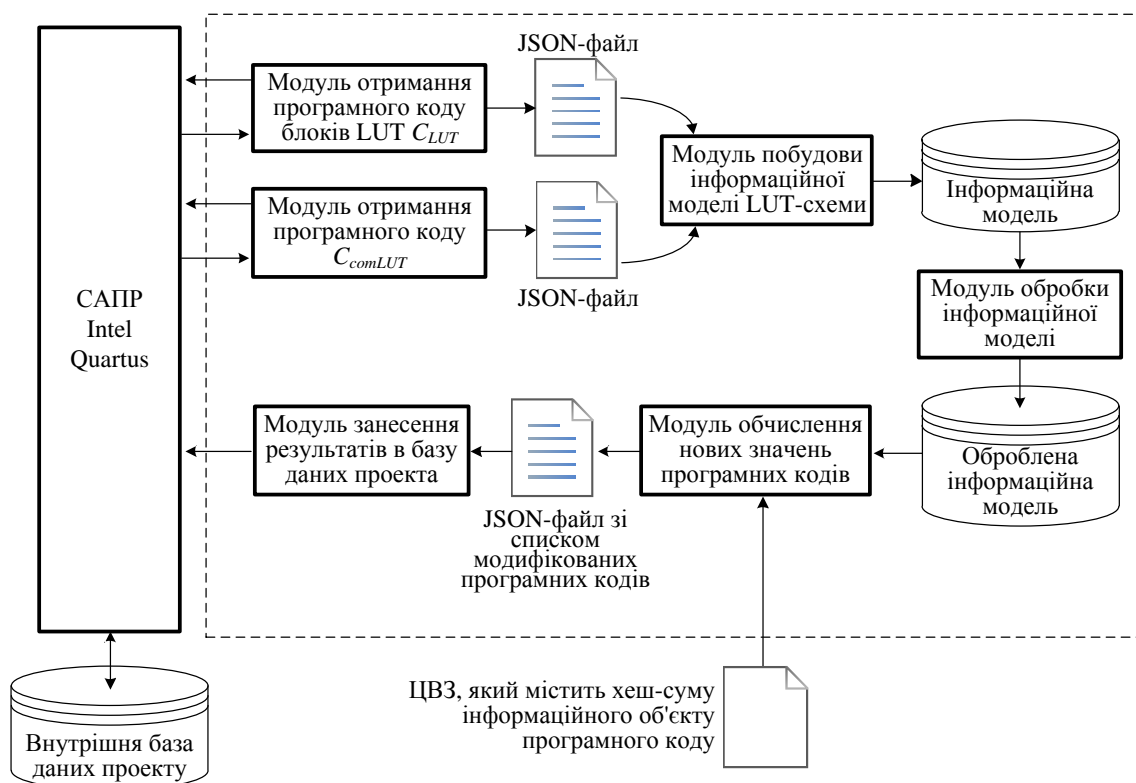


Рис. 1. Структура програмного забезпечення, що реалізує запропоновану послідовність дій.

Запропонована в даній роботі процедура вбудовування ЦВЗ, реалізована програмно, відповідно до наведеної структури (рис. 1). Реалізація виконана на мові програмування С# в межах програмної платформи .Net. В середовищі розробленого програмного забезпечення проведено тестування, метою якого було практичне підтвердження доцільності використання методів [16–18], а також можливості застосування запропонованої процедури та структури програмного забезпечення.

### Висновки

В роботі запропонована процедура вбудовування ЦВЗ в інформаційний об'єкт програмного коду FPGA-базованих пристроїв з метою контролю цілісності інформаційного об'єкта. Процедура являє собою послідовність етапів обробки глобального інформаційного об'єкта та локальних програмних кодів окремих програмованих блоків FPGA-базованого пристрою. Також запропонована модульна структура програмного забезпечення, що втілює зазначену процедуру вбудовування ЦВЗ. Відповідно до даної структури розроблено програмне забезпечення, в середовищі якого проведено тестування, що показало доцільність використання пропозицій роботи. Запропоновані в роботі процедура та програмне забезпечення, що її реалізує, можуть знайти застосування при організації підсистеми вбудовування ЦВЗ у складі системи контролю цілісності програмного коду мікросхем FPGA.

### Список використаної літератури

1. Andina J. FPGAs: Fundamentals, Advanced Features and Applications in Industrial Electronics / J. Andina. – CRC Press, 2017. – 266 p.
2. Vanderbauwhede W. High-performance computing using FPGAs / W. Vanderbauwhede, K. Benkrid. – New-York: Springer, 2016. – 525 p.
3. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. 3-е издание / Е.П. Угрюмов. – СПб.: БХВ, 2011. – 816 с.
4. Защелкин К. В. Исследование основных характеристик FPGA-проектов при изменении кодов в блоках LUT / К.В. Защелкин, Н.А. Кузнецов, А.В. Дрозд // Науковий вісник Чернівецького університету: Комп'ютерні системи та компоненти. – 2014. – Т. 5. – Вип. 2. – С. 41-45.
5. Mukhopadhyay D. Hardware Security: Design, Threats, and Safeguards / D. Mukhopadhyay, R. Chakraborty. – Boca Raton: Chapman and CRC, 2014. – 542 p.
6. Дрозд А.В. Оценка контролепригодности цифровых компонентов встроенных систем критического применения / А.В. Дрозд, В.С. Харченко, С.Г. Антошук, М.А. Дрозд, Ю.Ю. Сулима // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 6. – С. 184-190.
7. Green Experiments with FPGA / A. Drozd, J. Drozd, S. Antoshchuk, V. Antonyuk, K. Zashcholkin, M. Drozd, O. Titomir // Green IT Engineering: Components, Networks and Systems Implementation / eds. V. Kharchenko, Y. Kondratenko, J. Kacprzyk. – Berlin: Springer Publishing. – 2017. – Vol. 105. – P. 219-239.
8. Vacca J. Computer and information security / J. Vacca. – USA, Waltham: MK Publishers, 2013. – 1280 p.
9. Vasu S. An Integrity Verification System for Images Using Hashing and Watermarking / S. Vasu, S. George, P. Deepthi // Proc. of the Int. Conf. on Communication Systems and Network Technologies (Rajkot, India, 11–13 May 2012). – 2012. – P. 85-89.
10. Katz J. Introduction to Modern Cryptography, Second Edition / J. Katz, Y. Lindell. – CRC PRESS, 2014. – 603 p.
11. Ferguson N. Cryptography engineering / N. Ferguson, B. Schneier, T. Kohno. – Hoboken: Wiley, 2013. – 354 p.
12. Kleidermacher D. Embedded Systems Security: Practical Methods for Safe and Secure Software and Systems Development / D. Kleidermacher, M. Kleidermacher. – Boston: Newnes, 2012. – 416 p.
13. Shih F. Digital Watermarking and Steganography: Fundamentals and Techniques, 2nd edition / F. Shih. – CRC Press, 2017. – 292 p.
14. Fridrich J. Steganography in Digital Media / J. Fridrich. – Cambridge University Press, 2010. – 438 p.
15. Cox I. Digital Watermarking and Steganography / I. Cox, M. Miller, J. Bloom, J. Fridrich. – Amsterdam: Morgan Kaufmann Publishers, 2008. – 594 p.
16. Zashcholkin K. The Control Technology of Integrity and Legitimacy of LUT-Oriented Information Object Usage by Self-Recovering Digital Watermark / K. Zashcholkin, O. Ivanova // CEUR Workshop Proceedings. – 2015. – Vol. 1356. – P. 486-497.
17. Защелкин К.В. Адаптация метода внедрения цифровых водяных знаков F5 к среде LUT-ориентированных информационных контейнеров / К.В. Защелкин, Е.Н. Иванова // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – 2016. – № 44 (1216). – С. 135-146.
18. Zashcholkin K. LUT-object integrity monitoring methods based on low impact embedding of digital watermark / K. Zashcholkin, O. Ivanova // Proceedings of the 14th International Conference "Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2018)". – Lviv-Slavske, 2018. – P. 519-523.

УДК 004.89

Н.М. КОРАБЛЕВ, А.А. ФОМИЧЕВ  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники**ГИБРИДНЫЕ МОДЕЛИ КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ НА  
ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ ИММУННОЙ СЕТИ**

*Рассмотрено решение задач классификации и кластеризации данных на основе гибридных моделей искусственной иммунной сети, которая позволяет изменять как способ группировки исходных данных, так и структуру сети иммунных объектов. Использование адаптивной иммунной модели позволяет группировать данные или на основе обучающей выборки, или в процессе иммунной обучения. Гибридизация иммунных методов и моделей интеллектуальной обработки информации позволяет повысить их эффективность, что выражается в повышении быстродействия, либо точности их работы. Предложены гибридные модели классификации на основе метода k-ближайших соседей и кластеризации на основе метода k-средних с использованием модели искусственной иммунной сети. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность предложенных гибридных моделей.*

*Ключевые слова:* классификация, кластеризация, искусственная иммунная сеть, обучающая выборка, иммунное обучения, аффинность, антитело, антиген.

М.М. КОРАБЛЬОВ, О.О. ФОМІЧОВ  
Харківський національний університет радіоелектроніки**ГІБРИДНІ МОДЕЛІ КЛАСИФІКАЦІЇ ДАНИХ НА ОСНОВІ  
МОДЕЛІ ШТУЧНОЇ ІМУННОЇ МЕРЕЖІ**

*Розглянуто розв'язання задач класифікації і кластеризації даних на основі гібридних моделей штучної імунної мережі, яка дозволяє змінювати як спосіб групування вихідних даних, так і структуру мережі імунних об'єктів. Використання адаптивної імунної моделі дозволяє групувати дані або на основі навчальної вибірки, або в процесі імунного навчання. Гібридизація імунних методів і моделей інтелектуальної обробки інформації дозволяє підвищити їх ефективність, що виражається в підвищенні швидкодії, або точності їх роботи. Запропоновано гібридні моделі класифікації на основі методу k-найближчих сусідів і кластеризації на основі методу k-середніх з використанням моделі штучної імунної мережі. Проведено експериментальні дослідження, що підтверджують ефективність запропонованих гібридних моделей.*

*Ключові слова:* класифікація, кластеризація, штучна імунна мережа, навчальна вибірка, імунне навчання, афінність, антитіло, антиген.

M.M. KORABLYOV, O.O. FOMICHOV  
Kharkiv National University of Radio Electronics**HYBRID MODELS OF CLASSIFICATION OF DATA ON THE BASIS  
OF THE MODEL OF THE ARTIFICIAL IMMUNE NETWORK**

*The constant increase in the requirements for classification models that have the ability to adapt to changing conditions and combine the features of different learning methods requires the development of models that allow changing the grouping of input data in the process of work. The use of artificial immune systems to solve the classification problem allows for the grouping of data in various ways, as well as changing not only the structure of the network of immune objects, but also the methods for solving the task. The solution of the problem of classification based on the immune approach is reduced either to the separation of data between previously known groups, or to the formation of new groups from the original data set. Classification of data based on the immune approach can be performed with controlled and uncontrolled learning, as well as by automatic classification. The classification process is divided into three main stages: the preparatory stage, the stage of immune learning, and the stage of refinement of the boundaries of the original classes. Hybridization of immune methods and models of intelligent information processing makes it possible to increase their effectiveness. This helps to increase the speed and accuracy of their work. The possibilities of developing hybrid classification models that function on the basis of various immune models and other approaches have been explored. To this end, hybrid models of data classification based on the model of an artificial immune network are proposed in the work, allowing to change both the method of grouping the initial data and the structure of the network of immune objects. To improve the efficiency of data classification and the formation of immune hybrids in this work, the model of the immune network aiNET. Using a model of an artificial immune network, a hybrid data classification model based on the k-nearest-neighbor method*

was proposed, as well as a hybrid data-clustering model based on the *k*-means method. The proposed models were investigated experimentally on different sets of data. Comparative experimental studies of the proposed hybrid models have been made to classify data with existing ones. They showed high efficiency of using for these purpose models of an artificial immune network.

*Keywords:* classification, clustering, artificial immune network, training sample, immune learning, affinity, antibody, antigen

### Постановка проблеми

В настоящее время существует большое количество методов классификации, реализованных на основе различных принципов обучения и разделения группируемых объектов. Основными подходами, используемыми для решения задачи классификации, являются [1, 2]: иерархический, вероятностно-статистический и оптимизационный подходы, а также подходы на основе использования теории графов и методов моделирования систем искусственного интеллекта, функционирующие на основе биологических принципов организации вычислений [3-6]. Такими системами являются искусственные нейронные сети (ИНС), генетические и эволюционные алгоритмы, искусственные иммунные системы (ИИС), системы моделирования коллективного разума и др. Их основным преимуществом является возможность самообучения и гибкость управления процессом группировки объектов.

При решении практических задач возникает необходимость разработки модели классификации, позволяющей изменять способ группировки исходных данных в процессе работы. При этом модель должна быть адаптивной и сочетать особенности различных способов обучения. Аппарат ИИС позволяет проводить группировку данных различными способами, а также изменять не только структуру сети иммунных объектов, но и методы решения поставленной задачи. Использование адаптивной иммунной модели позволяет группировать данные либо на основе обучающей выборки (ОВ), либо в процессе иммунного обучения (ИМО). При классификации данных в процессе ИМО классифицируемые объекты представляются популяцией антител, а объекты ОВ – популяцией антигенов. В процессе ИМО антитела клонируются, подвергаются мутации и отбору, вследствие чего достигают состояния специфичности с антигенами ОВ [7].

### Анализ последних исследований и публикаций

Классификация данных на основе иммунного подхода может быть выполнена с контролируемым и неконтролируемым обучением, а также путем автоматической классификации [8-10]. Особенностью классификации с контролируемым обучением является использование ОВ. Процесс классификации условно разбивается на три основных этапа: подготовительный этап PRP, этап иммунного обучения LRN и этап уточнения границ исходных классов CLS [8]. Подготовительный этап необходим для определения данных, которые могут быть классифицированы в процессе ИМО, и определения данных, которые классифицируются на завершающем этапе работы и не используются в процессе ИМО. Особенностью кластеризации на основе иммунного подхода является отсутствие ОВ, состоящей из исходных антигенов, что приводит к необходимости формирования популяции антигенов из набора антител. Процесс кластеризации на основе иммунного подхода также содержит три основных этапа [8]. При этом большое внимание уделяется подготовительному этапу, так как на данном этапе происходит формирование популяции антигенов для поиска центров формируемых кластеров. Задача автоматической классификации подразумевает не только распределение группируемых данных между множеством исходных классов, но и выделение кластеров для данных, которые не могут быть классифицированы. Автоматическая классификация разделяется на два этапа [10]: 1) классификация части исходных данных при использовании ОВ без проведения ИМО; 2) кластеризация оставшихся данных в процессе ИМО. Таким образом, решение задачи классификации на основе иммунного подхода сводится к решению задачи разделения данных между заранее известными группами, либо формированию новых групп из исходного множества данных.

Наиболее распространёнными моделями ИИС, используемыми для классификации данных, являются модели клонального отбора и искусственной иммунной сети [7]. Модель клонального отбора является одной из наиболее простых в реализации моделей, функционирующих на основе теории ИИС. Наиболее распространёнными алгоритмами, реализующими модель клонального отбора, являются алгоритмы CLONALG и VCA [7]. Основное различие между данными алгоритмами заключается в способе организации обработки антител в процессе ИМО, использовании оператора первичного отбора и особенностях клонирования антител. В [11] рассмотрено решение задач классификации и кластеризации объектов с использованием иммунной модели клонального отбора. Модель искусственной иммунной сети является одной из наиболее распространённых моделей, используемых при решении различных практических задач. Это обуславливается большими возможностями, выраженными в возможности взаимодействия классифицируемых антител не только с обучающими антигенами, но и между собой. Наиболее распространёнными алгоритмами, реализующими данную иммунную модель, являются алгоритмы aiNET и opt-aiNET [7]. Алгоритм opt-aiNET является модификацией алгоритма aiNET, предназначенной для решения специфических задач оптимизации. В [12] для решения задач классификации, кластеризации и автоматической классификации на основе модели иммунной сети базовым был выбран

алгоритм aiNET, который был модифицирован для повышения эффективности классификации.

Гибридизация иммунных методов и алгоритмов интеллектуальной обработки информации проводится с целью повышения их эффективности, выражающейся в повышении скорости, либо точности работы. Применительно к задаче классификации на основе иммунного подхода модификация иммунных моделей заключается в использовании различных не иммунных подходов к решению задачи группировки объектов. В [13-16] были предложены гибридные алгоритмы классификации, кластеризации и автоматической классификации данных, функционирующие на основе алгоритма CLONALG в сочетании с методами k-ближайших соседей (kNN), k-средних (k-means) и нечеткой логики. Однако возможности алгоритма CLONALG ограничены по сравнению с другими иммунными моделями, предполагающими не только межпопуляционные взаимодействия, но и взаимодействия внутри популяции антител или клонов. Поэтому для повышения эффективности классификации с целью формирования иммунных гибридов, в данной работе за основу был выбран модифицированный алгоритм aiNETm [12].

**Цель исследования**

**Целью работы** является разработка гибридных моделей классификации данных при использовании метода kNN и кластеризации данных при использовании метода k-means на основе модели иммунной сети.

**Изложение основного материала исследования**

**Классификация данных на основе гибридного иммунного метода kNN**

Метод KNN является одним из простейших и наиболее распространенных методов классификации. Поэтому для повышения точности классификации в [16] был предложен модифицированный алгоритм kNN с иммунным обучением на основе алгоритма CLONALG. Поскольку модель искусственной иммунной сети предоставляет больше возможностей для организации взаимодействия между иммунными объектами, принцип работы гибридного алгоритма, приведенного в [16], был использован для алгоритма aiNETm. Таким образом, полученный иммунный гибрид aiNETmkn является модификацией алгоритма aiNETm с иммунным обучением на основе модели искусственной иммунной сети. Работу гибридного алгоритма aiNETmkn можно условно разделить на следующие основные этапы:

- 1) определение стимулирующих антител, формирующих множество «ближайших соседей» и их областей стимуляции;
- 2) определение целевых антигенов для стимулирующих антител;
- 3) классификация стимулирующих антител в процессе ИМО;
- 4) классификация антител из областей стимуляции;
- 5) восстановление популяции исходных объектов и их группировка по результатам классификации последней популяции антител.

Для определения степени взаимодействия между иммунными объектами (антителами, клонами и антигенами) используется специальный критерий аффинности [7]:

$$aff_{ij} = \frac{1}{1 + d_{ij}}, \tag{1}$$

где  $d_{ij}$  – расстояние между  $i$ -м антителом и  $j$ -м антигеном.

На уровне ИО предлагаемый гибридный алгоритм aiNETmkn представляется следующим образом:

$$aiNETmkn(AB, AG, T, k) = \left[ \begin{array}{l} NatCalculation(AG, NAT) \rightarrow \\ \rightarrow Presentation(AB, AG) \rightarrow \\ \rightarrow Selection(AB, AG^T) \rightarrow \\ \rightarrow Selection(AB, AB^S, AB^C, AB') \rightarrow \\ \rightarrow SpacesSelection(AB', AB^S, k) \end{array} \right]^{PRP} \rightarrow$$

$$\rightarrow, \left[ \begin{array}{l} AB^S \\ \left\{ \begin{array}{l} Cloning(ab_i^S, CL_i, k) \rightarrow \\ \rightarrow Mutation(CL_i) \rightarrow \\ \rightarrow Presentation(CL_i, AG_i^T) \rightarrow \\ \rightarrow Suppression(ab_i^S, CL_i) \end{array} \right\} \\ \rightarrow ClassDetection(AB^S, AG^T) \end{array} \right]^{LRN} \rightarrow \tag{2}$$

$$\rightarrow \left[ \begin{array}{l} \text{kNNclassDetection}(AB', AB^S, k) \rightarrow \\ \rightarrow \text{Re construction}(AB, AB^C) \end{array} \right]^{CLS}$$

где  $\text{NatCalculation}(AB, NAT)$  – ИО определения значений пороговых аффинностей  $NAT$  для популяции группируемых объектов;  $\text{Presentation}(AG, ab_i)$  – ИО представления антигенов  $i$ -му антителу;  $\text{Selection}(AB, AG^T)$  – ИО отбора целевых антигенов  $AG_i^T$  для каждого классифицируемого антитела;  $\text{Selection}(AB, AB^S, AB^C, AB')$  – ИО определения классифицированных антител  $AB^C$ , стимулирующих антител  $AB^S$ , и антител, которые будут классифицированы после проведения иммунного обучения  $AB'$ ;  $\text{SpacesSelection}(AB', AB^S, k)$  – ИО определения  $k$  ближайших стимулирующих антител для каждого антитела из множества  $AB'$ ;  $\text{Suppression}(ab_i^S, CL_i)$  – ИО супрессии клонов и стимулирующего антитела;  $\text{ClassDetection}(AB^S, AG^T)$  – ИО завершения классификации стимулирующих антител;  $\text{kNNclassDetection}(AB', AB^S, k)$  – ИО классификации антител из областей стимуляции на основе метода ближайших соседей;  $\text{Re construction}(AB, AB^C)$  – ИО восстановления и классификации исходных объектов по результатам классификации популяции антител.

Таким образом, на первом этапе работы алгоритма  $aiNETmkn$  благодаря значениям пороговых аффинностей антигенов происходит определение стимулирующих антител, которые являются ближайшими соседями для объектов, характеризующихся низкими аффинностями к исходным классам. Следует отметить, что большинство стимулирующих антител классифицируются посредством ИМО, однако, для некоторых антител предусматривается возможность классификации без обучения в случае, если они характеризуются максимальными значениями аффинности к обучающим антигенам. В соответствии с этим в процессе ИМО участвуют только стимулирующие антитела, т.е. антитела, входящие в области стимуляции, не подвергаются действию операторов клонирования, мутации и редактирования популяции иммунных объектов. Классификация антител  $AB'$ , входящих в области стимуляции, происходит после завершения ИМО и классификации всех стимулирующих антител при использовании метода  $k$  ближайших соседей. В соответствии с этим, для каждого антитела, находящегося в области стимуляции на начальном этапе работы алгоритма  $aiNETmkn$  определяется  $k$  ближайших стимулирующих антител. После завершения ИМО антитела множества  $AB'$  классифицируются на основании значений начальных аффинностей со своими ближайшими стимулирующими антителами. При этом значения аффинностей используются в качестве весовых коэффициентов. Таким образом, решение о принадлежности антитела одному из исходных классов определяется путем определения максимальной суммы аффинностей принадлежащих ему стимулирующих антител, входящих во множество ближайших соседей.

Для оценки работы предложенного алгоритма  $aiNETmkn$  использовались наборы данных, представленные в табл. 1. Каждый набор характеризуется количеством объектов и размерностью матриц признаков. При этом, если размерность матрицы признаков характеризуется значением  $3 \times 3$ , то каждый классифицируемый объект и объект ОВ описывается девятью признаками.

Таблица 1 – Характеристики наборов данных

Наборы	Классифицируемые данные	Обучающая выборка	Количество классов	Матрица признаков
Набор 1	500	100	3	$3 \times 3$
Набор 2	500	100	3	$5 \times 5$
Набор 3	1000	200	5	$5 \times 5$
Набор 4	2000	400	5	$5 \times 5$
Набор 5	5000	400	5	$5 \times 5$
Набор 6	5000	400	5	$10 \times 10$
Набор 7	10 000	500	10	$5 \times 5$
Набор 8	15 000	500	10	$5 \times 5$
Набор 9	20 000	500	10	$5 \times 5$
Набор 10	20 000	500	10	$10 \times 10$

При определении эффективности предложенного алгоритма  $aiNETmkn$  было проведено сравнение



результатов его работы с результатами работы алгоритмов kNN, CLONALGm и aiNETm, полученными в [16]. Результаты сравнения перечисленных алгоритмов приведены в табл. 2, в которой используются следующие условные обозначения: «Т» характеризует быстродействие алгоритма классификации (Time – в % к самому медленному алгоритму); «А» используется для отображения точности группировки (Accuracy – в % к классифицируемым исходным данным); «S» характеризует устойчивость алгоритма (Stability – в % к исходным данным).

Таблица 2 – Результаты классификации данных

Методы		Группируемые наборы данных									
		Н 1	Н 2	Н 3	Н 4	Н 5	Н 6	Н 7	Н 8	Н 9	Н 10
kNN (k = 5)	T	11.7	12.1	12.5	12.6	12.5	14.2	14.8	14.7	14.7	16.0
	A	96.2	96.3	93.8	91.6	90.5	90.5	87.2	86.1	84.3	84.4
	S	99.8	99.7	98.6	98.7	97.5	97.4	95.3	95.4	95.4	95.3
CLONALGm	T	39.5	39.6	39.8	39.9	39.8	41.3	41.5	41.4	41.5	43.4
	A	98.2	98.3	98.2	98.2	98.1	98.1	97.9	97.8	97.8	97.7
	S	99.8	99.7	99.2	99.2	99.1	99.1	98.8	98.8	98.7	98.7
aiNETm	T	38.9	38.9	39.0	39.0	39.1	39.4	39.4	39.4	39.5	39.6
	A	98.7	98.7	98.6	98.5	98.5	98.4	98.3	98.3	98.2	98.0
	S	99.8	99.8	99.7	99.7	99.6	99.6	99.5	99.5	99.4	99.4
aiNETmkn (k = 5)	T	37.9	37.9	38.1	38.1	38.1	38.2	38.2	38.3	38.3	38.4
	A	98.7	98.7	98.6	98.5	98.5	98.4	98.3	98.3	98.2	98.1
	S	99.8	99.8	99.7	99.7	99.6	99.6	99.5	99.5	99.4	99.4

Из результатов экспериментов следует, что алгоритм aiNETmkn превосходит алгоритм aiNETm только по быстродействию, при этом, не уступая ему по точности и устойчивости классификации. Следует отметить, что при сравнении данного алгоритма с алгоритмом kNN, алгоритм aiNETmkn превосходит kNN по точности и устойчивости классификации, уступая ему по быстродействию на 20-25%. Таким образом, использование гибридного алгоритма aiNETmkn для решения задачи классификации с контролируемым обучением, более предпочтительно, чем использование других иммунных алгоритмов, таких как CLONALGm, aiNETm или RLAIsm.

#### Кластеризация данных на основе гибридного иммунного метода k-means

Алгоритм k-means является одним из простейших и наиболее распространённых методов кластеризации. Данный алгоритм часто используется как основа для формирования гибридных методов интеллектуальной обработки информации. Одним из наиболее эффективных методов кластеризации данных является гибридный метод FCM, функционирующий на основе алгоритма k-means, и использующий принципы теории нечетких множеств при выделении кластеров [8]. Поэтому для повышения точности кластеризации в [17] был предложен гибридный алгоритм k-means, функционирующий на основе иммунной модели клонального отбора, и использующий ИМО для выделения кластеров. В связи с тем, что модель искусственной иммунной сети предоставляет больше возможностей для организации обучения, принцип работы гибридного алгоритма, приведенного в [12], был использован для алгоритма aiNETm.

Полученный иммунный гибрид aiNETmkm является модификацией алгоритма k-means, использующего этап ИМО алгоритма aiNETm для повышения скорости формирования кластеров. Работа гибридного алгоритма aiNETmkm начинается с выделения стимулирующих антител как центров формируемых кластеров и определения областей стимуляции при использовании значения предельной аффинности NAT. Кластеризация с помощью данного алгоритма не подразумевает использование популяции антигенов, т.к. модель искусственно иммунной сети позволяет использовать взаимодействие между антителами в процессе ИМО. Таким образом, при использовании стимулирующих антител формируются пересекающиеся области стимуляции, содержащие группируемые объекты.

В процессе ИМО антитела, находящиеся в областях стимуляции, взаимодействуют со стимулирующими объектами как с антигенами. Стимулирующие антитела не подвергаются клонированию и мутации, и изменяются только после переопределения центроида для каждого выделяемого кластера. За счет использования пересекающихся областей стимуляции в процессе супрессии сети клонированным антителам и их клонам представляется несколько стимулирующих антител-центроидов. Обучение модели aiNETmkm завершается при достижении состояния специфичности между всеми антителами, находящимися в областях стимуляции и выделенными центрами кластеров, либо при достижении максимального количества популяций иммунных объектов, формируемых в процессе ИМО.

В соответствии с этим метод aiNETmst на уровне ИО представляется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \text{aiNETmkm}(AB, T, k) = & \left[ \begin{array}{l} \text{NatCalculation}(AB, NAT) \rightarrow \\ \rightarrow \text{Selection}(AB, k, AB^S, AB') \rightarrow \\ \rightarrow \text{SpacesSelection}(AB', AB^S) \end{array} \right]^{\text{PRP}} \rightarrow \\
 \rightarrow, & \left[ \begin{array}{l} AB' \left( \begin{array}{l} \text{Cloning}(ab'_i, CL_i, k) \rightarrow \\ \rightarrow \text{Mutation}(CL_i) \rightarrow \\ \rightarrow \text{Presentation}(CL_i, AB^S_i) \rightarrow \\ \rightarrow \text{Suppression}(ab'_i, CL_i) \end{array} \right) \\ \rightarrow \text{ClassDetection}(AB', AB^S) \end{array} \right]^T \rightarrow \\
 & \rightarrow \text{Reconstruction}(AB, AB^C),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $\text{NatCalculation}(AB, NAT)$  – ИО определения значений пороговых аффинностей  $NAT$  для популяции группируемых объектов;  $\text{Selection}(AB, k, AB^S, AB')$  – ИО определения  $k$  стимулирующих антител  $AB^S$ , являющихся начальными центрами кластеров;  $\text{SpacesSelection}(AB', AB^S)$  – ИО определения антител в областях стимуляции;  $\text{Cloning}(ab'_i, CL_i, k)$  – ИО клонирования антител в областях стимуляции;  $\text{Presentation}(CL_i, AB^S_i)$  – ИО представления клонов стимулирующим антителам;  $\text{Suppression}(ab'_i, CL_i)$  – ИО супрессии антител и клонов;  $\text{ClassDetection}(AB', AB^S)$  – ИО уточнения центроидов  $AB^S$  в областях стимуляции.

Для оценки работы алгоритма  $\text{aiNETmkm}$  использовались наборы данных, представленные в табл. 1, преобразованные для проведения кластеризации. При определении эффективности алгоритма  $\text{aiNETmkm}$  было проведено сравнение результатов его работы с результатами работы алгоритмов  $k$ -means,  $\text{CLONALGmc}$  и  $\text{aiNETmc}$ , полученными в [12]. Результаты сравнения перечисленных алгоритмов приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты кластеризации данных

Методы		Группируемые наборы данных									
		Н 1	Н 2	Н 3	Н 4	Н 5	Н 6	Н 7	Н 8	Н 9	Н 10
k-means	T	24.2	24.1	24.2	27.7	27.8	27.8	30.2	30.4	30.5	30.5
	A	99.8	99.7	99.7	99.6	99.5	99.4	99.5	99.4	99.4	99.3
	S	99.9	99.8	99.8	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.8
CLONALGmc	T	25.5	25.5	25.7	25.8	25.9	26.2	26.8	26.9	27.0	27.1
	A	94.8	94.8	94.6	94.7	94.6	94.1	94.0	94.0	94.1	94.0
	S	98.1	98.0	97.9	97.9	97.8	97.6	97.5	97.5	97.5	97.4
aiNETmc	T	25.3	25.3	25.5	25.7	25.7	26.0	26.5	26.5	26.9	26.9
	A	94.8	94.8	94.7	94.7	94.7	94.2	94.0	94.0	94.1	94.0
	S	98.0	98.0	98.0	97.7	97.9	97.7	97.6	97.6	97.6	97.5
aiNETmkm	T	20.0	20.0	20.1	22.4	22.4	22.7	22.9	23.0	23.2	23.2
	A	94.8	94.8	94.7	94.7	94.7	94.2	94.0	94.0	94.1	94.0
	S	98.0	98.0	98.0	97.7	97.9	97.7	97.6	97.6	97.6	97.5

Из результатов кластеризации следует, что модифицированный алгоритм  $\text{aiNETmkm}$  сопоставим с алгоритмом  $\text{aiNETmc}$  и превосходит его по быстродействию, совпадая при этом с ним по остальным характеристикам. При этом метод  $\text{aiNETmkm}$  превосходит алгоритм  $k$ -means по быстродействию, но уступает ему в точности и устойчивости кластеризации. Кроме того, при использовании метода  $\text{aiNETmkm}$  отсутствует необходимость в использовании априорного количества формируемых кластеров, так как их количество определяется иммунными методами. Полученный в результате модификации метод  $\text{aiNETmkm}$  превосходит другие иммунные методы, использованные в исследованиях.

### Выводы

Постоянное повышение требований к моделям классификации, обладающих способностью адаптироваться к изменяющимся условиям и сочетать особенности различных способов обучения, требует разработки моделей, позволяющих изменять группировку исходных данных в процессе работы. Использование ИИС для решения задачи классификации позволяет проводить группировку данных различными способами, а также изменять не только структуру сети иммунных объектов, но и методы решения поставленной задачи. Решение задачи классификации на основе иммунного подхода сводится либо к решению задачи разделения данных между заранее известными группами, либо формированию новых групп из исходного множества данных. При этом процесс классификации условно разбивается на три основных этапа: подготовительный этап PRP, этап иммунного обучения LRN и этап уточнения границ исходных классов CLS

Гибридизация иммунных методов и моделей интеллектуальной обработки информации позволяет повысить их эффективность, что выражается в повышении быстродействия, либо точности их работы. Исследованы возможности разработки гибридных методов классификации, функционирующих на основе различных иммунных моделей и других подходов. С этой целью в работе предложены гибридные модели классификации данных на основе модели искусственной иммунной сети, позволяющей изменять как способ группировки исходных данных, так и структуру сети иммунных объектов. С использованием модели искусственной иммунной сети предложена гибридная модель классификации данных на основе метода *k*-ближайших соседей, а также гибридная модель кластеризации данных на основе метода *k*-средних.

Характеристики предложенных моделей были исследованы экспериментальным путем на различных наборах данных. Проведены сравнительные экспериментальные исследования предложенных гибридных моделей классификации данных с существующими, которые показали высокую эффективность использования для этих целей модели искусственной иммунной сети.

### Список использованной литературы

1. Duda R.O. Pattern classification / R.O. Duda, P.E. Hart, D.G. Stork. – Wiley & Sons, 2010. – 738 p.
2. Ершов К.С. Анализ и классификация алгоритмов кластеризации / К.С. Ершов, Т.Н. Романова // Новые информационные технологии в информационных системах, 2016. – № 1. – С.274-279.
3. Потапов А.С. Искусственный интеллект и универсальное мышление / А.С. Потапов. – СПб.: Политехника, 2012. – 711 с.
4. Samarasinghe S. Neural networks for applied sciences and engineering: from fundamentals to complex pattern recognition / S. Samarasinghe – Auerbach publications, 2016. – 317 p.
5. Самаркин М.Е. Классификация данных телекоммуникационной компании с помощью технологии data-mining / М.Е. Самаркин, В.Н. Тарасов // Инфокоммуникационные технологии. – ПГУТИ, Самара, 2017. – Том 14. – № 3. – С. 258-263.
6. Жетимекова Г.Ж. Нечеткая классификация с использованием нечеткого анализа кластеризации / Г.Ж. Жетимекова // Вестник КГУСТА. – 2014. – № 4. – С. 117-120.
7. Dasgupta D. Immunological computation, Theory and applications / D. Dasgupta, L.F. Nino – Taylor & Francis Group, 2009. – 278 p.
8. Кораблев Н.М. Классификация объектов на основе искусственных иммунных систем / Н.М. Кораблев, А.А. Фомичёв // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип. 6 (87). – С. 13–17.
9. Кораблев Н.М. Кластеризация данных на основе искусственных иммунных систем / Н.М. Кораблев, А.А. Фомичев // Системи обробки інформації. – 2009. – Вип. 4 (78). – С. 77–82.
10. Кораблев Н.М. Автоматическая классификация данных на основе иммунного подхода / Н.М. Кораблев, А.А. Фомичев // Бионика интеллекта: науч.-техн. журнал. – 2014. – № 2 (83). – С. 83-90.
11. Кораблев Н.М. Использование иммунной модели клонального отбора для кластеризации объектов / Н.М. Кораблев, А.А. Фомичев, Д.Н. Соловьев // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту. Матеріали міжнар. наук. конференції. – Херсон: Вид-во ФОП Вишемирський В.С., 2018. – С. 234-236.
12. Кораблев Н.М. Классификация данных с использованием модели искусственной иммунной сети / Н.М. Кораблев, А.А. Фомичев // Інформаційні технології: сучасний стан та перспективи: монографія / Альошин Г.В., Безсонов О.О., Білецький А.Я. [та ін.]; за заг. ред. В.С. Пономаренка. – Х.: ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2018. – С. 86-101.
13. Кораблев Н.М. Нечеткая кластеризация данных на основе искусственных иммунных систем / Н.М. Кораблев, А.А. Фомичёв // Вестник ХНТУ. – 2010. – № 2 (38). – С. 323–328.
14. Кораблев, Н.М. Кластеризация данных методом *k*-means с использованием иммунных операторов / Н.М. Кораблев, А.А. Фомичев // Бионика интеллекта. – 2011. – № 3 (77). – С. 102–106.

15. Кораблев Н.М. Нечеткая классификация объектов на основе искусственных иммунных систем / Н.М. Кораблев, А.А. Фомичев, М.В. Кушнарев // Комп'ютерні системи та компоненти. – 2010. – Том 1. – Вип.2. – С. 88–94.
16. Кораблев Н.М. Классификация объектов с помощью иммунного метода ближайших соседей / Н.М. Кораблев, А.А. Фомичев // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2011. – Вип. 2 (18). – С. 114–118.
17. Korablyov M. The immune method for classifying objects on the basis of the target clonal selection (Immunologiczne metody klasyfikacji obiektów bazujące na selekcji klonalnej) / M. Korablyov, O. Fomichov, M. Kushnaryov, W. Wójcik // Elektronika (LIV). – 2013. – № 8. – P. 36-39.

УДК 515.18 + 621.372.542

В.М. КОРЧИНСКИЙ, Д.Н. СВИНАРЕНКО  
Днепровский национальный университет имени Олеса Гончара**ПРОСТРАНСТВЕННО-ИНВАРИАНТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ  
МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ВИДОВЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ**

*Предложен метод представления распределений яркости цифровых изображений дистанционного зондирования, зафиксированных в различных спектральных интервалах излучения – носителя видовой информации. Метод обеспечивает инвариантность принятия решений относительно распознавания пространственных форм таких изображений, независимо от его искажений, обусловленных нестабильностями позиционных параметров формообразования изображений, характеристик трассы передачи данных, их пространственного и спектрального разрешения.*

*Ключевые слова: цифровое изображение, радиометрическое преобразование, преобразование Хартли, интегральный информационный признак, информационная энтропия.*

В.М. КОРЧИНСЬКИЙ, Д.М. СВИНАРЕНКО  
Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара**ПРОСТОРОВО-ИНВАРИАНТНЕ ПОДАННЯ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ВИДОВИХ ДАНИХ  
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ**

*Запропоновано метод інформаційного подання розподілів яскравості багатоспектральних цифрових зображень дистанційного зондування, зафіксованих у доволій кількості спектральних інтервалів проміння – носія видової інформації. Метод забезпечує інваріантність прийняття рішень щодо розпізнавання просторових форм таких зображень незалежно від їхніх спотворень, спричинених нестабільністю позиційних умов формоутворення, характеристик траси передачі даних, їхнього просторового та спектрального розрізнення.*

*Ключові слова: цифрове зображення, радіометричне перетворення, перетворення Хартлі, інтегральна інформаційна ознака, інформаційна ентропія.*

V.M. KORCHYNSKYI, D.M. SVYNARENKO  
Oles Honchar Dnipro National University**SPATIALLY-INVARIANT REPRESENTATION OF THE MULTISPECTRAL SPECIFIC DATA  
OF REMOTE SENSING**

*The paper is devoted to formulation of a new method of informational representation of the brightness of digital images of the remote sensing fixed in various spectral intervals of radiation – the carrier of the specific information. The method ensures invariance for solutions concerning the recognition of geometrical forms of such images rather from the distortions caused by the instabilities of positional parameters of fixing the images, their space and radiometric resolving power. In this aspect definition of cumulants for brightness distributions of multispectral images at their Hartley transformations are generalized. Invariant informational features are defined on set of the dimensionless cumulants received on the basis of Hartley integral transformation in a dimensionless form for security of invariancy concerning the geometrical distortions of images.*

*Directly invariant informational features are presented in the form of the quadrics of a various order depending on dimensionless cumulants in corresponding metric space. It is shown that space distortions of multispectral images of remote sensing fixed from space carriers with sufficient accuracy are described by affinities on a plane of images and consequently can be effectively presented by the set of the offered informational indications.*

*The potency of set of invariant features, sufficient for authentic informational representation of multispectral images of sensing by criterion of maximization of their joint entropy is defined.*

*It is shown that association of informational entropy of the offered informational indications on their order is approximated by normal distribution.*

*Estimations of the informational importance of the images restored on final set of cumulants are reduced. Efficiency of the offered method for recognition is justified for a recognition of 2D and 3D objects extracted from binary/graylevel/color images.*

*The results of work can be used at the thematic analysis of multispectral images of remote sensing and pattern recognition.*

*Keywords: digital image, remote sensing, affine space transformation, radiometric resolution, Hartley transform, integral informational features, informational entropy.*

### Постановка проблемы

Одной из основных задач тематического анализа видовых (сопровождающихся изображениями) данных дистанционного зондирования является распознавание геометрических форм визуализированных объектов. Современные аппаратные средства дистанционного зондирования (в частности, Земли с аэрокосмических аппаратов) обеспечивают фиксацию таких данных непосредственно в цифровом формате в значительном количестве спектральных интервалов электромагнитного излучения – носителя видовой информации. Множество изображений различных спектральных каналов образует единый геометрический объект – многоспектральное изображение (МСИ). Аппаратная фиксация МСИ сопровождается помехами вследствие временной нестабильности позиционных условий съемки и состояния трассы распространения информационного сигнала.

Проблема автоматизированного анализа ДЗЗ имеет два аспекта: 1) обеспечение инвариантности принятия решений относительно достоверного распознавания геометрических форм объектов; 2) представление распределений яркости анализируемых изображений набором информационных признаков, достаточным для однозначной идентификации объекта распознавания. Отметим, что второй аспект данной проблемы связан с компрессией первичных (непосредственно полученных) данных ДЗЗ – уменьшением их объема при сохранении информационной значимости, существенной для последующего тематического анализа.

В настоящее время основным способом решения указанных проблем является представление распределений яркости множеством их интегральных информационных признаков (ИИП), достаточным как для достоверной интерпретации изображения, так и для восстановления распределений их яркости по конечному набору ИИП.

Поэтому актуальна проблема построения систем ИИП, инвариантных относительно искажений, сопровождающих формирование многоспектральных видовых данных ДЗЗ независимо от физической природы их образования.

### Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время наибольшее распространение имеют системы ИИП растровых изображений в виде коэффициентов разложения функции распределения яркости  $f(\mathbf{r})$  ( $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки поля изображения) в виде отрезка обобщенного ряда Фурье по какой-либо функционально полной системе базисных функций (как правило, полиномиальных): 
$$f(\mathbf{r}) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n \cdot u(\mathbf{r}) \quad [1, 2].$$
 Непосредственно

множество ИИП образует совокупность коэффициентов разложения  $\{c_n : n = \overline{0, N-1}\}$ , которые не инвариантны относительно произвольных преобразований распределений яркости  $f(\mathbf{r})$ , хотя известно определенное количество ИИП в виде комбинаций коэффициентов  $\{c_n : n = \overline{0, N-1}\}$ , инвариантных к некоторым точечным геометрическим преобразованиям изображений и их комбинаций (параллельные переносы, повороты, гомотетия) при сохранении уровня яркости  $f(\mathbf{r})$  [3] и неточечных геометрических преобразованиях изображений [1]. Однако, отсутствует общая методика получения инвариантных ИИП даже для такого ограниченного круга искажений изображений.

Возможности информационного представления распределений яркости конечными наборами ИИП ограничены еще и тем, что известные ИИП определены лишь для изображений какого-либо фиксированного спектрального канала, а не всей их совокупности как единого геометрического объекта – МСИ.

### Цель исследования

Цель данной статьи заключается в разработке альтернативного метода пространственно-инвариантного представления конечным множеством ИИП распределений яркости цифровых изображений дистанционного зондирования, зафиксированных в произвольном количестве спектральных каналов. Метод обеспечивает инвариантность принятия решений относительно распознавания пространственных форм таких изображений с контролируемым уровнем достоверности независимо от их искажений, обусловленных нестабильностями позиционных параметров формообразования изображений, характеристик трассы передачи данных, их пространственного и спектрального разрешения.

### Изложение основного материала исследования

Далее предполагается, что анализируемый цифровой МСИ задан на растровой сетке размерностью  $n \times m$  пикселей и включает  $k$  спектральных каналов. В соответствии с методикой, предложенной в [4], представим МСИ двумерным массивом данных  $\mathbf{D}$  в виде матрицы  $\mathbf{M}_{nm \times k}$  с ортогонализированными

столбцами, каждый из которых представляет изображение отдельного спектрального канала, строки – значениям уровней яркости пикселей соответствующего спектрального канала, упорядоченных по столбцам либо строкам растра. Принципиально важным моментом является обеспечение ортогональности столбцов матрицы  $\mathbf{M}_{nm \times k}$ , что обеспечивает декорреляцию распределений изображений разных спектральных каналов и тем самым – возможность их независимой обработки [4]. В данной работе ортогонализация осуществлялась на основе QR-разложения массива  $\mathbf{D}$ , поскольку этот метод обеспечивает, как показали многочисленные вычислительные эксперименты применительно к многоспектральным изображениям, наименьшие значения попарных скалярных произведений столбцов матрицы  $\mathbf{M}_{nm \times k}$  в евклидовом пространстве в сравнении с другими вычислительными алгоритмами ортогонализации [5].

Как известно, при малости длины волны излучения – носителя видовой информации в сравнении с расстоянием, с которого осуществляется съемка, и характерными размерами датчика изображений пространственные распределения их яркости представляют собой свертку передаточной характеристики трассы распространения излучения с собственной яркостью объекта фиксации [6, 7].

В качестве основы формирования пространственно-инвариантных ИИП (в отличие от работы [4], где для этой цели использовалось интегральное преобразование Фурье) примем двумерное интегральное преобразование Хартли, определяемое соотношениями [8]:

$$\begin{aligned} H(\mathbf{u}) &= \int_{(S)} f(\mathbf{x}) \operatorname{cas}(2\pi \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{x}) d\mathbf{x}, \\ f(\mathbf{x}) &= \int_{-\infty}^{\infty} H(\mathbf{u}) \operatorname{cas}(2\pi \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{x}) d\mathbf{u}, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\operatorname{cas}(\cdot) = \cos(\cdot) + \sin(\cdot)$ ,  $f(\mathbf{x})$  – функция распределения яркости цифрового изображения; интегрирование в первом соотношении (1) выполняется по полю изображения.

Выбор преобразования Хартли для построения ИИП обусловлен его свойством фильтрации аддитивных гауссовых помех информационного сигнала (в контексте данной работы – распределениями яркости цифровых изображений МСИ) на трассе распространения излучения – носителя видовой информации [8]. Как показано в работе [7], такой характер имеют помехи, возникающие вследствие флуктуаций физических характеристик атмосферы.

Исходя из общего определения семиинвариантов независимо от интегрального преобразования первичного распределения  $f(\mathbf{x})$  (см., напр. [7]), получим

$$Q_P \equiv Q_{pq} = \frac{\partial^{p+q}}{\partial u_1^p \partial u_2^q} \ln H(\mathbf{u}) \Big|_{\mathbf{u}=0}, \tag{2}$$

де  $H(\mathbf{u})$  – интегральное преобразование Хартли;  $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$ ;  $p$  и  $q$  – целые положительные числа, начиная с нуля;  $P = p + q$  – порядок семиинварианта.

Отметим, что преимущество преобразования Хартли с позиций формирования ИИП в сравнении с преобразованием Фурье, использованном в работах [4, 9], состоит в вещественности его значений.

Обобщая результаты работы [5], инвариантные информационные признаки определим на множестве безразмерных семиинвариантов:

$$z_i = Q_{i-1, N+1-i} \exp\left(-\frac{N \cdot Q_{0,0}}{2}\right), \quad i = \overline{1, N+1}, \tag{3}$$

где  $N = p + q$ .

Нетрудно видеть, что величины  $z_i$ ,  $i = \overline{1, N+1}$  не зависят от изменений яркости всех спектральных каналов МСИ, представляемых элементами матрицы  $\mathbf{M}_{nm \times k}$ .

Пространственные и радиометрические искажения распределений яркости изображений с достаточной точностью аппроксимируются аффинными преобразованиями в трехмерном декартовом пространстве  $\mathbf{E}^3$  ("координатная плоскость изображения – уровень яркости") [7] и поэтому могут быть

представлены в виде  $\bar{e}_i = \sum_{k=1}^3 a_{i,k} \cdot e_k$ , где тильдой отмечены преобразованные компоненты векторов

$e \in E^3$ ,  $a_{i,k}$  – элементы матрицы аффинного преобразования, причем  $a_{i,k} > 0$ .

Поскольку двумерный массив данных  $\mathbf{D}$ , определенный выше, является проекцией пространства  $E^3$ , для анализа данных, представленных в нем, можно использовать результаты работы [4] в части аналитического представления ИИП, инвариантных по отношению к геометрическим, яркостным и радиометрическим преобразованиям МСИ при обобщении на преобразование Хартли в форме:

$$I_N = z_{N-1}^2 - 2 \sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k \frac{N!!}{(N-k-1)!(N+k+1)!} \cdot z_{N-k} \cdot z_{N+k+2}, \tag{6}$$

где нижний индекс  $N$  обозначает порядок информационного признака.

Определение количества информационных признаков вида (6), необходимых для достоверной идентификации распределений яркости МСИ, инвариантной относительно пространственных и яркостных искажений, обусловленных указанными выше факторами, производилось по критерию максимизации информационной энтропии изображений всех спектральных каналов (использовалось многомерное определение информационной энтропии, приведенное в [5]).

Ниже приведен пример использования предложенного метода пространственно-инвариантного представления многоспектральных изображений дистанционного зондирования.

На рис. 1–4 представлены первичные 2D изображения фиксированной сцены, сформированные одновременно в четырех спектральных каналах излучения – носителя видовой информации. Пространственное и спектральное разрешения изображений существенно различны (убывают с увеличением длины волны излучения).

На рисунке 5 приведена зависимость информационной энтропии ИПП (в битах) от их порядка при варьировании параметров аффинных искажений МСИ в широких пределах.

Нетрудно видеть, что максимизация информационной энтропии достигается при количестве ИИП около 80, причем характер приведенной зависимости практически совпадает с гауссовским статистическим распределением. Приведенный результат получен для МСИ, представленных на рис. 1-4. С большой точностью он подтвердился результатами многочисленных вычислительных экспериментов с изображениями, зафиксированными в спектральных интервалах от 0.52 мкм до 2.43 мкм (сканер ASTER) и с той же разрядностью растра .



Рис. 1. Изображение спектрального канала 0,52 мкм – 0,60 мкм (пространственное разрешение 15 м).



Рис. 2. Изображение спектрального канала 1,60 мкм – 1,70 мкм (пространственное разрешение 30 м).





Рис. 3 Изображение спектрального канала  
2,185 мкм – 2,225 мкм  
(пространственное разрешение 30 м)



Рис. 4 Изображение спектрального канала  
2,360 мкм – 2,430 мкм  
(пространственное разрешение 30 м)

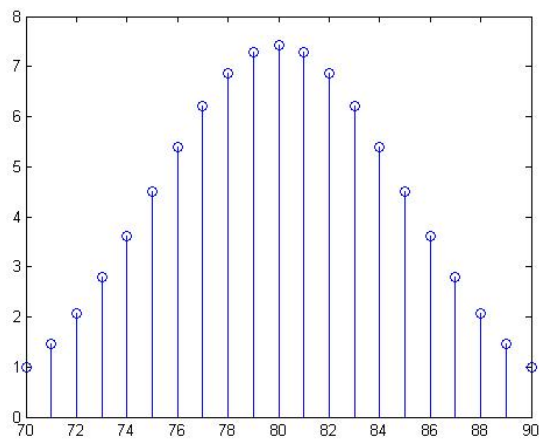


Рис. 5 Зависимость информационной энтропии ИИП от его порядка.

Дискретизированные распределения яркости любого спектрального канала МСИ, восстановленные по конечному множеству предложенных ИИП, исходя из выражений (1), (2), описываются соотношениями:

$$f_k(x) = \sum_{n=0}^{N-1} H(n) \cdot \exp\left[\sum_{i=1}^k \frac{Q_P^i}{i!}\right] \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot x \cdot n}{N}\right), \quad (7)$$

где  $K$  – количество спектральных каналов;  $P$  – порядок ИИП;  $k$  – номер спектрального канала;  $N = n \cdot m$ .

#### Выводы

В работе предложен новый эффективный метод пространственно-инвариантного представления многоспектральных изображений дистанционного зондирования, представленных в растровом формате. Метод обеспечивает инвариантность принятия решений относительно распознавания пространственных форм таких изображений, независимо от его искажений, обусловленных нестабильностями позиционных параметров формообразования изображений, характеристик трассы передачи данных, их пространственного и спектрального разрешения в сочетании с компрессией первичных (непосредственно полученных) видовых данных.

В отличие от существующих методов информационного представления изображений на основе их интегральных информационных признаков, предложенный метод позволяет анализировать все множество изображений, полученных в произвольном количестве спектральных каналов излучения – носителя видовой информации.

Перспективы дальнейших исследований, связанных с проблематикой данной работы, связаны с оценкой информационных потерь при восстановлении различных спектральных каналов по конечному набору интегральных информационных признаков.

#### Список использованной литературы

1. Flusser J. 2D and 3D image analysis by moments / J. Flusser, T. Suk, B. Zitova. – N.-Y., London: J.Wiley, 2017. – 530 p.
2. Moments and Moment Invariants – Theory and Applications / Ed. by A. Papakostas. – Chichester, U.K.: Wiley, 2014. – 288 p.
3. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой / Ф. Куафе: Пер. с франц. – М.: Мир, 1985. – 286 с.
4. Корчинский В.М. Многомерное векторное представление распределений яркости многоспектральных растровых изображений дистанционного зондирования Земли / В.М.Корчинский // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон, 2014. – № 3 (50). – С. 90-93.
5. Press W.H. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing / W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P Flannery. – Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore: Cambridge University Press., 2007. –1962 p.
6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Многократное рассеяние / турбулентность / шероховатые поверхности и дистанционное зондирование / А. Исимару: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 318 с.
7. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
8. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли. Теория и приложения / Р. Брейсуэлл: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 176 с.
9. Корчинский В.М. Информационная технология повышения эффективности тематического анализа многоспектральных космических снимков / В.М. Корчинский, Д.В. Маслей, А.С. Бушанская, А.Е. Геленко, А.А. Галищук // Космическая техника. Ракетное вооружение. – Днепропетровск: EOS Data Analytics, 2015. – №1. – С. 17-21.

УДК 0048:681.3

А.Г. КРИВОХАТА, О.В. КУДІН, А.О. ЛІСНЯК  
Запорізький національний університет

## ОГЛЯД МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ АКУСТИЧНИХ ДАНИХ

Останнім часом все більшого поширення набувають автоматичні системи розпізнавання звуку, зображень, відео. Такі системи знаходять різноманітні застосування на виробництві, інформаційній безпеці тощо. Серед методів, що застосовуються у таких задачах, слід виділити методи машинного навчання, як найбільш популярні та перспективні. У статті запропоновано огляд алгоритмів машинного навчання класифікації акустичних даних різного походження (природні звуки, мова, музика). Акцент робиться на глибокому машинному навчанні.

Ключові слова: акустичні дані, класифікація, машинний слух, машинне навчання.

А.Г. КРИВОХАТА, А.В. КУДИН, А.А. ЛИСНЯК  
Запорожский национальный университет

## ОБЗОР МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В последнее время все большее распространение получают автоматические системы распознавания звука, изображений, видео. Такие системы находят различные применения в производстве, информационной безопасности и т.д. Среди методов, которые применяются в таких задачах, следует выделить методы машинного обучения, как наиболее популярные и перспективные. В статье предложен обзор алгоритмов машинного обучения классификации акустических данных разного происхождения (природные звуки, речь, музыка). Акцент делается на глубоком машинном обучении.

Ключевые слова: акустические данные, классификация, машинный слух, машинное обучение.

A.G. KRYVOKHATA, O.V. KUDIN, A.O. LISNYAK  
Zaporizhzhya National University

## A SURVEY OF MACHINE LEARNING METHODS FOR ACOUSTIC DATA CLASSIFICATION

The task of developing machines with sensing capabilities, such as vision and hearing is one of the challenging problems in engineering and computer science. Machine hearing is the field where different problems such as audio tagging have been formulated. Tag is a short name for a label applied to some audio by an automatic tagging algorithm. There are many applications for automated audio tagging systems, for example, music recommendation systems, estimating song similarity, etc. Many researchers exploit machine learning algorithms for developing such systems. However, there is no "one-fits-all" approach to solving the problem. Thus, an overview of state-of-the-art approaches and methods is relevant.

Basically, automated audio tagging systems can be decomposed into four parts: audio representation, features extraction, machine learning algorithm and accuracy estimation.

Audio representation stage means that raw signal is segmented into shorter signal chunks by some windowing process. In traditional methods, a common approach is to convert the original acoustic signal to frames of a certain length.

Receiving a compact representation of the acoustic characteristics of a signal is the aim of feature extraction stage. Zero-crossing rate, Spectrum shape, Short-Time Fourier Transform, Mel-frequency cepstral coefficients are widely used for feature extraction.

Machine learning methods like K-means, SVM, KNN, decision trees etc. are traditionally used in audio classification. In the last two decades, the deep learning based methods have also gained popularity for audio tagging, for example, convolutional neural networks or recurrent neural networks. Deep neural networks can operate on both raw acoustical signal and features extracted from the signal.

Accuracy estimation stage deploys quality assessment methods, for example, expert evaluation.

The purpose of this work is the analytical review of recent publications on the classification of acoustic data by means of machine learning with an emphasis on the application of deep machine learning methods.

We propose a possible direction for further development of machine hearing systems based on the analysis of publications and respective methods. This approach can use different types of ensemble learning methods with classifiers based on feature extraction and deep neural networks.

Keywords: acoustic data, classification, machine hearing, machine learning.

### Постановка проблеми

Сучасний розвиток засобів телекомунікації та поширеність інструментів для редагування вмісту інтернет сайтів призводить до того, що в глобальній мережі Інтернет поряд з текстовою інформацією великого поширення набувають мультимедійні дані різного вмісту, зокрема, акустичні дані. Прикладом акустичних даних можуть бути музичні записи, записи лекцій, доповідей, записи звуків різного походження тощо. Для можливості пошуку серед таких даних, зазвичай, використовуються метадані, які описують в текстовому вигляді вміст відповідного аудіо файлу. Формування таких метаданих виконується вручну, що не завжди зручно при обробці великих об'ємів даних. Тому, актуальною задачею є розробка автоматизованих систем класифікації акустичних даних.

Прикладом автоматизованих систем обробки мультимедійних даних можуть бути рекомендаційні системи, які пропонують користувачам певний контент в залежності від даних, вказаних в профілі користувача та історії попередніх запитів. Також, актуальним напрямом в останні роки є машинний слух [14]. Однією з задач цього напрямку є розробка ефективних методів класифікації звуків різного походження, наприклад, мови, музики, природних звуків тощо. При цьому, найбільш досліджуваними є саме задачі аналізу музики та мови [1]. Іншою задачею, яка досить часто розглядається авторами, є виявлення звукових подій. Ця задача спрямована на обробку неперервного акустичного сигналу та перетворення його в символічні описи відповідних звукових подій, присутніх на слухової сцені [13].

В загальному вигляді, процес аналізу цифрових акустичних даних зазвичай складається з декількох етапів. На початковому етапі виконується попередня обробка неперервного акустичного сигналу з метою представлення його у дискретному цифровому вигляді. При цьому, зазвичай, використовується ряд стандартних підходів [5, 16]. Далі виділяються ознаки акустичного сигналу, суттєві для розв'язання поставленої задачі аналізу. Серед найбільш широко вживаних ознак використовуються коефіцієнти перетворення Фур'є та автокореляції, мел-кепстральні коефіцієнти, хромограми. Після цього отримані ознаки використовуються як вхідні параметри математичної моделі (наприклад, алгоритму класифікації, кластеризації або нейронної мережі). На заключному етапі виконується верифікація отриманих результатів та впровадження розробленої системи акустичного аналізу.

На даний момент тематиці розробки систем машинного слуху присвячена велика кількість публікацій і продовжують з'являтися нові. Для того, щоб мати змогу виділити загальні тенденції серед безлічі робіт, необхідними є оглядові публікації, які містять аналіз спільних рис та відмінностей у підходах, які використовують різні автори.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Серед великої кількості оглядових робіт можна виділити декілька, які є найбільш загальними. Так, в оглядових статтях [1, 3, 19] наводиться опис компонент системи автоматичної класифікації звуків, яка містить модуль попередньої обробки, екстракції ознак, алгоритм навчання та модуль обчислень.

В [1] детально розглянуто підходи до виділення ознак сигналу. Наводяться критерії, за якими можна класифікувати мову, музику та природні звуки. Виділяються методи, засновані на фізичних властивостях сигналів та особливостях людського сприйняття звуків. Частіше за все використовуються методи виділення ознак, які представляють акустичний сигнал у таких областях: часовій, частотній, кепстральній та вейвлет.

Огляди [3, 19] містять аналіз загальних підходів та публікацій з автоматичної класифікації музичних записів за жанрами. Пропонується множина найбільш інформативних міток, які можуть використовуватись як класи при навчанні класифікаторів. Розглядаються найбільш вживані джерела розмічених акустичних даних, які можуть використовуватись у системах навчання з вчителем. Зазвичай, це відкриті музичні бази в мережі Інтернет, розмічені користувачами записи, наприклад, у соціальних мережах та дані, які згенеровано спеціально для розв'язання задач машинного слуху. В роботі [19] окремо розглядається питання оцінки ефективності систем класифікації музичних файлів за жанрами.

Попри наявність доволі докладних оглядів з даної тематики, більшість з них акцентуються на класичному підході до аналізу даних засобами машинного навчання, який складається з етапів: виділення ознак, навчання системи, верифікація та впровадження системи. Недостатня увага приділяється методам глибинного машинного навчання, які включають нейронні мережі з великим числом прихованих шарів.

### Мета дослідження

Метою даної роботи є аналітичний огляд останніх публікацій з класифікації акустичних даних засобами машинного навчання з акцентом на застосування методів глибинного машинного навчання.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Для класифікації даних, які описані своїми ознаками, можуть використовуватись як статистичні методи (класифікатор Баєса [7], дискримінантний аналіз [4, 10], EM алгоритм тощо), так і методи, які ґрунтуються на мірах схожості та відмінності (метод k-середніх [5, 11, 17], метод опорних векторів [5, 10, 15], метод k найближчих сусідів [5, 6] тощо).

У роботі [7] розв'язується задача класифікації довільних аудіо даних. Пропонується автоматична система, яка розподіляє вхідні аудіо дані на сім класів, зокрема, різні типи музики, мова одного чи декількох

чоловік, звуки зовнішнього середовища. Виконано порівняння декількох ознак класифікації, показано, що найліпший результат досягається при використанні мел-частотних кепстральних коефіцієнтів та коефіцієнтів кодування з лінійним предиктором [16]. Процес аналізу аудіо даних складається з таких етапів: вилучення ознак, ідентифікація пауз, сегментація на фрагменти та класифікація фрагментів. Для класифікації використовується класифікатор Баєса.

Автоматичний аналіз акустичних даних знаходить застосування також і в комп'ютерній лінгвістиці. В статті [10] автори провадять лінгвістичне дослідження впливу наголосу на певні частини речення в англійській мові на сприйняття змісту. Описана в роботі методологія дослідження передбачає використання акустичного класифікатора (метод опорних векторів та лінійний дискримінантний аналіз). Для визначення ознак, що мають найбільший вплив на результат класифікації використовується метод Боруа.

У роботі [11] вводиться поняття матриці часової залежності, яка містить дані про кількість повторень певних типів інтервалів у звукових даних. Кластеризація аудіо даних на основі отриманої матриці часової залежності виконується за допомогою метода  $k$ -середніх. Проілюстровано використання розроблених алгоритмів для кластеризації аудіо та відео документів.

В останні роки все більше робіт присвячено використанню нейронних мереж, як при вилученні ознак з даних, так і безпосередньо при класифікації.

Лінійна та нелінійна модель нейронів для виділення ознак з аудіо даних наводиться в роботі [2]. При цьому моделюється спектрально-часове поле сприйняття нейрону, а для навчання використовують дані, отримані безпосередньо з нейронів слухового апарату птахів виду зяблик-зебра. Досліджено вплив нелінійної функції активації нейронів на результат класифікації за шістьма класами. Як класифікатор використовувалися три методи: класифікатор Баєса, метод опорних векторів та метод гауссових сумішей. Показано, що використання нелінійної моделі нейронів дозволяє підвищити якість класифікації на 15%.

Метод деформаційного дискримінантного аналізу звукових даних розглядається в [4]. Застосування цього методу до попередньо обробленого звукового сигналу дозволяє отримати стійкий до шуму вектор ознак. Кожен шар деформаційного дискримінантного аналізу, в свою чергу, використовує метод головних компонент та згорткові нейронні мережі [22] для генерування вектору ознак з вхідного звукового файлу та класифікації. Як приклад описано архітектуру системи, що дозволяє знаходити звукові відрізки у потоковому аудіо.

У статті [6] запропоновано підхід до автоматичної класифікації музичних записів за жанрами. Особливістю підходу є те, що вихідні музичні файли розбиваються на три частини, для яких обчислюються власні 15-мірні вектори ознак. Після цього кожен з векторів передається на вхід класифікатора. Результат отримується шляхом голосування. На етапі визначення ознак використовується швидке перетворення Фур'є та обчислюються такі ознаки, як спектральний центроїд та інші. Використовуються два типи класифікаторів: метод  $k$  найближчих сусідів та багатошарова нейронна мережа з одним прихованим шаром.

Згорткові нейронні мережі для отримання стійких ознак з аудіо даних використовуються в роботах [12, 13]. Особливістю використання цього типу нейронних мереж є те, що на вхід можна подавати як вектори ознак, так і «сирі», тобто, попередньо не оброблені акустичні дані у цифровому форматі. В [12] додатково застосовано рекурентні нейронні мережі з вентильними вузлами для класифікації акустичних даних. Проводяться обчислювальні експерименти на базі звуків оточуючого середовища. У роботах [13, 21] розв'язується задача виявлення специфічних звукових подій, наприклад, плачу дитини, звуку сигналізації або пострілів у публічних місцях тощо.

У статті [15] пропонується автоматична система екстракції ознак, в якій використовується генетичні алгоритми для отримання оптимальної, з точки зору певної задачі, комбінації операторів. Оператором можуть виступати різноманітні перетворення сигналу з метою отримання додаткових характеристик: алгоритми перетворення Фур'є, фільтри, алгоритми визначення інтервалів тощо. Функція пристосованості генетичного алгоритму обчислюється як міра якості класифікації аудіо даних, для класифікації використовується метод опорних векторів.

Робота [17] присвячена задачі класифікації музики та мовлення. Пропонується метод оптимізації числа ознак для задачі класифікації аудіо записів музики та мовлення у форматі MPEG. Для класифікації використовується метод  $k$ -середніх та нечітка нейронна мережа. Для виділення тих ознак, які найбільш впливають на результат класифікації застосовуються два підходи: аналіз головних компонент та генетичний алгоритм.

У [18] розглядається задача класифікації музичних записів та співу птахів. Для класифікації використовується комбінація методу кластеризації за допомогою самоорганізаційних карт Кохонена та класифікатор на основі нейронних мереж векторного квантування.

В [20] розглядається випадок задачі класифікації аудіо даних, при якому дані для навчання включають фоновий шум, а дані тестового набору записано без шуму. В цьому випадку розподіли ознак відповідних даних для тренування та тестування можуть бути схожі, але зміщені один відносно другого. Розроблено модифікацію логістичної регресії для нівелювання зміщень при навчанні та тестуванні класифікатора.

Окремою задачею є підготовка акустичних даних різного походження та позначення їх відповідними мітками, що необхідно для реалізації методів машинного навчання з вчителем. У роботі [9] визначається онтологія, що формалізує набір аудіо даних, який може використовуватися для навчання систем машинного слуху. Онтологія, яка вводиться в статті, визначає систему можливих категорій звуків для розпізнавання. Пов'язаний з цією роботою ресурс [research.google.com/audioset](https://research.google.com/audioset) містить набір розмічених вручну звукових роликів з YouTube (понад 2 мільйони файлів). Кожен з десяти секундних сегментів може відноситися до одного чи декількох класів онтології. Також відомими платформами з даними для систем машинного слуху є [freesound.org](https://freesound.org), [DCASE \(dcase.community\)](https://dcase.community) та, певною мірою, [kaggle.com](https://kaggle.com).

#### Висновки

З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що задача класифікації акустичних даних і, загалом, розробки систем машинного слуху є досить актуальною. Опубліковані на даний момент наукові статті можна умовно розділити на три категорії.

До першої відносять роботи, в яких виконується попередня обробка сигналу з метою сегментації та вилучення ознак, далі навчається класифікатор на вхід якого подаються вектори ознак. В цих роботах, зазвичай, застосовується перетворення Фур'є, обчислення мел-частотних кепстральних коефіцієнтів та інших частотних або спектральних характеристик сигналу. З класифікаторів частіше застосовуються метод опірних векторів, k-найближчих сусідів, дерева прийняття рішень, метод k-середніх, нейронні мережі та інші. Може також застосовуватися ансамбль декількох класифікаторів, в такому випадку клас-переможець визначається шляхом голосування.

До другої категорії можна віднести публікації, в яких автори намагаються автоматизувати процес побудови оптимального набору ознак для застосування класифікаторів. Серед підходів, які застосовуються для такої автоматизації, можна виділити генетичні алгоритми та нейронні мережі. Класифікатори використовуються ті ж, що і в публікаціях попередньої категорії.

В публікаціях третьої категорії застосовуються підходи глибинних нейронних мереж. Часто це згорткові нейронні мережі, на вхід яких можуть подаватися як дані без попередньої обробки, так і набори ознак акустичних даних. Ефективність такого підходу пояснюється багатошаровою архітектурою згорткових нейронних мереж. Передбачається наявність декількох типів шарів: шари згортки, в яких виділяються певного виду ознаки, агрегувальні шари, в яких відбувається зменшення розмірності та декілька повністю зв'язних шарів, в яких виконується класифікація. До недоліків такого підходу можна віднести складність налаштування нейронних мереж зі складною архітектурою та вимогливість до обчислювальних ресурсів. Реалізація глибинних нейронних мереж, зазвичай, потребує системи паралельних та розподілених обчислень, залучення графічних процесорів GPU.

На основі наведеного в роботі аналізу публікацій та методів, що в них застосовуються, можна запропонувати можливий варіант подальшого розвитку систем машинного слуху. Такий підхід може використовувати різні види ансамблевого навчання із застосуванням класифікаторів на основі ознак та глибинних нейронних мереж. Таким чином, різні класифікатори, на вхід яких подаються різні вектори ознак або дані без попередньої обробки, можуть бути відносно ефективними на різних даних, але об'єднуються в один ефективний класифікатор-ансамбль. Перевагою такого підходу може бути його адаптивність з точки зору вимогливості до обчислювальних ресурсів, оскільки, за необхідністю, можна коректувати кількість класифікаторів, які беруть участь в аналізі.

#### Список використаної літератури

1. Alias F. A review of physical and perceptual feature extraction techniques for speech, music and environmental sounds / F. Alias, J.C. Socoro, X. Sevillano // *J. Appl. Sci.*, 2016. – 6(5), 143. P. 1–44.
2. Bach J.-H. Automatic classification of audio data using nonlinear neural response models / J.-H. Bach, A.-F. Meyer, D. McElfresh, J. Anemüller // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Kyoto, Japan, 2012. – P. 357–360.
3. Bertin-Mahieux T. Automatic tagging of audio: the state-of-the-art. *Machine audition: principles, algorithms and systems* / T. Bertin-Mahieux, D. Eck, M. Mandel // *IGI Global*, 2011. – P. 334–352.
4. Burges C.J.S. Extracting noise-robust features from audio data / C.J.S. Burges, J.C. Platt, S. Jana // *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, Orlando, FL, USA, 13–17 May 2002, 2002. – P. 1021–1024.
5. Camastra F. *Machine learning for audio, image and video analysis* / F. Camastra, A. Vinciarelli – London, Springer-Verlag, 2015. – 561 p.
6. Costa C.H.L. Automatic classification of audio data / C.H.L. Costa, Jr. J.D. Valle, A.L. Koerich // *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2004. – P. 562–567.
7. Dongge Li. Classification of general audio data for content-based retrieval / Li Dongge, Ishwar K. Sethi, Nevenka Dimitrova, Tom McGee // *Pattern Recognition Letters*, 2001. – Vol. 22(5). – P. 533–544.
8. Free sound General-Purpose Audio Tagging Challenge. URL: <https://www.kaggle.com/c/freesound-audio-tagging/data> (Дата звернення 06.06.2018)

9. Gemmeke J.F. Audio set: an ontology and human-labeled dataset for audio events / J.F. Gemmeke, D.P.W. Ellis, D. Freedman, A. Jansen, W. Lawrence, R.C. Moore, M. Plakal, M. Ritter // Proceedings of the Acoustics, Speech and Signal Processing International Conference, 2017.
10. Howel J. Acoustic classification of focus: on the web and in the lab / J. Howel, M. Rooth, M. Wagner // Laboratory Phonology: Journal of the Association for Laboratory Phonology, 2007. – 8(1): 16. – P. 1–41.
11. Ibrahim Z. Al A. Audio data analysis using parametric representation of temporal relations / Z. Al A. Ibrahim, I. Ferrane, P. Joly // IEEE International Conference on Information and Communication Technologies: from Theory to Applications (ICTTA), 2006.
12. Kong Q. Convolutional gated recurrent neural network incorporating spatial features for audio tagging / Q. Kong, Y. Xu, W. Wang, M.D. Plumbley // The 2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2017), Anchorage, Alaska, 2017.
13. Kong Q. A joint separation-classification model for sound event detection of weakly labelled data / Q. Kong, Y. Xu, W. Wang, M.D. Plumbley // ICASSP 2018 - 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 15 - 20 Apr 2018, Calgary, Canada, 2018.
14. Lyon R.F. Machine Hearing: An Emerging Field / R.F. Lyon // IEEE Signal Process. Mag, 2010. – Vol. 27. – P. 131–139.
15. Mierswa I. Learning feature extraction for learning from audio data / I. Mierswa, K. Morik // Technische Universität Dortmund. Technical Reports, 2004 – No. 55.
16. Oppenheim A.V. Discrete-Time Signal Processing. Third edition / A.V. Oppenheim // Pearson Education Limited, 2014 – 1055 p.
17. Rizzi A. Optimal short-time features for music/speech classification of compressed audio data / A. Rizzi, M. Buccino, M. Panella, A. Uncini // International Conference on Intelligent Agents. 28 Nov.-1 Dec. 2006. Sydney, NSW, Australia, 2006.
18. Stastný J., Skorpil V., Fejfar J. Audio data classification by means of new algorithms / J. Stastný, V. Skorpil, J. Fejfar // 36th International conference on Telecommunications and Signal Processing 2013, Rome, Italy, 2013. – P. 507–511.
19. Sturm B.L. A Survey of evaluation in music genre recognition / B.L. Sturm, A. Nürnberger, S. Stober, B. Larsen, M. Detyniecki (eds) // Adaptive Multimedia Retrieval: Semantics, Context, and Adaptation. AMR 2012. Lecture Notes in Computer Science, 2014. – Vol 8382. – P. 29–66.
20. Wichern G. Automatic audio tagging using covariate shift adaptation / G. Wichern, M. Yamada, H. Thornburg, M. Sugiyama, A. Spanias // IEEE international conference Acoustics speech and signal processing (ICASSP), 14–19 Mar 2010, 2010.
21. Xu Y. Unsupervised feature learning based on deep models for environmental audio tagging / Y. Xu, Q. Huang, W. Wang, P. Foster, S. Sigtia, P.J.B. Jackson, M.D. Plumbley // IEEE/ACM transactions on audio, speech and language processing, 2017. – Vol 25., No. 6. – P. 1230–1241.
22. Zaccane G., Karim Md. R. Deep learning with TensorFlow / G. Zaccane, Md. R. Krim. – Packt Publishing, 2018. – 767 p.

УДК 004.93+004.891

Е.К. НАЗІРОВ, Т.О. НАЗІРОВА, М.Ю. КАРПЕНКО

Харківський національний університет  
міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків**МЕТОДИ ЗБОРУ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ САУНДЛЕТНОЇ  
БАЙЄСІВСЬКОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ**

*Стаття присвячена проблемам безпеки населення і територій в умовах надзвичайних ситуацій (НС). У роботі проведено обґрунтування застосування нейронних мереж для прогнозування НС та етапи побудови нейронної мережі для моделювання НС. Мета роботи досягається розвитком науково-технічних основ для технічної реалізації комплексної в межах України системи моніторингу, попередження та ліквідації НС природного, техногенного характеру та забезпечення екологічної безпеки. Прогнозування виникнення НС та визначення місця розташування є актуальним завданням, яке вимагає постійного і ефективного рішення.*

*Ключові слова: надзвичайна ситуація, автоматизована система, акустичні сигнали, потенційно небезпечний об'єкт, системи сповіщення, цивільний захист населення, інформування.*

Э.К. НАЗИРОВ, Т.А. НАЗИРОВА, Н.Ю. КАРПЕНКО

Харьковский национальный университет  
городского хозяйства им. О. М. Бекетова, г. Харьков**МЕТОДЫ СБОРА И КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ САУНДЛЕТНОЙ  
БАЙЕСОВСКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

*Статья посвящена проблемам безопасности населения и территорий в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС). В работе проведено обоснование применения нейронных сетей для прогнозирования ЧС и этапы построения нейронной сети для моделирования ЧС. Цель работы достигается развитием научно-технических основ для технической реализации, комплексной в пределах Украины, системы мониторинга, предупреждения и ликвидации ЧС природного, техногенного характера и обеспечения экологической безопасности. Прогнозирование возникновения ЧС и определения местоположения является актуальной задачей, которая требует постоянного и эффективного решения.*

*Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, автоматизированная система, акустические сигналы, потенциально опасный объект, системы оповещения, гражданская защита населения, информирование.*

E.K. NAZIROV, T.A. NAZIROVA, M.Y. KARPENKO

National University Urban Economy. O.M. Beketova, Kharkiv

**METHODS OF COLLECTING AND CLASSIFICATION BY MEANS OF SOUNDLET  
BAYESIAN NEURAL NETWORK**

*The paper substantiates the application of neural networks for prediction of emergency situations and the stages of building a neural network for simulation of emergency situations. The purpose of the work is achieved by developing scientific and technical bases for the technical implementation of a comprehensive within Ukraine monitoring, prevention and liquidation system of natural and man-made emergency situations and ensuring environmental safety.*

*Forecasting emergencies and location determination is an urgent task that requires a permanent and effective solution. The basis of this problem is the construction of the effective methods, providing the high speed of the learning pattern recognition models as well as high probability, the adequacy and speed of emergency signals recognition. The article describes the principles of the construction and operation of the system for the recognition of emergency situations using neural networks. Considered apparatus and analysis of the need to use a neural network, to predict the physical parameters the emerging problem. Fulfilled the analysis of the chosen structure and neural networks, which should be used to predict the physical parameters. In article proposed model of a neural network to solve the problem of prediction. Also presented, the mathematical formula for visual understanding of the structure of neural networks and their work.*

*The article is devoted to the problem of emergencies prevention using modern methods of analysis of acoustic data. Emergencies arise in the conditions of extraordinary situations and management in emergency situations characterized by the need for work in the absence of information, the high rate of change in the situation, the need for operational formation of the most effective solutions, which have high efficiency, which imposes requirements to minimize the time and losses in the elimination of emergency situations.*



*Results of the study can be used for analysis and modelling of stability of emergency service that is for evaluation of the emergency or potentially dangerous object.*

*Keywords: emergency situation, coverage, automated system, acoustic signals, emergency, potentially dangerous object, notification systems, civil protection of the population, informing.*

### **Постановка проблеми**

На межі третього тисячоліття людство досягне досить високого наукового, технічного і виробничого прогресу, що в свою чергу створює, умови для великої концентрації ймовірностей виникнення надзвичайних ситуацій. Статтю присвячено проблематиці попередження виникнення надзвичайних ситуацій за допомогою використання штучних нейронних мереж для збору та класифікації аудіо даних. Надзвичайні ситуації виникають в умовах екстраординарних ситуацій. Управління в умовах критичного стану відрізняється необхідністю роботи при нестачі інформації, при високому темпі зміни ситуації, потребує оперативного формування найбільш ефективних рішень, які мають високу результативність. Все це накладає вимоги до мінімізації часу і втрат при ліквідації надзвичайної ситуації.

Метою роботи є розвиток науково-технічних основ для технічної реалізації комплексної в межах України системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру та забезпечення екологічної безпеки. В умовах сьогодення важливою задачею залишається необхідність розроблення нових підходів та технологій, що дадуть змогу отримати всю повноту, необхідної інформації. Сформульовано основні проблеми та напрямки їх усунення для поліпшення якості та підвищення інформативності контролю за НС.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Одна з актуальних і найбільш складних проблем держави і суспільства – створення гарантій безпечного проживання та діяльності населення на всій території України як у мирний, так і у воєнний час. Стан кризової політичної ситуації в Україні приніс нові вимоги суспільства до глобальних заходів щодо забезпечення захищеності, функціонування об'єктів економіки та життєдіяльності населення. Дослідженнями даної проблеми присвятили свої праці І.А. Чуб, М.В. Новожилова, John J. Fay, David Patterson, В.М. Попов, Michael Khalemsky, David G. Schwartz, A. Malizia, T. Onorati та багато інших. В роботах науковців доведено, що для будь-якого суспільства є актуальною необхідністю технічної реалізації заходів попередження та недопущення впливу небезпечних факторів на процес життєдіяльності населення та функціонування різного роду об'єктів держави. Це доводить актуальність напрямку дослідження в цій області. Проте переважна більшість робіт науковців пов'язана з дослідженнями техногенних і природних надзвичайних ситуацій. Моніторинг соціальних надзвичайних ситуацій, що потребує обробки різноманітних типів інформації з неоднорідних джерел, впровадження додаткових інструментів її збору й подальшого аналізу, досліджено недостатньо.

### **Мета дослідження**

Метою даного дослідження є розробка та аналіз перспективних напрямків та технологій використання нейронних мереж для збору акустичних сигналів надзвичайних ситуацій, для подальшого їх використання в процесі навчання нейронної мережі раннього визначення місце-розташування небезпечних об'єктів. Мета роботи – розробка методу класифікації акустичних сигналів за допомогою інтелектуального аналізу даних, на основі саундлетної байєсівської нейронної мережі. Мета роботи досягається впровадженням сучасних науково-технічних основ для реалізації комплексної системи моніторингу для попередження населення про загрозу та напрямки щодо ліквідації надзвичайних ситуацій природного, техногенного характеру та для забезпечення екологічної безпеки.

### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Ефективність тієї чи іншої системи, що використана для попередження надзвичайного стану, оцінюється за результатами, які мають місце вже після виникнення ситуації. Тому раннє прогнозування некерованих аспектів ситуацій перед прийняттям рішення, дає можливість зробити найефективніший вибір, який без передбачення міг би мати негативні наслідки розвитку ситуації.

Нейромережевий підхід виник на основі біологічних нейронних мереж людського мозку, який здатен до самонавчання та ефективно вирішує складні задачі з неоднорідно-параметричними даними. Деякі різновиди штучних нейронних мереж являють собою математичні моделі і мають лише віддалену подібність зі своїми реальними прототипами з нейрофізіології. Нейронні мережі – це потужний інтелектуальний інструмент, який дає змогу полегшити процес прийняття важливих і неочевидних рішень за умов дефіциту інформації та потреб щодо екстреного реагування. Основною характеристикою сучасних нейронних мереж є їх здатність моделювати свої результати, у залежності від мінливості зовнішнього середовища, з урахуванням нечітких та прихованих закономірностей інформаційного потоку даних.

Головним інструментом машинного навчання є теорема Байєса, яку представлено формулою (1):

$$P(\theta | D) = \frac{P(\theta)P(D | \theta)}{P(D)}, \quad (1)$$

де  $\theta$  і  $D$  є подіями.  $P(\theta)$  та  $P(D)$  є ймовірностями подій  $\theta$  та  $D$ , які незалежні одна від одної.  $P(\theta|D)$  – це умовна ймовірність, так звана, правдоподібність (likelihood), яка є ймовірністю події  $\theta$  за умови, що подія  $D$  відбулася.  $P(D|\theta)$  – умовна ймовірність спостереження події  $D$  за умови настання події  $\theta$ .  $P(D)$  – повна ймовірність настання події  $D$ .

За умовними ймовірностями виду  $P(\theta|D)$  визначають розподіл ймовірностей параметрів моделі після з'ясування, які дані приймають до уваги. Умовну ймовірність  $P(\theta|D)$  називаються апостеріорною ймовірністю (posterior probability). У свою чергу, ймовірність  $P(\theta)$  є апіорною ймовірністю (prior probability). Вона є математичною формалізацією нашої інтуїції щодо предмету дослідження, формалізацією нашого попереднього досвіду, наявного до проведення експериментальних досліджень.

Оскільки байєсова мережа – це повна модель для змінних і їх відносин, вона може бути використана для того, щоб давати відповіді на ймовірнісні запитання. Структура моделі двошарової саундлетної байєсівської нейронної мережі представлена на рис. 1.

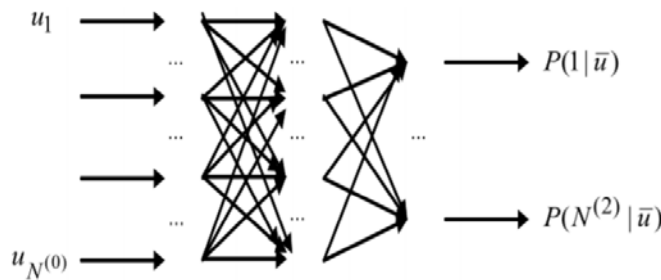


Рис. 1. Структура байєсівської нейронної мережі

Особливості спроектованої моделі нейронної мережі:

- нейронам вхідного шару відповідають компоненти вектора, що описує тестовий аудіо зразок;
- нейрони першого (прихованого) шару відповідають опорним зразкам;
- нейрони другого шару відповідають звукам;
- адаптація до звукових особливостей конкретного оператора здійснюється шляхом додавання в модель векторів опорних зразків;
- кожен нейрон першого (прихованого) шару обробляє інформацію на основі нормованої відстані між опорним і тестовим зразками звуку;
- ваги зв'язків між нейронами першого (прихованого) і другого (вихідного) шарів рівні одиниці або нулю, для цих ваг не потрібна процедура навчання;
- агрегування виходів нейронів першого (прихованого) шару виконується на основі максимуму;
- у другому (вихідному) шарі обчислюються апостеріорні ймовірності за формулою Байєса, що дозволяє визначити ймовірність приналежності тестового зразка звуку.

Загальна математична постановка завдання класифікації, яка може служити основою для побудови моделей метричної класифікації, буде наступною: нехай  $x$  – функція, що піддає класифікації зразок,  $y$  – номер класу зразка (аудіосигналу надзвичайної ситуації). Завдання полягає в тому, щоб за значенням  $x$  визначити значення величини  $y$ . Тоді побудова моделі нейронно-мережевої класифікації зводиться до визначення залежності між номером класу  $y$  від значення  $x$  засобами нейронно-мережевих технологій. Модель класифікації аудіоданих на основі саундлетної байєсівської нейронної мережі може бути представлена у вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{u} &= (u_1, \dots, u_{N^{(0)}}), u_n = (Fx)(n-1), n \in \{1, \dots, N^{(0)}\}, \\ y &= \arg \max_j P(j | \bar{u}), \tilde{y} = \arg \max_j P(j | \bar{u}), j \in \{1, \dots, N^{(2)}\}, \end{aligned} \tag{2}$$

$$P(j|\bar{u}) = \frac{P(j)P(\bar{u}|j)}{\sum_{j=1}^{N^{(2)}} P(j)P(\bar{u}|j)}, \quad j \in \{1, \dots, N^{(2)}\},$$

$$P(\bar{u}|j) = \max_z w_{zj} P(\bar{u}|\bar{v}_z), \quad z \in \{1, \dots, N^{(1)}\}, \quad j \in \{1, \dots, N^{(2)}\},$$

$$P(\bar{u}|\bar{v}_z) = 1 - \frac{\rho_\rho(\bar{v}_z, \bar{u})}{A \sqrt[N^{(0)}]{N^{(0)}}}, \quad z \in \{1, \dots, N^{(1)}\},$$

$$\rho_\rho(\bar{v}_z, \bar{u}) = \sqrt[p]{\sum_{k=1}^{N^{(0)}} |v_{zk} - u_k|^p},$$

де  $y$  – номер звуку;  $\tilde{y}$  – максимум апостеріорної ймовірності;  $x$  – цілочисельна обмежена фінитна дискретна функція, яка описує тестовий зразок дискретного звукового сигналу;  $\bar{u}$  – цілочисельний вектор, отриманий в результаті перетворення функції  $x$  до єдиного амплітудно-часового вікна на основі саундлетів та саундлетних відображень, що надходить на вхід штучної нейронної мережі;  $\bar{v}_z$  – цілочисельний вектор, пов'язаний з  $z$ -им нейроном прихованого шару, відповідний  $z$ -ому опорному зразку;  $P(j|\bar{u})$  – апостеріорна ймовірність (умовна ймовірність появи тестового зразка  $j$ -ого звуку при спостереженні  $\bar{u}$ ), обчислюється для кожного  $j$ -ого нейрона другого (вихідного) шару;  $P(\bar{u}|j)$  – емісійна ймовірність (ймовірність спостереження  $\bar{u}$  за умови, що наданий тестовий зразок відповідає  $j$ -ому звуку);  $P(\bar{u}|\bar{v}_z)$  – умовна ймовірність (ймовірність спостереження  $\bar{u}$  за умови, що тестовий зразок відповідає вектору опорних зразків  $\bar{v}_z$ ), що обчислюється для кожного  $z$ -ого нейрона першого (прихованого) шару;  $P(j)$  – апріорна ймовірність появи зразка  $j$ -ого звуку (безумовна ймовірність), яка рівноможлива в силу обмеженої статистики, тобто у формулі (2) змінна  $P(j) = \frac{1}{N^{(2)}}$ ;  $A$  – максимальне значення вектора  $\bar{u}$ ;  $N^{(0)}$  – кількість нейронів вхідного шару, відповідна довжині вектора  $\bar{u}$ ;  $N^{(1)}$  – кількість нейронів прихованого шару, що відповідає кількості опорних зразків всіх звуків;  $N^{(2)}$  – кількість нейронів вихідного шару, відповідна кількості звуків;  $w_{zj}$  – вага  $z$ -ого опорного зразка,  $w_{zj} \in [0, 1]$ , причому якщо  $z$ -ий нейрон прихованого шару не пов'язаний з  $j$ -им нейроном вихідного шару ( $z$ -ий опорний зразок не відповідає  $j$ -ому звуку), то  $w_{zj} = 0$ . Якщо вага не враховується, то  $w_z \in \{0, 1\}$ .

Для створеної моделі сформулюємо критерії ефективності.  
Критерії оцінки ефективності моделі:

- Критерій швидкості класифікації означає вибір із заданого набору метрик такої метрики, яка на стадії навчання моделі вимагає найменшої кількості опорних зразків

$$F = T \longrightarrow \min_P \tag{3}$$

- Критерій оцінки порогової ймовірності класифікації означає вибір такого безлічі опорних зразків на стадії дослідної експлуатації моделі, щоб для тестового зразка номер звуку, обчислений за моделлю, збігався з тестовим номером звуку цього тестового зразка:

$$F = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \phi(y_1^{\text{model}}, y_i^{\text{test}}) \longrightarrow \max_{\{H_j\}}$$

$$\phi(a, b) = \begin{cases} 1, & a = b \\ 0, & a \neq b \end{cases}, \tag{4}$$

$$y_1^{\text{model}} = \arg \max_j P(j|\bar{u}_i), \quad j \in \{1, \dots, J\},$$

де  $\bar{u}_i$  –  $i$ -ий тестовий зразок;  $y_1^{test}$  – тестовий номер звуку для  $i$ -ого тестового зразка;  $I$  – кількість тестових зразків.

Для оцінки готовності моделі до експлуатації використовується критерій її адекватності, заснований на мінімумі середньоквадратичної похибки:

$$F = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (y_1^{model} - y_i^{test}) \longrightarrow \min_{\{H_j\}}, \tag{5}$$

$$y_1^{model} = \max_j P(j | \bar{u}_i), j \in \{1, \dots, J\},$$

де  $\bar{u}_i$  –  $i$ -ий тестовий зразок;  $y_1^{test}$  – тестовий максимум апостеріорної ймовірності для  $i$ -ого тестового зразка.

Для оцінювання результатів класифікації вокальних звуків необхідно сформулювати умови їх класифікації.

**Умови класифікації тестового зразка звуку надзвичайної ситуації по опорним зразкам.**

Нехай дано тестовий зразок звуку надзвичайної ситуації, який описується цілочисельним вектором  $\bar{u}$ . Нехай для кожного  $j$ -ого звуку кризового стану обчислена емісійна ймовірність  $P(\bar{u}|j)$ , тобто ймовірність спостереження вектора  $\bar{u}$ , що описує тестовий зразок, за умови, що тестовий зразок відповідає  $j$ -ому звуку. Необхідна умова класифікації тестового зразка. Тестовий зразок класифікований, якщо,

$$\forall n \in \{1, \dots, J\} \forall m \in \{1, \dots, J\}$$

$$(P(\bar{u} | n) = \max P(\bar{u} | j) \wedge (P(\bar{u} | m) = \max P(\bar{u} | j) \longrightarrow$$

$$(n = m) \wedge (P(\bar{u} | n) > \bar{\varepsilon}), j \in \{1, \dots, J\}, \tag{6}$$

де  $\bar{\varepsilon}$  – задана емісійна ймовірність класифікації,  $0 < \bar{\varepsilon} \leq 1$ .

Достатня умова класифікації тестового зразка. Тестовий зразок класифікований, якщо

$$\forall n \in \{1, \dots, J\} \forall m \in \{1, \dots, J\}$$

$$(P(\bar{u} | n) = \max P(\bar{u} | j) \wedge (P(\bar{u} | m) = \max P(\bar{u} | j) \longrightarrow$$

$$(n = m) \wedge (P(\bar{u} | n) = 1), j \in \{1, \dots, J\}, \tag{7}$$

На основі отриманих умов можна сформулювати логіко-формальні правила оцінювання результатів класифікації.

**Логіко-формальні правила оцінювання результату класифікації.** Для оцінювання результатів класифікації формуються такі логіко-формальні правила:

$$\text{якщо } (P(\bar{u} | y) > \bar{\varepsilon}_{\max}), \text{ то } q=y, \tag{8}$$

$$\text{якщо } (P(\bar{u} | n) \leq \bar{\varepsilon}_{\max}), \text{ то } q=0,$$

де  $q$  – номер звуку,  $\bar{\varepsilon}_{\max}$  – обчислений максимум емісійних ймовірностей  $P(\bar{u}|y)$  для множини векторів тестових зразків некритичних (неперіодичних) звуків.

**Чисельне дослідження метричного методу класифікації звуків надзвичайного стану.**

В табл. 1 наведено порівняння запропонованого методу та існуючих нейромережових методів на основі бази даних акустичних сигналів. Класифікації підлягали всі звуки надзвичайної ситуації (розбиті шибки, крики про допомогу, звуки пострілів, звуки руйнування стін тощо).

Таблиця 1

$N$	Штучна нейронна мережа	Хибна класифікація, %
1	Тришаровий MLP	0.80
2	RBFNN	0.81
3	GRNN	0.82
4	PNN	0.84
5	Тришаровий RMLP	0.90
6	Саундлетна байєсівська NN	0.95

В загально прийнятих та поширених на цей час методах, як зразки використовувалися вектори мель-частотних кепстральних коефіцієнтів (Mel-frequency cepstral coefficients - MFCC), обчислені на ділянках рівної довжини, тобто фреймах. Помилка класифікації являє собою відношення кількості правильно класифікованих зразків, що містять звуки надзвичайного стану, до їх загальної кількості у відсотках, при цьому зразки, що містять кінець першого докризового звуку і початок докризового іншого звуку, не

враховувалися. Наведені в табл. 1 стандартні нейромережеві методи реалізовані в запропонованій статті за допомогою пакета Matlab. Дослідження дозволяє зробити висновок, що запропонований метод забезпечує високу ймовірність класифікації звуків докризового та кризового стану надзвичайних ситуацій.

### Висновки

У роботі розглянуто можливості та ефективність використання штучних нейронних мереж для вирішення завдань прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій будь-якого характеру.

Запропоновано використовувати саундлети й саундлетні відображення стосовно штучних нейронних мереж та нейромережевий підхід до класифікації акустичних сигналів НС, який відрізняється можливістю враховувати різнохарактерну структуру аудіосигналів і узагальнювати зразки одного типу звуку різної довжини з різним розмахом амплітуд, що підвищує ефективність класифікації сигналів надзвичайної ситуації. Можливість використання різноманітних звукових сигналів, які свідчать про докризовий стан, дадуть змогу швидкого реагування та раннього виявлення місця можливого виникнення надзвичайної ситуації, що в свою чергу надасть більш ефективні можливості для перешкодження розвитку ситуації в критичний стан.

Логічним продовженням діяльності в зазначеному напрямку є проектування єдиної державної системи безпеки, з використанням штучних нейронних мереж. Також перспективним напрямком є наукові дослідження щодо забезпечення інтеперабельності існуючих розрізнених систем, як в Україні так і в інших державах світу. Всі ці дії дозволять консолідовано реагувати на будь-які погрози та надзвичайні ситуації довільного походження.

### Список використаної літератури

1. Математические модели и методы проектирования систем раннего обнаружения пожара. Монография / И.А. Чуб, М.В. Новожилова, В.А. Андронов. – Харьков: НУЦЗУ. – 2014. – 148 с.
2. Emergency Management / John J. Fay, David Patterson [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128092781000153>
3. Попов В.М. Показатели эффективности региональной системы техногенной безопасности / В.М. Попов, И.А. Чуб, М.В. Новожилова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 2(20). – С. 32-41.
4. Назиров Э.К. Система сповіщення в надзвичайних ситуаціях "АСЕН" / Э.К. Назиров, Т.А. Назирова // Науковий вісник НЛТУ України. – 2018. – № 28(1). – С. 140-144. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.15421/40280128>
5. Львов А.В. Триангуляционная система определения координат источника звука / А.В. Львов, М.Н. Агапов, А.И. Тищенко " // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 159-162. – Режим доступа к ресурсу: [http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2010\\_02/pdf/158lvov.pdf](http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2010_02/pdf/158lvov.pdf)
6. Emergency Response Community Effectiveness: A simulation modeler for comparing Emergency Medical Services with smartphone-based Samaritan response // Michael Khalemsky, David G.Schwartz [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923617301252>
7. Назиров Э.К. Использование звукометрии в персональной системе оповещения о наступлении чрезвычайной ситуации / Э.К. Назиров // Компьютерні технології в міському та регіональному господарстві: матер. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – С. 155-156.
8. An ontology for emergency notification systems accessibility / A. Malizia, T. Onorati, P. Diaz, I. Aedo, F. Astorga-Paliza [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409008768>
9. Application of satellite navigation system for emergency warning and alerting / Suelynn Choy, John Handmer, Joshua Whittaker, Yuki Shinohara, Tomohiro Hatori, Naohiko Kohtake [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019897151630031X>
10. GSMA Intelligence Global Data [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.gsmaintelligence.com/>.
11. Державна служба України з надзвичайних ситуацій [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.dsns.gov.ua/>.

УДК 621.397

Е.В. ОШАРОВСКАЯ, Н.А. ПАТЛАЕНКО

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

І.В. ОШАРОВСКИЙ, Н.П. ГУРЧЕНКО

Одесский национальный политехнический университет

### АЛГОРИТМЫ ВЫБОРА ПОРОГОВ ОГРАНИЧЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИ ОБОБЩЕННОМ ФУРЬЕ-АНАЛИЗЕ ТЕКСТУР ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОЙ ЧЕТКОСТИ

*В работе методами моделирования исследуются способы сжатия изображений сверхвысокой четкости. Целью моделирование в среде Matlab было сравнение качественных показателей сжатых изображений при использовании обобщенного преобразования Фурье, с устранением малозначимых спектральных коэффициентов, но не приводящих к заметному размытию изображения и искажению текстур. Сформулированы критерии выбора порогов ограничения по разнице значений спектральных составляющих, приходящихся на полосу спектра сигнала. Проведен теоретический анализ процесса формирования спектров сигналов изображений методами двумерного преобразования Фурье. Определено влияние основных параметров пороговых функций на формирование границ и текстур восстановленных изображений. Оптимальность определяется по максимальному значению отношения сигнала к помехе на границах изображения.*

*Ключевые слова:* цифровое изображение, Фурье-преобразование, текстура, отношение сигнала к помехе на границах изображения.

О.В. ОШАРОВСЬКА, М.О. ПАТЛАЄНКО

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

І.В. ОШАРОВСЬКІЙ, Н.П. ГУРЧЕНКО

Одеський національний політехнічний університет

### АЛГОРИТМИ ВИБОРУ ПОРОГІВ ОБМЕЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ПРИ УЗАГАЛЬНЕНОМУ ФУР'Є-АНАЛІЗІ ТЕКСТУРИ ЗОБРАЖЕНЬ ВИСОКОЇ ЧІТКОСТІ

*В роботі методами моделювання досліджуються способи стиснення зображень надвисокої чіткості. Метою моделювання в середовищі Matlab було порівняння якісних показників стислих зображень при використанні узагальненого перетворення Фур'є, з усуненням малозначущих спектральних коефіцієнтів, але не призводять до помітного розмиття зображення і спотворення текстур. Сформульовано критерії вибору порогів обмеження по різниці значень спектральних складових, що припадають на смугу спектра сигналу. Проведено теоретичний аналіз процесу формування спектрів сигналів зображень методами двовимірного перетворення Фур'є. Визначено вплив основних параметрів порогових функцій на формування кордонів і текстур відновлених зображень. Оптимальність визначається за максимальним значенням відношення сигналу до перешкоди на кордонах зображення.*

*Ключові слова:* цифрове зображення, Фур'є-перетворення, текстура, відношення сигналу до шуму на кордонах зображення.

O.V. OSHAROVSKA, M.O. PATLAENKO

O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications

I.V. OSHAROVSKIYI, N.P. GURCHENKO

Odessa national polytechnic university

### THRESHOLDS SELECTION ALGORITHM FOR SPECTRAL COEFFICIENTS OF THE GENERALIZED FOURIER-ANALYSIS TEXTURES IN HIGH DEFINITION IMAGE

*In the modeling techniques are investigated ways for the compression of ultra-high-definition images. The purpose of modeling in Matlab was to compare the quality of compressed images with the use of the generalized Fourier transform, with the elimination of low-value spectral coefficients, but not leading to noticeable blurring of the image and distortion of the textures. The spectrum of the two-dimensional image signal consists of horizontal, vertical and diagonal spatial frequencies Thanks to the numerous algorithms for fast Fourier transforms; it is possible to obtain the spectrum of the entire image in an acceptable time. The main energy of the spectrum is concentrated at low frequencies, and the high-frequency components are usually very small in amplitude and. in a number of cases, they can be neglected, equating them to zero. The greater the number of high-frequency components will be equated to zero, the greater the compression ratio can be obtained. In practice, special cases of*

*Fourier transforms are used, such as discrete cosine transform or discrete sine transformation. This is done by dividing all the special coefficients by the corresponding value in the quantization table and rounding the result to the nearest integer. Components that had either a small coefficient or a large divisor in the quantization table are likely to be rounded to zero. The lower the quality setting, the greater the divisor, which gives a greater chance of getting a zero result. Criteria are formulated for the choice of thresholds for limiting the difference in the values of the spectral components per band of the signal spectrum. A theoretical analysis of the forming the spectra process of image signals using two-dimensional Fourier transforms is carried out. The influence of the main parameters of the threshold functions on the formation of the boundaries and textures of the reconstructed images is determined. Optimality is determined by the maximum value of the signal-to-noise ratio at the edges of the image.*

*Key words: digital image, Fourier transform, texture, signal-to-noise ratio at the image edges.*

### **Постановка проблеми**

Изображения высокой и сверхвысокой четкости, количество элементов в которых исчисляется миллионами, находят широкое применение и в фотографии, и в мультимедийных приложениях, и в кинопроизводстве [1–2]. Качество таких изображений обеспечивается методами цифровой обработки на всех этапах создания, передачи, хранения и воспроизведения. В таких изображениях, проектируемых на большие воспроизводящие устройства, можно разглядеть мельчайшие детали, такие как текстуру поверхности. Критичных параметров субъективного оценивания качества изображений существует несколько, например, цветопередача, контрастность, резкость, четкость. В процессе обработки и запоминания таких изображений осуществляется сжатие информации, приводящее к изменению субъективного качества. На изображениях появляются ложные контуры, изменяются цвета, появляются муары, пропадает текстура. Разработка методов сжатия изображений, которые не приводят к существенному ухудшению качества, но уменьшает требуемый объем памяти, является одной из актуальных задач. Построение зависимости коэффициента сжатия от отношения сигнала к шуму на границах изображений при разных законах частотно-зависимого квантования спектральных коэффициентов является целью исследования.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Прогресс методов сжатия неподвижных изображений и внутрикадрового сжатия видеопоследовательностей является ключевым элементом в построении широкополосных систем передачи изображений для различных целей [1–2]. В этом отношении основным критерием степени сжатия являются оценки, полученные путём измерения искажений резких границ изображения, возникающих в результате спектральной-обработки и в процессе сжатия [3].

В [48] приведены методы объективного оценивания изображений в условиях сравнения с эталонным изображением, или частичного сравнения, или без сравнения с исходным изображением и примеры оценки достижимого коэффициента сжатия и соответствующего искажения границ изображения в зависимости от параметров спектральных преобразований с квантованием коэффициентов. В частности, в [9] рассматривается вейвлет-обработка данных с изменением порогового уровня, с помощью которого настроен сигнал маски. В алгоритмах сжатия JPEG и MPEG применяется дискретное косинусное преобразование (ДКП) с большим разнообразием матриц квантования коэффициентов. Однако, к настоящему времени не разработаны требования к оценке качества воспроизведения после декодирования мелкоструктурных изменений в текстурах цифровых изображений.

### **Цель исследования**

Целью моделирования является сравнение вариантов Фурье-преобразования, в частности, использования в качестве ядра преобразования дискретного косинусного преобразования (ДКП – DST) или дискретного синусного преобразования (ДСП – DST), которые позволяют выполнять двумерное дискретное преобразование исходного изображения в спектральную область, ограничить пороговыми методами часть спектральных коэффициентов, но при этом не привести к заметному размытию мелких деталей изображения. Моделирование обработки изображения осуществляется в среде Matlab и на Simulink.

Поставлена задача выбрать и обосновать критерии выбора частотно-зависимых порогов ограничения спектральных компонент, обеспечивающих наилучшее субъективное качество передачи границ изображения и мелкоструктурных текстур, построить математическую модель формирования матриц квантования частотно-зависимых коэффициентов и провести численное решение обобщенного преобразования Фурье, описывающего процесс обработки изображений пороговыми масками в частотной области с последующим обратным преобразованием в пространственную для разных размеров блоков сегментации изображения.

### **Изложение основного материала исследования**

Прогресс методов сжатия неподвижных изображений и внутрикадрового сжатия видеопоследовательностей является ключевым элементом в построении широкополосных систем передачи изображений для различных целей. В этом отношении основным критерием степени сжатия являются

оценки, полученные путём измерения искажений резких границ изображения, возникающих в результате нелинейной обработки спектральных составляющих.

В [1–2] приведены примеры оценки коэффициента сжатия и соответствующего искажения границ изображения в зависимости от параметров вейвлет-обработки, реализуемой на отдельных этапах алгоритма иерархического сжатия. В частности, при обработке вейвлет-данных важно определить пороговый уровень, с помощью которого настроен сигнал маски, чтобы выбрать сигнал окрестности контуров градиентным методом как во время обработки, так и во время метрологической оценки качества изображения.

В этой работе основное внимание уделяется проблеме выбора порогового уровня на основе компромисса между достижимой степенью сжатия и возможной сохранностью текстуры изображения и приводятся соответствующие оценки.

Этот компромисс может иметь большое значение как для вещательных приложений, так и для широкого спектра видео приложений, в которых реализуется большое количество этапов производства, обработки, хранения, передачи и воспроизведения видеoinформации, где передача текстуры может сыграть значительную роль.

При попытке сохранить в меньшем объеме цифровое изображение часто приходится сталкиваться с решением о том, какие "настройки качества" (уровень сжатия) использовать. Формат файла JPEG позволяет выбрать подходящий компромисс между размером файла и качеством изображения. Важно понимать, что JPEG (и почти все форматы файлов с потерями) не подходят для промежуточного редактирования из-за того, что повторяющиеся сохранения обычно уменьшают качество рабочего файла. В дополнение к кумулятивному введению визуальных артефактов повторная декомпрессия также приводит к деструктивным изменениям цвета. Именно по этим причинам предпочтительным выбором для промежуточной обработки являются сжатие "без потерь" форматы файлов (такие как TIFF, PSD, BMP и т.д.). JPEG следует использовать только для хранения окончательного изображения.

Сначала захваченное камерой изображение представляется в цветовом пространстве RGB (Red Green Blue), далее из матриц сигналов основных цветов пересчетными схемами формируются новые матрицы яркостного сигнала  $Y$  (Luminance) и двух цветоразностных  $C_b$  (Chrominance Blue),  $C_r$  (Chrominance Red). Проведенные пересчеты из одного цветового пространства в другое пока не дает возможности сократить избыточность, имеющуюся одновременно в «трех» изображениях. Предположим, что имеется цветное изображение размерами  $N \times N = 2048 \times 2048$  элементов изображения, каждый элемент представлен  $m=10$ -разрядным кодом в каждой из трех составляющих. В этом случае требуемый объем памяти  $V$ , необходимый для хранения одного неподвижного изображения RGB или  $Y C_b C_r$  составляет (1):

$$M=3 \times N \times N \times m = 3 \times 2048 \times 2048 \times 10 = 120 \text{ Мбит.} \tag{1}$$

Для уменьшения требуемого объема памяти используется сжатие с потерями на основе спектральных преобразований. Наиболее распространённым является преобразование Фурье. Сжатие информации о цветных изображениях состоит из нескольких этапов, включающих как сжатие без потерь на основе учета статистических свойств, так и сжатие с потерями на основе обобщенного дискретного преобразования Фурье  $F(v_H, v_V)$ . Спектр сигнала двумерного изображения состоит из горизонтальных  $v_H$ , вертикальных  $v_V$  и диагональных  $v_D$  пространственных частот (2):

$$F(v_H, v_V) = \sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} B(x, y) \exp \left( -j2\pi \left( \frac{xv_H}{N_x} + \frac{yv_V}{N_y} \right) \right), \tag{2}$$

$$0 \leq x \leq N_x, \quad 0 \leq y \leq N_y.$$

где  $B(x, y)$  значение яркостного (или цветоразностного) сигнала элемента изображения с координатами  $(x, y)$ . Координаты представляются целыми числами и не превышают максимального размера изображения по горизонтали  $N_x$  и вертикали  $N_y$ .

Благодаря многочисленным алгоритмам быстрого преобразования Фурье можно за приемлемое время получить спектр всего изображения. Основная энергия спектра сосредоточена на низких частотах, а высокочастотные составляющие обычно очень незначительны по размаху и. в ряде случаев, ими можно пренебречь, приравняв их нулю. Чем большее количество высокочастотных компонент будут приравнены нулю, тем больший коэффициент сжатия можно получить. Однако, с точки зрения хранения и передачи спектра изображения, полученного по формуле (2), существенным недостатком является необходимость работы с двумя массивами, представляющих действительную и мнимую часть комплексных чисел спектра.

В практике используются частные случаи преобразования Фурье, такие как дискретное косинусное преобразование (ДКП=DCT) (3) или дискретное синусное преобразование (ДСП=DST) (4):



$$K_{\cos}(u, v) = a_x a_y \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} B(x, y) \cos \frac{\pi(2x+1)u}{2N} \cdot \cos \frac{\pi(2y+1)v}{2N} \quad (3)$$

$$0 \leq u \leq N-1 \quad 0 \leq v \leq N-1$$

$$a_x = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, & \text{если } u = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & \text{если } 1 \leq u \leq N-1 \end{cases}, \quad a_y = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, & \text{если } v = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & \text{если } 1 \leq v \leq N-1 \end{cases}$$

$$K_{\sin}(u, v) = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N B(x, y) \cdot \sin \frac{\pi x u}{N+1} \cdot \sin \frac{\pi v y}{N+1} \quad (4)$$

В стандартах JPEG и MPEG-2 используется ДКП. Особенность является сегментация в блоки - данные необработанного изображения разбиваются в блоки размером  $8 \times 8$  пикселей (эти блоки являются минимальным кодированным блоком). Это означает, что алгоритм сжатия JPEG в значительной степени зависит от положения и выравнивания границ этих блоков. В MPEG-4 предусматривается варьирование размеров блоков от  $4 \times 4$  до  $16 \times 16$ .

Квантование. Учитывая полученные значения спектральных коэффициентов на шаге DCT, они сортируются по порядку возрастания номеров от низкочастотных компонентов (изменения, которые происходят на большем расстоянии по блоку изображения) до высокочастотных компонентов (изменения, которые могут возникать при каждом пикселе). Широко известно, что люди более критично относятся к ошибкам в низкочастотной информации, чем к высокочастотной информации. Алгоритм JPEG отбрасывает многие из этих высокочастотных (шумоподобных) деталей и сохраняет медленно изменяющуюся информацию об изображении. Это делается путем деления всех спектральных коэффициентов на соответствующее значение в таблице квантования и округления результата до ближайшего целого числа. Компоненты, которые либо имели небольшой коэффициент, либо большой делитель в таблице квантования, вероятно, будут округлены до нуля. Чем ниже настройка качества, тем больше делитель, что дает больший шанс получить нулевой результат. С другой стороны, настройка для самого высокого качества имела бы значения таблицы квантования всех частот равным единицы, что означает, что все исходные данные дискретного косинусного преобразования (или синусного) сохранены.

Если таблицы квантования соответствуют стандартной тенденции ограниченного сжатия в низкочастотных компонентах, повышающих до умеренного сжатия в высокочастотных компонентах, то приблизительный коэффициент качества может действительно дать представление о том, как может отображаться общее качество.

Важным моментом здесь является то, что таблица квантования, используемая для этого шага, отличается почти от всех цифровых камер и пакетов программного обеспечения. Так как это самый значительный вклад в сжатие то при декомпрессии "ошибка" почти всегда приводит к ухудшению изображения при сохранении из разных компрессоров / источников. Производители камер самостоятельно выбирают произвольное "качество изображения" (или уровень), назначая матрицу квантования с 64 значениями, которую они разрабатывают, и поэтому "имена" не могут сравниваться между марками или даже моделями того же производителя (например, Canon "Fine" против Nikon's Fine).

Преобразованная матрица из 64 коэффициентов ДКП затем проходит операцию квантования, которая применяется для сокращения разрядности коэффициентов. Процесс квантования, который ведет к сжатию коэффициентов ДКП, выражается следующим образом (4):

$$z_{kl} = \text{round}(y_{kl}/q_{kl}) = \lfloor (y_{kl} \pm \lfloor q_{kl}/2 \rfloor) / q_{kl} \rfloor, \quad k, l = 0, 1, \dots, N-1, \quad (4)$$

где  $q_{kl}$  – весовой множитель матрицы квантования  $Q$  размера  $8 \times 8$  с номером  $kl$ ;  
 $\lfloor x \rfloor$  обозначает наибольшее целое меньшее или равное  $x$ .

На языке MatLab реализована программа двумерного ДКП для блоков размером  $8 \times 8$  пикселей и квантования полученных значений по матрицам коэффициентов. Матрицы квантования для яркостного сигнала вводились в переменную *filterlum*, а для цветоразностных сигналов в переменную *filterchroma*.

```
[N,M] = size(Y);
for i=0:8:N-8
```

```

for j=0:8:M-8
    d = dct2(Y(i+1:i+8,j+1:j+8));
    v = d./filterlum;
    Yr(i+1:i+8,j+1:j+8) = idct2(v);

    d = dct2(Cb(i+1:i+8,j+1:j+8));
    v = d./filterchroma;
    Cbr(i+1:i+8,j+1:j+8) = idct2(v);

    d = dct2(Cr(i+1:i+8,j+1:j+8));
    v = d./filterchroma;
    Crr(i+1:i+8,j+1:j+8) = idct2(v);
end
end
    
```

В табл. 1 приведены значения матриц коэффициентов квантования для яркостной составляющей и составляющих цветности для нескольких камер, позволяющих получить изображения высокой и сверхвысокой четкости.

Таблица 1

**Матрицы квантования яркостной и составляющих цветности для камер**

Матрица квантования яркостной составляющей								Матрица квантования составляющих цветности							
Камера SONY's DSC-N2															
1	1	1	1	1	2	3	4	1	1	1	3	6	6	6	6
1	1	1	1	2	3	4	3	1	1	2	4	6	6	6	6
1	1	1	1	2	3	4	3	1	2	3	6	6	6	6	6
1	1	1	2	3	5	5	4	3	4	6	6	6	6	6	6
1	1	2	3	4	7	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6
1	2	3	4	5	6	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6
3	4	5	5	6	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6
4	6	6	6	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Камера Canon EOS 10D															
1	1	1	1	1	2	3	3	1	1	1	2	5	5	5	5
1	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	3	5	5	5	5
1	1	1	1	2	3	3	3	1	1	3	5	5	5	5	5
1	1	1	1	3	4	4	3	2	3	5	5	5	5	5	5
1	1	2	3	3	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5
1	2	3	3	4	5	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2	3	4	4	5	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4	5	5	5	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Камера Canon PowerShot A700															
1	1	1	1	1	2	3	3	1	1	2	4	6	11	11	11
1	1	1	1	1	3	3	3	1	1	2	4	8	11	11	11
1	1	1	1	2	3	3	3	2	2	3	4	11	11	11	11
1	1	1	1	2	4	4	3	4	4	4	5	11	11	11	11
1	1	3	4	4	6	6	4	6	8	11	11	11	11	11	11
1	2	3	3	4	5	6	5	11	11	11	11	11	11	11	11
2	3	4	4	5	6	6	5	11	11	11	11	11	11	11	11
5	5	5	5	5	5	5	5	11	11	11	11	11	11	11	11
Камера NIKON D80															
1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	3	3	3	3
1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	3	3	3	3
1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2	3	3	3	3	3
1	1	1	1	2	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3
1	1	1	2	2	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1	1	2	2	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	2	3	3	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Камера NIKON - COOLPIX S10 (FINE)															
3	2	2	3	4	6	8	10	3	3	4	8	16	16	16	16
2	2	2	3	4	9	10	9	3	3	4	11	16	16	16	16
2	2	3	4	6	9	11	9	4	4	9	16	16	16	16	16
2	3	4	5	8	14	13	10	8	11	16	16	16	16	16	16
3	4	6	9	11	17	16	12	16	16	16	16	16	16	16	16
4	6	9	10	13	17	18	15	16	16	16	16	16	16	16	16
8	10	12	14	16	19	19	16	16	16	16	16	16	16	16	16
12	15	15	16	18	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

Продолжение табл. 1																
Камера NIKON's E8800 (EXTRA)																
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Стандартные матрицы JPEG																
16	11	10	16	24	40	51	61	17	18	24	47	99	99	99	99	99
12	12	14	19	26	58	60	55	18	21	26	66	99	99	99	99	99
14	13	16	24	40	57	69	56	24	26	56	99	99	99	99	99	99
14	17	22	29	51	87	80	62	47	66	99	99	99	99	99	99	99
18	22	37	56	68	109	103	77	99	99	99	99	99	99	99	99	99
24	35	55	64	81	104	113	92	99	99	99	99	99	99	99	99	99
49	64	78	87	103	121	120	101	99	99	99	99	99	99	99	99	99
72	92	95	98	112	100	103	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99

На рис. 1 представлены два изображения сверхвысокой четкости, в которых присутствуют мелкоструктурные текстуры, на изображении "Эйфелева башня" к таким структурам относится небо с очень слабыми изменениями на перистых облаках. В изображении "Море" в качестве исследуемой текстуры выбраны участки прибрежной пены.

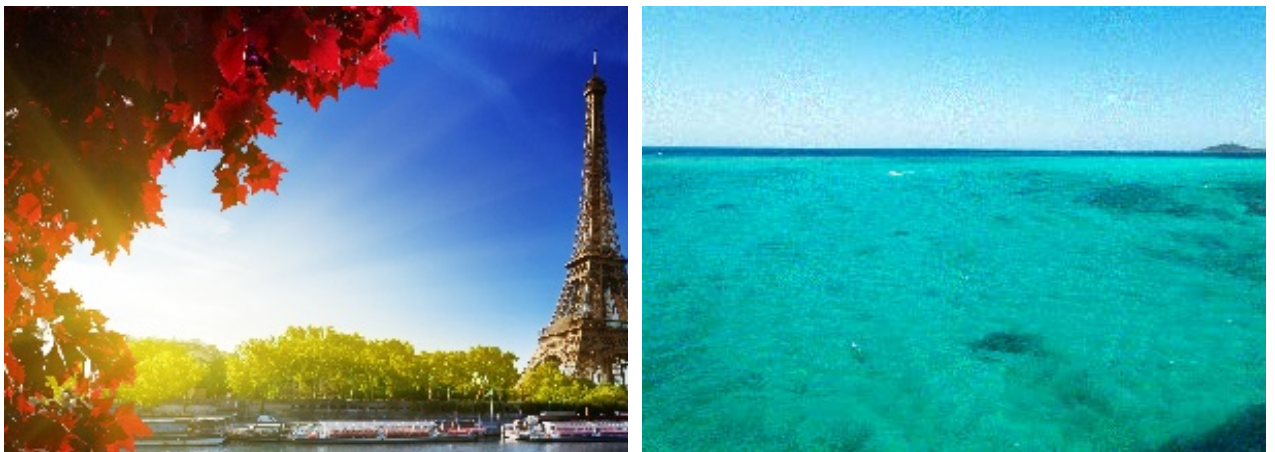


Рис. 1. Исходные изображения "Эйфелева башня" и "Море"

Рис.2 позволяет оценить состав спектра на участках текстур для изображения "Эйфелева башня" в случае использования матриц квантования JPEG standard.

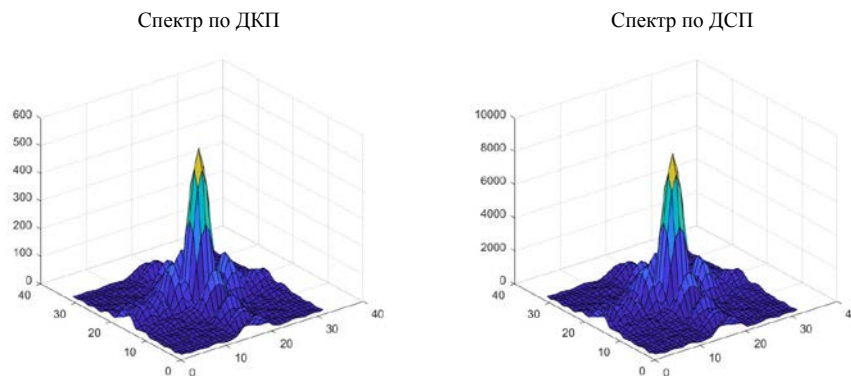


Рис. 2. Спектры по ДКП и ДСП для текстуры "Эйфелева башня"

Оценку качества цифрового изображения можно проводить и объективными методами в параметрах среднеквадратичного отклонения (СКО) между восстановленным и исходным изображением, а также показателем отношения сигнала к шуму на границах или цветовых переходах изображения (EPSNR). В табл. 2 приведены количественные показатели для указанных двух видов преобразований при использовании матриц квантования разных типов [9–10].

Таблица 2

**Зависимость показателей качества от типа преобразования и матрицы квантования**

Таблица квантования	Эйфеля башня		Море	
	DCT EPSNR, dB	DST EPSNR, dB	DCT EPSNR, dB	DST EPSNR, dB
SONY - DSC-N2 (fine)	46.2	45.6	45.1	44.8
Canon EOS 10D (fine)	47.2	46.3	46.1	45.2
Canon PowerShot A700 (superfine)	45.4	46.1	48.2	49.1
NIKON D80 (FINE)	44.9	45.2	47.4	46.6
NIKON - COOLPIX S10 (FINE)	48.2	47.5	46.8	46.5
NIKON - E8800 (EXTRA)	46.9	44.8	45.5	46.3
JPEG standard	43.6	44.2	48.4	45.8

Коэффициент сжатия кодированных изображений зависит также и от исходной длины слов, использованных для хранения исходных изображений. Наиболее распространенная длина слова для каждой из составляющих цветных изображений составляет один байт или 8 бит. Для изображений высокой и сверхвысокой четкости рекомендуется использовать десяти и двенадцати-разрядные слова. Результаты расчета показателей качества и коэффициента сжатия  $K$  при разных длинах слов приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Коэффициенты сжатия в зависимости от длины слова**

Bit	EPSNR	PSNR	K	EPSNR	PSNR	K
Эйфеля башня			Море			
6	36.0	43.8	24	33.5	42.8	29
8	37.7	45.8	21	34.5	44.1	27
10	39.2	47.6	18	35.3	45.1	26
12	40.6	49.3	16	36.1	46.0	23

Зависимость коэффициента сжатия от отношения сигнала к шуму для изображения "Море" представлено на рис. 3.

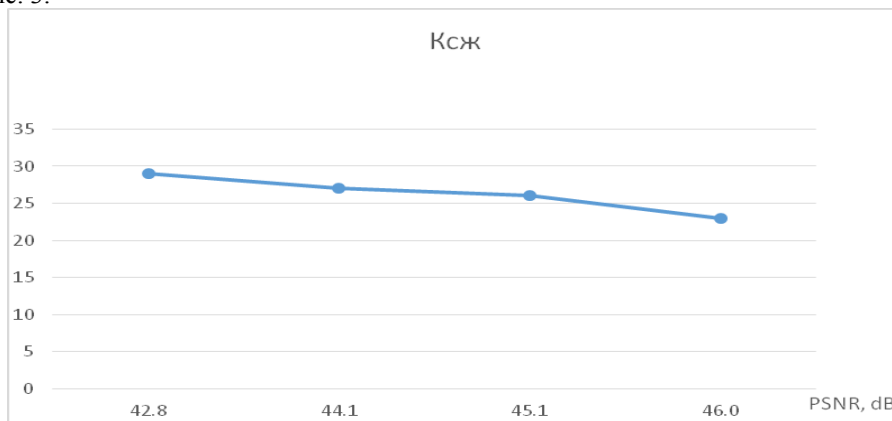


Рис. 3. Зависимость коэффициента сжатия от PSNR

**Выводы**

В работе проведен теоретический анализ и моделирование процесса частотно-зависимого квантования коэффициентов дискретного преобразования Фурье. Сформулированы критерии выбора матриц квантования, обеспечивающих субъективно правильное воспроизведение высокочастотных составляющих мелкоструктурных текстур, Предложена программная модель формирования частотно-зависимого квантования, которая описывает процесс обработки изображений матрицами заданных делителей в спектральной области с последующим обратным спектральным преобразованием для разных значений параметров. Полученные результаты моделирования семи функций квантования показали преимущества использования малых значений делителей матриц квантования, дающего наименьшее СКО и наибольшее отношение сигнала к шуму на яркостных и цветовых переходах в мелкоструктурных текстурах..

**Список использованной литературы**

1. Значения параметров стандартов ТВЧ для производства программ и международного обмена программами Рекомендация МСЭ-R BT.709-6 // ITU-R. –2015.– 7 с.
2. Значения параметров для систем ТСВЧ для производства программ и международного обмена ими. Рекомендация МСЭ-R BT2020-2 // ITU-R. –2015.– 6 с.
3. International Standard ISO/IEC 10918-1 :1994 / Recommendation ITU-T T.81 :1992 Information technology – Digital compression and coding of continuous-tone still images – Requirements and guidelines
4. Recommendation ITU-R BT.1867-0:2010, "Objective perceptual visual quality measurement techniques for broadcasting applications using low definition television in the presence of a reduced bandwidth reference".
5. Recommendation ITU-R BT.1908:2012, Objective video quality measurement techniques for broadcasting applications using HDTV in the presence of a reduced reference signal.
6. Recommendation ITU-T J.144:2004, Recommendation BT, 1908:2012, "Objective perceptual video quality measurement techniques for digital cable television in the presence of a full reference".
7. Recommendation ITU-T J.246:2008, Perceptual visual quality measurement techniques for multimedia services over digital cable television networks in the presence of a reduced bandwidth reference.
8. Recommendation ITU-T J.247: 2008, Objective perceptual multimedia video quality measurement in the presence of a full reference.
9. International Standard ISO/IEC 15444-1 :2016 | Recommendation ITU-T T.800 : 2015 / Recommendation ITU-T T.800: 2015, Information technology – JPEG 2000 image coding system: Core coding system.
10. Gofaizen O. Test signals for assessment image quality in HD and UHD TV video path / Oleg Gofaizen, Olena Osharovska, Mikola Patlayenko, Volodymyr Pyliavskiy // 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS) (5–11 Sept. 2016). – 2016. – P. 42–46; DOI: 10.1109/UWBUSIS.2016.7724147.

UDC 004.412:519.237

S.B. PRYKHODKO, N.V. PRYKHODKO, A.V. MANDRA, A.Y. YAREMA  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding**THE NON-LINEAR REGRESSION EQUATION TO ESTIMATE THE SOFTWARE SIZE OF VB-BASED INFORMATION SYSTEMS**

*The equation, confidence and prediction intervals of multivariate non-linear regression for estimating the software size of VB-based information systems are constructed on the basis of the Johnson multivariate normalizing transformation. Comparison of the constructed equation with the linear and two non-linear regression equations based on the decimal logarithm and the Johnson univariate transformation is performed.*

*Keywords: non-linear regression equation, confidence interval, prediction interval, multivariate normalizing transformation, multivariate non-Gaussian data.*

С.Б. ПРИХОДЬКО, Н.В. ПРИХОДЬКО, А.В. МАНДРА, А.Я. ЯРЕМА  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова**НЕЛІНІЙНЕ РЕГРЕСІЙНЕ РІВНЯННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОЗМІРУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА VB**

*Рівняння, довірчі інтервали і інтервали прогнозування багатовимірної нелінійної регресії для оцінювання розміру програмного забезпечення інформаційних систем на VB побудовані на основі багатовимірної нормалізуючої перетворення Джонсона. Виконано порівняння побудованого рівняння з лінійним та двома нелінійними регресійними рівняннями, що базуються на десятичному логарифмі і одновимірному перетворенні Джонсона.*

*Ключові слова: нелінійне рівняння регресії, довірчий інтервал, інтервал передбачення, багатовимірне нормалізуюче перетворення, багатовимірні негаусовські дані.*

С.Б. ПРИХОДЬКО, Н.В. ПРИХОДЬКО, А.В. МАНДРА, А.Я. ЯРЕМА  
Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова**НЕЛИНЕЙНОЕ РЕГРЕССИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗМЕРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА VB**

*Уравнение, доверительные интервалы и интервалы прогнозирования многомерной нелинейной регрессии для оценки размера программного обеспечения информационных систем на VB построены на основе многомерного нормализующего преобразования Джонсона. Выполнено сравнение построенного уравнения с линейным и двумя нелинейными регрессионными уравнениями, которые базируются на десятичном логарифме и одномерном преобразовании Джонсона.*

*Ключевые слова: нелинейное уравнение регрессии, доверительный интервал, интервал предсказания, многомерное нормализующее преобразование, многомерные негауссовские данные.*

**Problem formulation**

VB (Visual Basic) is one of the programming languages commonly used in information systems. Software size is one of the most important internal metrics of software including software of information systems. The information obtained from estimating the software size are useful for predicting the software development effort by such well-known model as COCOMO II. This leads to the need to develop appropriate models for estimating the software size [1]. The paper [1] proposed the linear regression equations for estimating the software size of some programming languages, including VB, for information systems. The proposed equations are constructed by multiple linear regression analysis on the basis of the metrics that can be measured from class diagram. However, there are four basic assumptions that justify the use of linear regression equations, one of which is normality of the error distribution. But this assumption is valid only in particular cases. This leads to the need to use the non-linear regression equations including for estimating the software size of VB-based information systems.

**Analysis of recent research and publications**

A normalizing transformation is often a good way to construct the equations, confidence and prediction intervals of multiply non-linear regressions [2-8]. According [3] transformations are made for essentially four purposes, two of which are: first, to obtain approximate normality for the distribution of the error term (residuals) or the dependent random variable, second, to transform the response and/or the predictor in such a way that the strength of the linear relationship between new variables (normalized variables) is better than the linear relationship between dependent and independent random variables. Now well-known normalizing transformations are used to

construct the equations, confidence and prediction intervals of non-linear regressions. However, known techniques for constructing equations, confidence and prediction intervals of multivariate non-linear regressions are based on the univariate normalizing transformations, which do not take into account the correlation between random variables in the case of normalization of multivariate non-Gaussian data. This leads to the need to use the multivariate normalizing transformations.

**Purpose of the study**

The purpose of the study is to construct the non-linear regression equation for estimating the software size of VB-based information systems. The software size prediction results by constructed equation should be better in comparison with other regression equations, both linear and nonlinear, primarily on such standard evaluations as the multiple coefficient of determination and mean magnitude of relative error.

**Presentation of the main research material**

We build the equation, confidence and prediction intervals of multivariate non-linear regression for estimating the software size of VB-based systems on the basis of the Johnson multivariate normalizing transformation (the Johnson normalizing translation) with the help of appropriate techniques proposed in [8]. As and in [8] the techniques consist of three steps. In the first step, a set of multivariate non-Gaussian data is normalized using a bijective multivariate normalizing transformation. In the second step, the equation, confidence and prediction intervals of linear regression for the normalized data are built. In the third step, the equations, confidence and prediction intervals of non-linear regressions for multivariate non-Gaussian data are constructed on the basis of the equation, confidence and prediction intervals of linear regression for the normalized data and normalizing transformation.

**The techniques.** Consider bijective multivariate normalizing transformation of non-Gaussian random vector  $\mathbf{P} = \{Y, X_1, X_2, \dots, X_k\}^T$  to Gaussian random vector  $\mathbf{T} = \{Z_Y, Z_1, Z_2, \dots, Z_k\}^T$  is given by

$$\mathbf{T} = \psi(\mathbf{P}) \tag{1}$$

and the inverse transformation for (1)

$$\mathbf{P} = \psi^{-1}(\mathbf{T}). \tag{2}$$

The linear regression equation for normalized data according to (1) will have the form [3]

$$\hat{Z}_Y = \bar{Z}_Y + (\mathbf{Z}_X^+)^T \hat{\mathbf{b}}, \tag{3}$$

where  $\hat{Z}_Y$  is prediction linear regression equation result for values of  $\mathbf{z}_X = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_k\}$ ;  $\mathbf{Z}_X^+$  is the matrix of centered regressors that contains the values  $Z_{1i} - \bar{Z}_1, Z_{2i} - \bar{Z}_2, \dots, Z_{ki} - \bar{Z}_k$ ;  $\hat{\mathbf{b}}$  is estimator for vector of linear regression equation parameters,  $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}^T$ .

The non-linear regression equation will have the form

$$\hat{Y} = \psi_Y^{-1} \left[ \bar{Z}_Y + (\mathbf{Z}_X^+)^T \hat{\mathbf{b}} \right], \tag{4}$$

where  $\psi_Y$  is the first component of vector  $\boldsymbol{\psi} = \{\psi_Y, \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_k\}^T$ .

The technique to build a confidence interval of non-linear regression is based on transformations (1) and (2), equation (3) and a confidence interval of linear regression for normalized data

$$\hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, \nu} S_{Z_Y} \left\{ \frac{1}{N} + (\mathbf{z}_X^+)^T \left[ (\mathbf{Z}_X^+)^T \mathbf{Z}_X^+ \right]^{-1} (\mathbf{z}_X^+) \right\}^{1/2}. \tag{5}$$

where  $t_{\alpha/2, \nu}$  is a quantile of student's  $t$ -distribution with  $\nu$  degrees of freedom and  $\alpha/2$  significance level;

$(\mathbf{z}_X^+)^T$  is one of the rows of  $\mathbf{Z}_X^+$ ;  $S_{Z_Y}^2 = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^N (Z_{Y_i} - \hat{Z}_{Y_i})^2$ ,  $\nu = N - k - 1$ ;  $(\mathbf{Z}_X^+)^T \mathbf{Z}_X^+$  is the  $k \times k$  matrix

$$\left(\mathbf{Z}_X^+\right)^T \mathbf{Z}_X^+ = \begin{pmatrix} S_{Z_1Z_1} & S_{Z_1Z_2} & \dots & S_{Z_1Z_k} \\ S_{Z_1Z_2} & S_{Z_2Z_2} & \dots & S_{Z_2Z_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{Z_1Z_k} & S_{Z_2Z_k} & \dots & S_{Z_kZ_k} \end{pmatrix},$$

where  $S_{Z_qZ_r} = \sum_{i=1}^N [Z_{q_i} - \bar{Z}_q][Z_{r_i} - \bar{Z}_r]$ ,  $q, r = 1, 2, \dots, k$ .

The confidence interval for non-linear regression will have the form

$$\Psi_Y^{-1} \left( \hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, \nu} S_{Z_Y} \left\{ \frac{1}{N} + \left(\mathbf{z}_X^+\right)^T \left[ \left(\mathbf{Z}_X^+\right)^T \mathbf{Z}_X^+ \right]^{-1} \left(\mathbf{z}_X^+\right) \right\}^{1/2} \right). \tag{6}$$

The technique to build a prediction interval is based on multivariate transformation (1), the inverse transformation (2), linear regression equation for normalized data (3) and a prediction interval for normalized data

$$\hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, \nu} S_{Z_Y} \left\{ 1 + \frac{1}{N} + \left(\mathbf{z}_X^+\right)^T \left[ \left(\mathbf{Z}_X^+\right)^T \mathbf{Z}_X^+ \right]^{-1} \left(\mathbf{z}_X^+\right) \right\}^{1/2}. \tag{7}$$

The prediction interval for non-linear regression will have the form

$$\Psi_Y^{-1} \left( \hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, \nu} S_{Z_Y} \left\{ 1 + \frac{1}{N} + \left(\mathbf{z}_X^+\right)^T \left[ \left(\mathbf{Z}_X^+\right)^T \mathbf{Z}_X^+ \right]^{-1} \left(\mathbf{z}_X^+\right) \right\}^{1/2} \right). \tag{8}$$

The equations (4), formulas (6) and (8) are used for constructing the equations, confidence and prediction intervals of non-linear regressions for multivariate non-Gaussian data.

**The Johnson normalizing translation.** For normalizing the multivariate non-Gaussian data, we use the Johnson translation system. In our case the Johnson normalizing translation is given by

$$\mathbf{T} = \boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\eta} \mathbf{h} \left[ \boldsymbol{\lambda}^{-1} (\mathbf{P} - \boldsymbol{\varphi}) \right] \sim N_m(\mathbf{0}_m, \boldsymbol{\Sigma}), \tag{9}$$

where  $\boldsymbol{\gamma}$ ,  $\boldsymbol{\eta}$ ,  $\boldsymbol{\varphi}$  and  $\boldsymbol{\lambda}$  are parameters of the Johnson normalizing translation;  $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_Y, \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k)^T$ ;  $\boldsymbol{\eta} = \text{diag}(\eta_Y, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_k)$ ;  $\boldsymbol{\lambda} = \text{diag}(\lambda_Y, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$ ;  $\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_Y, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k)^T$ ;  $\mathbf{h}[(y_Y, y_1, \dots, y_k)] = \{h_Y(y_Y), h_1(y_1), \dots, h_k(y_k)\}^T$ ;  $h_i(\cdot)$  is one of the translation functions

$$h = \begin{cases} \ln(y), & \text{for } S_L \text{ (log normal) family;} \\ \ln[y/(1-y)], & \text{for } S_B \text{ (bounded) family;} \\ \text{Arsh}(y), & \text{for } S_U \text{ (unbounded) family;} \\ y & \text{for } S_N \text{ (normal) family;} \end{cases} \tag{10}$$

Here  $y = (X - \varphi)/\lambda$ ;  $\text{Arsh}(y) = \ln\left(y + \sqrt{y^2 + 1}\right)$ . In our case  $X$  equals  $Y$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  or  $X_3$  respectively.

**The equation, confidence and prediction intervals of non-linear regression to estimate the software size of VB-based information systems.** The equation, confidence and prediction intervals of non-linear regression to estimate the software size of VB-based information systems are constructed on the basis of the Johnson multivariate



normalizing transformation for the four-dimensional non-Gaussian data set: actual software size in the thousand lines of code (KLOC)  $Y$ , the total number of classes  $X_1$ , the total number of relationships  $X_2$  and the average number of attributes per class  $X_3$ , in conceptual data model from 32 information systems developed using the VB programming language with SQL. Table I contains the data from [1] on four metrics of software for 32 VB-based systems in the industry.

Table 1

The data and prediction result by regression equations for 32 VB-based systems

No	Y	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Linear regression		Non-linear regression			
					$\hat{Y}$	RME	univariate transformation		multivariate transformation	
							$\hat{Y}$	RME	$\hat{Y}$	RME
1	37.54	27	8	8	37.033	0.0135	22.907	0.3898	31.405	0.1634
2	14.723	8	6	25.375	14.083	0.0435	14.891	0.0114	14.810	0.0059
3	24.667	12	10	16.917	21.452	0.1304	20.952	0.1506	22.070	0.1053
4	42.1	19	25	16.526	47.831	0.1361	47.723	0.1336	44.179	0.0494
5	87.23	35	38	8.343	81.900	0.0611	87.925	0.0080	86.198	0.0118
6	31.445	14	21	6.214	33.256	0.0576	33.644	0.0699	31.760	0.0100
7	67.04	35	27	16.829	72.155	0.0763	73.476	0.0960	75.467	0.1257
8	30.79	17	20	6.176	36.239	0.1770	35.208	0.1435	34.930	0.1345
9	22.402	13	14	5.769	23.864	0.0652	24.419	0.0900	25.200	0.1249
10	69.713	28	31	9.571	64.787	0.0707	67.247	0.0354	64.601	0.0733
11	16.17	6	9	27.333	15.321	0.0525	15.682	0.0302	16.168	0.0001
12	90.854	37	39	21.27	89.791	0.0117	90.836	0.0002	90.824	0.0003
13	64.35	27	33	5.481	64.393	0.0007	67.280	0.0455	63.865	0.0075
14	27.076	13	16	8	26.808	0.0099	27.530	0.0167	27.254	0.0066
15	20.933	10	10	6.5	15.467	0.2611	19.159	0.0847	19.812	0.0535
16	40.341	22	20	5.818	42.996	0.0658	39.299	0.0258	41.355	0.0251
17	37.54	27	8	8	37.033	0.0135	22.907	0.3898	31.405	0.1634
18	14.723	8	6	25.375	14.083	0.0435	14.891	0.0114	14.810	0.0059
19	24.667	12	10	16.917	21.452	0.1304	20.952	0.1506	22.070	0.1053
20	42.1	19	25	16.526	47.831	0.1361	47.723	0.1336	44.179	0.0494
21	87.23	35	38	8.343	81.900	0.0611	87.925	0.0080	86.198	0.0118
22	31.445	14	21	6.214	33.256	0.0576	33.644	0.0699	31.760	0.0100
23	67.04	35	27	16.829	72.155	0.0763	73.476	0.0960	75.467	0.1257
24	30.79	17	20	6.176	36.239	0.1770	35.208	0.1435	34.930	0.1345
25	22.402	13	14	5.769	23.864	0.0652	24.419	0.0900	25.200	0.1249
26	69.713	28	31	9.571	64.787	0.0707	67.247	0.0354	64.601	0.0733
27	16.17	6	9	27.333	15.321	0.0525	15.682	0.0302	16.168	0.0001
28	90.854	37	39	21.27	89.791	0.0117	90.836	0.0002	90.824	0.0003
29	64.35	27	33	5.481	64.393	0.0007	67.280	0.0455	63.865	0.0075
30	27.076	13	16	8	26.808	0.0099	27.530	0.0167	27.254	0.0066
31	20.933	10	10	6.5	15.467	0.2611	19.159	0.0847	19.812	0.0535
32	40.341	22	20	5.818	42.996	0.0658	39.299	0.0258	41.355	0.0251

For detecting the outliers in the data from Table 1 we use the technique based on multivariate normalizing transformations and the squared Mahalanobis distance [9]. There are no outliers in the data from Table I for 0.005 significance level and the Johnson multivariate transformation (9) for  $S_B$  family.

Parameters of the multivariate transformation (9) for  $S_B$  family were estimated by the maximum likelihood method. Estimators for parameters of the transformation (9) are:  $\hat{\gamma}_Y = 0.3176$ ,  $\hat{\gamma}_1 = 0.112778$ ,  $\hat{\gamma}_2 = 0.11510$ ,  $\hat{\gamma}_3 = 0.498667$ ,  $\hat{\eta}_Y = 0.46211$ ,  $\hat{\eta}_1 = 0.581163$ ,  $\hat{\eta}_2 = 0.386574$ ,  $\hat{\eta}_3 = 0.37802$ ,  $\hat{\phi}_Y = 13.9525$ ,  $\hat{\phi}_1 = 4.9519$ ,  $\hat{\phi}_2 = 5.90$ ,  $\hat{\phi}_3 = 5.381$ ,  $\hat{\lambda}_Y = 77.7976$ ,  $\hat{\lambda}_1 = 33.3568$ ,  $\hat{\lambda}_2 = 33.20$  and  $\hat{\lambda}_3 = 22.052$ . The sample covariance matrix  $S_N$  of the  $\mathbf{T}$  is used as the approximate moment-matching estimator of  $\Sigma$

$$S_N = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.9389 & 0.9354 & -0.2069 \\ 0.9389 & 1.0000 & 0.7858 & -0.2495 \\ 0.9354 & 0.7858 & 1.0000 & -0.2036 \\ -0.2069 & -0.2495 & -0.2036 & 1.0000 \end{pmatrix}.$$

After normalizing the non-Gaussian data by the multivariate transformation (9) for  $S_B$  family the linear regression equation (3) is built for normalized data

$$\hat{Z}_Y = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 Z_1 + \hat{b}_2 Z_2 + \hat{b}_3 Z_3. \tag{11}$$

Parameters of the linear regression equation (11) were estimated by the least square method. Estimators for parameters of the equation (11) are:  $\hat{b}_0 = -1.07 \cdot 10^{-4}$ ,  $\hat{b}_1 = 0.52447$ ,  $\hat{b}_2 = 0.54906$ ,  $\hat{b}_3 = 0.03614$ .

After that the non-linear regression equation (4) is built

$$\hat{Y} = \hat{\phi}_Y + \hat{\lambda}_Y \left[ 1 + e^{-\frac{(\hat{Z}_Y - \hat{\gamma}_Y)}{\hat{\eta}_Y}} \right]^{-1}. \tag{12}$$

where  $\hat{Z}_Y$  is prediction result by the equation (11),  $Z_j = \gamma_j + \eta_j \ln \left[ \frac{(X_j - \phi_j)}{(\phi_j + \lambda_j - X_j)} \right]$ ,  $\phi_j < X_j < \phi_j + \lambda_j$ ,  $j = 1, 2, 3$ .

The prediction results by equation (12) for values of components of vector  $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3\}$  from Table 1 and values of magnitude of relative error MRE are shown in the Table I for two cases: the Johnson univariate and multivariate normalizing transformations. Table 1 also contains the prediction results by linear regression equation for values of components of vector  $\mathbf{X}$  from Table 1 and MRE values.

For univariate normalizing transformations (10) of  $S_B$  family the estimators for parameters are such:  $\hat{\gamma}_Y = 0.25082$ ,  $\hat{\gamma}_1 = 0.067046$ ,  $\hat{\gamma}_2 = 0.11745$ ,  $\hat{\gamma}_3 = 0.505658$ ,  $\hat{\eta}_Y = 0.354337$ ,  $\hat{\eta}_1 = 0.403719$ ,  $\hat{\eta}_2 = 0.393218$ ,  $\hat{\eta}_3 = 0.38007$ ,  $\hat{\phi}_Y = 14.623$ ,  $\hat{\phi}_1 = 5.90$ ,  $\hat{\phi}_2 = 5.90$ ,  $\hat{\phi}_3 = 5.381$ ,  $\hat{\lambda}_Y = 76.331$ ,  $\hat{\lambda}_1 = 31.20$ ,  $\hat{\lambda}_2 = 33.20$  and  $\hat{\lambda}_3 = 22.052$ . In the case of univariate normalizing transformations the estimators for parameters of the equation (11) are such:  $\hat{b}_0 = 1.4 \cdot 10^{-5}$ ,  $\hat{b}_1 = 0.38440$ ,  $\hat{b}_2 = 0.66171$  and  $\hat{b}_3 = 0.046502$ .

Also the non-linear regression equation (4) is built by the decimal logarithm transformation

$$\hat{Y} = 10^{b_0} X_1^{b_1} X_2^{b_2} X_3^{b_3}. \tag{13}$$

where the estimators for parameters of the equation (13) are:  $\hat{b}_0 = 0.09412$ ,  $\hat{b}_1 = 0.715453$ ,  $\hat{b}_2 = 0.374691$  and  $\hat{b}_3 = 0.110754$ .

The values of multiple coefficient of determination  $R^2$ , mean magnitude of relative error MMRE and percentage of prediction PRED(0.25) equal respectively 0.9789, 0.0771 and 0.9375 for linear regression equation, equal respectively 0.9698, 0.0736 and 1 for the equation (13), and equal respectively 0.9626, 0.0832 and 0.9375 for the equation (12) for the Johnson univariate transformation. The values of  $R^2$ , MMRE and PRED(0.25) are better for the equation (12) for the Johnson multivariate transformation, in comparison with linear regression equation, equation (13) and equation (12) with parameters for the Johnson univariate transformation, and are 0.9813, 0.0561 and 1. Only the values of PRED(0.25) are the same for both the equation (12) for the Johnson multivariate transformation and equation (13).

The confidence and prediction intervals of non-linear regression are defined by (6) and (8) respectively for the data from Table 1. The widths of the confidence interval of non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are less than for linear regression for the twenty-two rows of data: 1-3, 5-7, 9, 11, 12, 14, 15, 17-19, 21-23, 25, 27, 28, 30 and 31. Also the widths of the confidence interval of non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are less for more data rows than for non-linear regressions following the univariate transformations, both decimal logarithm and the Johnson. The widths of the confidence interval of non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are less than following the

decimal logarithm univariate transformation for the twenty-two rows of data: 1-5, 7, 10-13, 15, 17-21, 23, 26-29 and 31. And ones are less than following the Johnson univariate transformation for the twenty-five rows of data: 3-11, 13-16, 19-27, 29-32. Approximately the same results are obtained for the prediction intervals of regressions.

Following [10] multivariate kurtosis  $\beta_2$  is estimated for the data on metrics of software from Table 1 and the normalized data on the basis of the decimal logarithm transformation, the Johnson univariate and multivariate transformations for  $S_B$  family. It is known that  $\beta_2 = m(m+2)$  holds under multivariate normality. The given equality is a necessary condition for multivariate normality. In our case  $\beta_2 = 24$ . The estimators of multivariate kurtosis equal 21.27, 22.03, 33.88 and 22.92 for the data from Table 1, the normalized data on the basis of the decimal logarithm transformation, the Johnson univariate and multivariate transformations respectively. The values of these estimators indicate that the necessary condition for multivariate normality is practically performed for the normalized data on the basis of the decimal logarithm transformation and the Johnson multivariate transformation, it does not hold for other data. Note that in our case, the poor normalization of multivariate non-Gaussian data using the Johnson univariate transformation leads to an increase in the widths of the confidence and prediction intervals of non-linear regression for a larger number of data rows compared to both the Johnson multivariate transformation and the decimal logarithm transformation.

### Conclusions

The non-linear regression equation to estimate the software size of VB-based information systems is improved on the basis of the Johnson multivariate transformation for  $S_B$  family. This equation, in comparison with other regression equations (both linear and nonlinear), has a larger multiple coefficient of determination and a smaller value of MMRE.

When building the equations, confidence and prediction intervals of non-linear regressions for multivariate non-Gaussian data to estimate the software size of VB-based systems, one should use multivariate normalizing transformations.

Usually poor normalization of multivariate non-Gaussian data or application of univariate transformations instead of multivariate ones to normalize such data may lead to increase of width of the confidence and prediction intervals of regressions, both linear and non-linear, to estimate the software size of VB-based systems.

In the future, we intend to try other multivariate normalizing transformations and non-Gaussian data sets.

### References

1. Hee Beng Kuan Tan, Yuan Zhao and Hongyu Zhang, "Estimating LOC for information systems from their conceptual data models", in Proceedings of the 28th International Conference on Software Engineering (ICSE '06), May 20-28, 2006, Shanghai, China, PP. 321-330.
2. 1. D.M. Bates, and D.G. Watts. Nonlinear Regression Analysis and Its Applications. Wiley, 1988, 384 p.
3. T.P. Ryan. Modern regression methods. Wiley, 1997, 529 p.
4. G.A.F. Seber, and C.J. Wild. Nonlinear Regression. John Wiley & Sons, Inc., 2003, 792 p.
5. R.A. Johnson, and D.W. Wichern. Applied Multivariate Statistical Analysis. Pearson Prentice Hall, 2007, 800 p.
6. Iain Pardoe. Applied regression modelling. Wiley, 2012, 325 p.
7. S Chatterjee, and J.S. Simonoff. Handbook of Regression Analysis. John Wiley & Sons, Inc., 2013, 236 p.
8. S.B. Prykhodko, "Developing the software defect prediction models using regression analysis based on normalizing transformations" in "Modern problems in testing of the applied software" (PTTAS-2016), Abstracts of the Research and Practice Seminar, Poltava, Ukraine, May 25-26, 2016, PP. 6-7.
9. S. Prykhodko, N. Prykhodko, L. Makarova, and K. Pugachenko, "Detecting Outliers in Multivariate Non-Gaussian Data on the basis of Normalizing Transformations", in Proceedings of the 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) "Celebrating 25 Years of IEEE Ukraine Section", May 29 – June 2, 2017, Kyiv, Ukraine, 2017, PP. 846-849.
10. K.V. Mardia, "Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications", Biometrika, 57, PP. 519–530, 1970.

УДК 004.925.3

С.И. ВЯТКИН

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

А.Н. РОМАНЮК, Л.А. САВИЦКАЯ, Т.И. ТРОЯНОВСКАЯ

Винницкий национальный технический университет

## МЕТОД ИЗЛУЧАТЕЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

*Предложен метод излучательности, реализованный на параллельной архитектуре графических акселераторов. Предложено значения излучения вычислять непосредственно в текстурах и использовать для рендеринга. Показано, что расчет форм-фактора целесообразно выполнять на SIMD архитектуре GPU, потому что каждый форм-фактор независим и не имеет ветвей и условных переходов. С помощью вершинной программы преобразования вершин определяется видимость со стереографической проекцией. Для этого требуется всего один проход по геометрии. Приведены результаты тестирования.*

*Ключевые слова:* излучательность, параллельные вычисления, форм-фактор, графические акселераторы.

С.І. ВЯТКІН

Институт автоматизації та електрометрії СВ РАН

О.Н. РОМАНЮК, Л.А. САВИЦЬКА, Т.І. ТРОЯНОВСЬКА

Вінницький національний технічний університет

## МЕТОД ВИПРОМІНЮВАНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФІЧНИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ

*Запропоновано метод випромінюваності, реалізований на паралельній архітектурі графічних акселераторів. Запропоновано значення випромінювання обчислювати безпосередньо в структурах і використовувати для рендеринга. Показано, що розрахунок форм-фактора доцільно виконувати на SIMD архітектурі GPU, тому що кожний форм-фактор незалежний і не має розгалужень і умовних переходів. Наведено результати тестування. За допомогою вершинної програми перетворення вершин визначається видимість із стереографічною проекцією. Для цього потрібний всього один проход по геометрії.*

*Ключові слова:* випромінюваність, паралельні обчислення, форм-фактор, графічні акселератори.

S.I. VYATKIN

Institute of Automation and Electrometry SB RAS

O.N. ROMANYUK, L.A. SAVYTSKA, T.I. TROIANOVSKA

Vinnytsia National Technical University

## METHOD OF EMISSIVITY BASED ON GRAPHICS ACCELERATORS

*When calculating diffuse illumination of surfaces, it is necessary to take into account not only direct light sources, but also secondary or reflected diffuse illumination. Diffuse reflection matrix is a classical technology for modeling light propagation in diffuse scenes. In the classical formulation, radiosity requires the solution of a set of linear equations called the equation form factor. These equations describe the transfer of energy between elements in a scene. Storing these equations requires space  $O(N^2)$ , which is very much for large scenes. In the classical approach, the surfaces of all objects in a three-dimensional scene are split into flat patches. The size of each patch should be such that the density of the light energy intensity distribution within its limits is a constant value. The assumption is that the light is scattered uniformly in all directions. This method is called the restricted elements method. Under its own surface energy refers to "own the issue" patch and under bring energy illumination, indirect diffuse all surrounding objects. Lambert's law calculates the calculation of energy from direct lighting. Assumptions are needed to account for the secondary diffuse reflection of the environment. The basic radiative equations calculate the radiosity value of this patch as the sum of the contributions of the radiosity value of all patches, that is, on the contrary, light is not collected, but emitted from this patch in the direction of the surrounding surfaces. This paper presents the method of emissivity based on graphics accelerators. The method of progressive refinement of estimates adapted to graphics processing units is proposed. There are several advantages to performing all calculations on graphics accelerators (GPUs). One of them is that the radiation values can be calculated directly in textures and used directly for rendering. Form factor calculation, which is a fundamental operation and is well parallelized. The form factor calculation is performed well on the SIMD architecture of the GPU fragment processor because each form factor is independent and has no branches and conditional transitions. Another advantage is that the performance of the graphics hardware is greater than the CPU; this allows increase the complexity of the model and keep the interactive rendering mode.*

*Keywords:* radiosity, parallel computing, form-factor, graphic accelerators.

### Постановка проблеми

На современном этапе развития компьютерной графики актуальным становится вопрос о повышении реалистичности формирования графических сцен [1–3], поскольку мощности видокарт достаточно для поддержания сложных вычислений за приемлемое время.

Для повышения реалистичности часто используют метод излучательности (radiosity), согласно которого рассчитывают вторичные отражения лучей света от одних поверхностей объектов к другим, а также от окружающей среды к объектам.

Каждый объект рассматривается как источник излучения для освещения всех других объектов. Метод использует уравнения, заимствованные из области теплопередачи. Он требует значительно большей вычислительной мощности, чем альтернативный метод трассировки лучей.

### Анализ последних исследований и публикаций

При расчете диффузного освещения [1] поверхностей необходимо учитывать не только освещение прямыми источниками света, но и вторичное, или отраженное диффузное освещение [4]. Матрица диффузного отражения – это классическая технология для моделирования распространения света в диффузных сценах [5].

В данной работе предложен метод излучательности на базе графических ускорителей. Существует несколько преимуществ для выполнения всех вычислений на графических акселераторах (GPU). Одно из них заключается в том, что значения излучения могут быть вычислены непосредственно в текстурах и использоваться непосредственно для рендеринга.

Расчет форм-фактора хорошо выполняется на SIMD архитектуре процессора фрагмента GPU, потому что каждый форм-фактор независим и не имеет ветвей и условных переходов.

Другое преимущество состоит в том, что производительность графического оборудования больше, чем центрального процессора (CPU). Это позволяет увеличить сложность модели и сохранить интерактивный режим рендеринга.

В классической формулировке, излучательность (radiosity) требует решения набора линейных уравнений, называемых форм-фактором уравнений. Эти уравнения описывают передачу энергии между элементами в сцене. Хранение этих уравнений требуют пространства  $O(N^2)$ , что очень много для больших сцен. Существует множество методов для решения этих уравнений.

Метод [4], вычисляет эти форм-факторы во время трассировки, и таким образом, избегает любого явного хранения. Исчерпывающее объяснение диффузного отражения можно найти в работе [3], где с помощью метода "hemі-cube" вычисляется видимость.

Расчет форм-факторов, который является фундаментальной операцией и хорошо распараллеливается описан в [7–9].

В классическом подходе поверхности всех объектов трехмерной сцены разбиваются на плоские патчи (patch) [3]. Размер каждого патча должен быть таким, чтобы плотность распределения интенсивности световой энергии в его пределах была постоянной величиной (константой).

Вводится допущение, что свет рассеивается равномерно по всем направлениям. Такой метод получил название метода ограниченных элементов. Под собственной энергией поверхности понимается "собственная эмиссия" патча, а под приносимой энергией – освещение, отраженное диффузно всеми окружающими объектами. Вычисление энергии от прямого освещения рассчитывается по закону Ламберта [1]. Чтобы учесть вторичное диффузное отражение окружения, необходимы допущения. Основное уравнение расчета излучательности имеет следующий вид:

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n B_j F_{ij},$$

где  $B_i$  – излучательность  $i$ -ого патча;  $E_i$  – диффузное отражение света от прямого источника;  $\rho_i$  – коэффициент, характеризующий свойства диффузного отражения поверхности, которой принадлежит патч;  $B_j$  – излучательность  $j$ -ого патча;  $F_{ij}$  – форм-фактор, определяющий часть излучательности  $j$ -ого патча, дошедшей до  $i$ -ого патча;  $n$  – количество всех патчей трехмерной сцены.

Основные уравнения излучательности рассчитывают излучательность данного патча как сумму вкладов излучательности всех патчей, то есть наоборот – не собирается свет, а излучается свет из данного патча в направлении окружающих поверхностей:

$$\Delta B_i = \frac{1}{A_i} \cdot \rho_i B_l F_{li} A_l,$$

где  $\Delta B_i$  – вклад в излучательность  $i$ -ого патча от первого патча;  $A_l$  – площадь первого патча;  $A_i$  – площадь остальных патчей;  $\rho_i$  – коэффициент, характеризующий свойства диффузного отражения поверхности, которой принадлежит  $i$ -ый патч;  $B_l$  – излучательность  $l$ -ого патча;  $F_{ij}$  – форм-факторы первого патча в количестве  $n$ ;  $n$  – количество всех патчей трехмерной сцены.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Для всех патчей излучательности определяются освещенностью источниками света по закону Ламберта и собственным излучением. Далее производится упорядочивание патчей в порядке убывания.
2. Находится наиболее освещенный патч, и вычисляются вклады первого патча в излучательности всех остальных патчей. Вычисленные вклады суммируются с излучательностью патчей. Вклад первого патча в излучательность второго патча прибавляется к излучательности второго патча и суммируется со значением переменной, не излученной излучательности второго патча.
3. Далее выполняются итерации, пока значение максимального вклада патча не станет меньше заданной величины.

### Цель исследования

Предложить модификацию метода излучательности, которая позволяет увеличить производительность формирования графических сцен и обеспечить интерактивный режим рендеринга.

### Изложение основного материала исследования

В данной работе реализован модифицированный метод прогрессивной излучательности на графическом оборудовании.

Излучательность и остаточная энергия хранятся в виде текстур, отображаемых на полигонах сцены.

Вместо деления в геометрии, как и в классической излучательности, используются текстелы как элементы системы излучения, как описано в [10]. Для этого инвертируются вычисления с помощью итерации для входящих полигонов и тестируется каждый элемент на видимость. Такой подход эффективно использует вычислительные мощности параллельной архитектуры SIMD графических акселераторов.

SIMD-принцип компьютерных вычислений, позволяющий обеспечить параллелизм на уровне данных. SIMD-архитектура предполагает наличие одного командного процессора, и нескольких модулей обработки данных, называемых процессорными элементами. Управляющий модуль принимает, анализирует и выполняет команды. Если в команде встречаются данные, контроллер рассылает на все процессорные элементы команду, и эта команда выполняется на нескольких или на всех процессорных элементах.

Для определения видимости используется расширенная форма метода [10]. С помощью вершинной программы преобразования вершин, определяется видимость со стереографической проекцией. Для этого требуется только один проход по геометрии, по мере необходимости, а не пять как hemi-cube [10].

Стереографическая карта сцены отрисовывается и хранится в виде буфера элементов текстуры. Далее каждый полигон, который мог бы получить энергию, рендерится в буфер кадров с тем же разрешением, что и связанная с ним излучательная текстура. Это позволяет фрагменту программы работать непосредственно с диффузным отражением текстелов с фрагментами буфера кадра.

Использованная стереографическая проекция состоит из векторной нормализации для поиска в буфере элементов. Если идентификатор элемента буфера совпадает с идентификатором этого текстела полигонов, то этот текстель объявляется видимым. Этот процесс напоминает проекционное отображение теней. Используются запросы на видимость для сокращения числа полученных полигонов, которые должны быть протестированы. В течение теста на видимость запрос инициируется для каждого полигона. Только для тех полигонов, которые проходят тест на видимость, делается выборка из текстуры.

Формула вычисления форм-фактора выглядит следующим образом [11]:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \cdot \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{\pi r^2} HID_{ij} dA_j dA_i$$

где  $F_{ij}$  – форм-фактор  $i$ -ого патча;  $A_i$  – площадь  $i$ -ого патча;  $A_j$  – площадь  $j$ -ого патча;  $HID_{ij}$  – функция видимости патчей;  $r$  – расстояние между патчами;  $\theta_i, \theta_j$  – углы между нормальными патчей и отрезком, который их соединяет.

Для вычисления интеграла используется численный метод и упрощение [12, 13]:

$$dF_{A_j \rightarrow dA_i} = \frac{dA_i}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i}{\pi r_i^2 + \frac{A_j}{m}}$$

Это приближение вычисляет форм-фактор между конечной площадью элемента  $j$  и дифференциальной площадью элемента  $d_i$ , разделив на  $m$  ориентированных дисков.

Уравнения форм-фактора хорошо обрабатываются на архитектуре SIMD, таких как процессор фрагментов GPU, потому что нет зависимостей данных и ветвления.

На рис. 1 приведен пример реализации предложенного метода излучательности.

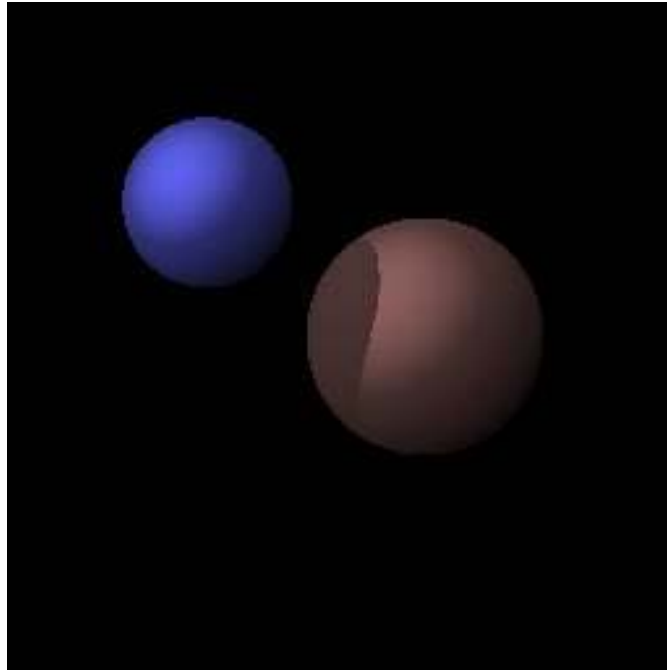


Рис. 1. Реализация теней методом излучательности

Тестирование производилось на компьютере с процессором Intel Core2 CPU E8400 3.0 GHz, и графическим акселератором GTX 470. Тестирование показало, что время формирования графических сцен достаточно для реализации интерактивного режима. Так, для сцен, состоящих из миллиона текстелей, на проецирование потребовалась 1 миллисекунда, на вычисление форм-фактора – 2 миллисекунды.

#### Выводы

При использовании метода излучательности можно находить диффузную освещенность, тени, переносить и смешивать отраженный свет с одних поверхностей на другие. При этом вычисление освещенности не зависит от положения наблюдателя.

Учитывая большую вычислительную сложность метода излучательности и возможность распараллеливания вычислительного процесса, предложено использовать SIMD архитектуру графического процессора.

Предложено значения излучения вычислять непосредственно в текстурах и использовать для рендеринга. Показано, что расчет форм-фактора целесообразно выполнять на SIMD архитектуре GPU, потому что каждый форм-фактор независим и не имеет ветвей и условных переходов. С помощью вершинной программы преобразования вершин определяется видимость со стереографической проекцией. Для этого требуется всего один проход по геометрии

Реализация метода GPU позволила увеличить производительность формирования графических сцен и обеспечить интерактивный режим рендеринга.

#### Список использованной литературы

1. Романюк О. Н. Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів. Монографія / О.Н. Романюк, А.В. Чорний. – Вінниця : УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006. – 190 с.
2. Романюк О.Н. Класифікація графічних відеоадаптерів / О.Н. Романюк, Р.Ю. Довгалюк, С.В. Олійник // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2011. – Вип. 14. – С. 211-215.

3. Маслов В.П. Сучасні тенденції розвитку тримірного рендерингу / В.П. Маслов, П.М. Кузьменко, Є.В. Риндич // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2012. – № 3 (59). – С. 155-158.
4. Cohen M.F. Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation / M.F. Cohen , S.E. Chen., J.R. Wallace., D.P. Greenberg // In Proc. of SIGGRAPH'88, 1988. – P. 45-84.
5. Goral C.M. Modelling the Interaction of Light between Diffuse Surfaces / C.M. Goral, K.E. Torrance, D.P. Greenberg // In Proc. of SIGGRAPH'84, 1984. P. 213-222.
6. Cohen M.F. The Hemi-Cube: A Radiosity Solution for Complex Environments / M.F. Cohen, D. P. Greenberg // In Proc. of SIGGRAPH'85, 1985. – Vol. 19. – № 3. – P. 31-40,
7. Baum D.R. Real Time Radiosity through Parallel Processing and Hardware Acceleration / D.R. Baum, J.M. Winget // In Proc. of Symposium on Interactive 3D Graphics, 1990. – P. 67-75.
8. Varshney A. An Environment Projection Approach to Radiosity for Mesh-Connected Computers / A. Varshney, J.F. Prins // In Eurographics Workshop on Rendering, 1992. P. 271-281.
9. Funkhouser T.A. Coarse-Grained Parallelism for Hierarchical Radiosity using Group Iterative Methods / T.A. Funkhouser // In Proc. of SIGGRAPH'96, 1996. – P. 343-352.
10. Heckbert P.S. Adaptive Radiosity Textures for Bidirectional Ray Tracing / P.S. Heckbert // In Proc. of SIGGRAPH'90, 1990. – P. 145-154.
11. Chapter 5: Radiosity P. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://webcourse.cs.technion.ac.il/236373/Winter2013-2014/ho/WCFiles/05-Radiosity.pdf>
12. John R Wallace. A ray tracing algorithm for progressive radiosity / Wallace John R, Elmquist Kells A., Haines A. Eric // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. 1989. – Vol. 23. – № 3. – P. 315-324.
13. Cohen Michael F. Radiosity and Realistic Image Synthesis / Michael F. Cohen and R. Wallace John. – Cambridge: Academic Press, 1993. – 383 p.



УДК 004

О.О. САФАРОВ

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

### АЛГОРИТМ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ КАРТ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ

У даній роботі розглянуто особливості процедури підвищення якості та деталізації зображень вегетаційних індексів, отриманих на основі фотограмметричних даних. Запропоновано алгоритм паншарпенінга, що ґрунтується на інтерполяційних операціях над початковими зображеннями та обчисленням ваг для кожного пікселя зображення. Для паншарпенінга використовуються зображення індексу та панхроматичні зображення високої роздільної здатності. Експерименти для індексу NDVI підтвердили застосовність даного алгоритму та переважачу ефективність бікубічної інтерполяції.

Ключові слова: паншарпенінг, вегетаційні індекси, фотограмметрія, бікубічна інтерполяція

А.А. САФАРОВ

Днепроvский национальный университет имени Олеся Гончара

### АЛГОРИТМ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ КАРТ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ

В данной работе рассмотрены особенности процедуры повышения качества и детализации изображений вегетационных индексов, полученных на основе фотограмметрических данных. Предложен алгоритм паншарпенинга, основанный на интерполяционных операциях над начальными изображениями и вычислением весов для каждого пикселя изображения. Для паншарпенинга используются изображения индекса и панхроматические изображения высокого разрешения. Эксперименты для индекса NDVI подтвердили применимость данного алгоритма и преобладающую эффективность бикубической интерполяции.

Ключевые слова: паншарпенинг, вегетационные индексы, фотограмметрия, бикубическая интерполяция.

O.O. SAFAROV

Oles Honchar Dnipro National University

### THE VISUALIZATION QUALITY IMPROVEMENT ALGORITHM OF VEGETATION INDEX MAPS

In this paper the features of improving quality and detailing procedure for vegetative index images that were obtained on the basis of photogrammetric data were considered. Indexes are widely used in the study of the environment, climate and agriculture. Index images are calculated by arithmetic operations on the pixel brightness values from different image channels. In index images, objects of interest are more contrasting and distinct than on the original images. For quantitative assessment of vegetation, a normalized difference vegetation index (NDVI) is widely used. The red and infrared spectral channels of the photogrammetric image, respectively, are used for its calculation.

Pansharpening operation increases the spatial resolution of multispectral channels due to the use of panchromatic channel data. Pansharpening of such synthetic information as indexes has its peculiarities. The index image is visually less precise than the original ones. The goal is to make it more detailing and distinct. Well-known existing pansharpening algorithms, such as Brovey Transform, are not applicable due to significant color distortions of result image and required weight coefficients for fused bands. There are no known weights for index image pansharpening because its synthetic image. A pansharpening algorithm based on interpolation operations on initial images and weights calculation for each image pixel is proposed. Index images and high-resolution panchromatic images are used for pansharpening. It is also important to consider greater impact of panchromatic image data in calculations due to its sharpness. The resulting matrix is calculated based on the arithmetic mean of the panchromatic matrix and the index matrix, which is interpolated to the panchromatic dimensions. The result of the arithmetic means is multiplied by the synthesized weight matrix, which takes into account all transformations over the initial matrices of data. Experiments for the NDVI index confirmed the applicability of this algorithm and the prevailing efficiency of bicubic interpolation. The proposed algorithm is applicable both for single-channel and multi-channel pansharpening.

Keywords: pansharpening, vegetation indexes, photogrammetry, bicubic interpolation.

### Постановка проблеми

Вегетаційні індекси, обчислені на основі фотограмметричних даних, досить широко застосовуються в сільському господарстві для ідентифікації і оцінки стану рослинності, в картографії – для створення карт ландшафтів та природних зон, при моніторингу надзвичайних ситуацій – для визначення ступеня ураження лісних масивів та заповідних територій.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Операція паншарпенінга, яка використовується для підвищення візуальної якості та деталізації мультиспектральних фотограмметричних зображень, розглянута в [1]. Особливостям паншарпенінга, зокрема, вегетаційного індексу NDVI, присвячені роботи [2-3]. Застосування відомих алгоритмів паншарпенінга до зображень індексів призводить до втрати просторової інформації на результуючому зображенні. Отже, питання коректного здійснення паншарпенінга та отримання кращої візуалізації зображення індексу у підсумку є ключовим.

### Мета дослідження

Метою роботи є вивчення можливості ефективного паншарпенінга зображень індексів та дослідження особливостей візуалізації отриманого результату, а також порівняння його з традиційним зображенням індексу. На даному етапі найбільш актуальним є дослідження зображення індексу NDVI, як одного з найбільш вживаних, в рамках завдання поліпшення його візуалізації.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Мультиспектральні дані супутникової зйомки дозволяють отримати доступ до простого і в той же час потужного інструменту – індексів. Індекси обчислюються шляхом арифметичних операцій над значеннями яскравості пікселя з різних каналів знімка. На індексних зображеннях більш контрастно і яскраво виділяються шукані об'єкти, ніж на вихідних знімках. Індекси широко застосовуються при дослідженні навколишнього середовища, клімату, а також в сільському господарстві. Кількість індексів, які можна розрахувати, залежить від спектральних можливостей сенсора супутника, що здійснював зйомку. Тобто, чим більше каналів – тим більше різних індексів в теорії можна отримати. Однак тут грають роль і особливості даних, що отримуються, та їх затребуваність в тій чи іншій області.

Відбиття рослинного покриву в червоній і ближній інфрачервоній областях електромагнітного спектру тісно пов'язано з його зеленою фітомасою. Для кількісної оцінки стану рослинності широко застосовується нормалізований різницевий вегетаційний індекс, що обчислюється за наступною формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

де *NIR* – значення коефіцієнта відбиття в ближній інфрачервоній області спектра, а *RED* – в червоній області спектра.

Даний індекс часто використовується для спостереження посухи, моніторингу та прогнозування сільськогосподарського виробництва. *NDVI* характеризує також щільність рослинності, дозволяє дослідникам оцінити схожість і ріст рослин, продуктивність угідь. Значення *NDVI* змінюються в діапазоні від -1 до 1. У місцях знімка з великим значенням даного індексу (зазвичай, більше 0.7) наявна, як правило, більш густа рослинність. У місцях з низьким значенням, особливо менше нуля, рослинності, як правило, немає. В результаті розрахунку для кожного пікселя зображення, за вищезазначеною формулою, отримується зображення індексу або так звана карта *NDVI*. Для розрахунку застосовуються відповідно червоний та інфрачервоний спектральні канали фотограмметричного зображення, параметри яких можуть дещо варіюватись відповідно до сенсора.

Операція паншарпенінга часто використовується для підвищення візуальної якості і деталізації мультиспектральних фотограмметричних зображень. Вона збільшує просторову роздільну здатність мультиспектральних каналів за рахунок використання даних панхроматичного каналу. Побічним ефектом є можливі кольірні спотворення результуючого зображення, які варіюються в залежності від використовуваного алгоритму. Оскільки паншарпенінг по суті спотворює інформацію з метою кращої візуалізації, тому він застосовується в більшості випадків для композитів каналів для підвищення деталізації вихідного композиту. Паншарпенінг такої синтетичної інформації як індекси має свої особливості. Потрібно відзначити, що зображення індексів візуально менш чіткі в порівнянні з вихідними (рис. 1) і цілком логічною є спроба їх зробити більш деталізованими. Окремо слід зазначити, що для результуючої візуалізації вкрай важливою є використовувана палітра. Таким чином, проблема візуального поліпшення зображення індексів є доволі нетривіальною.

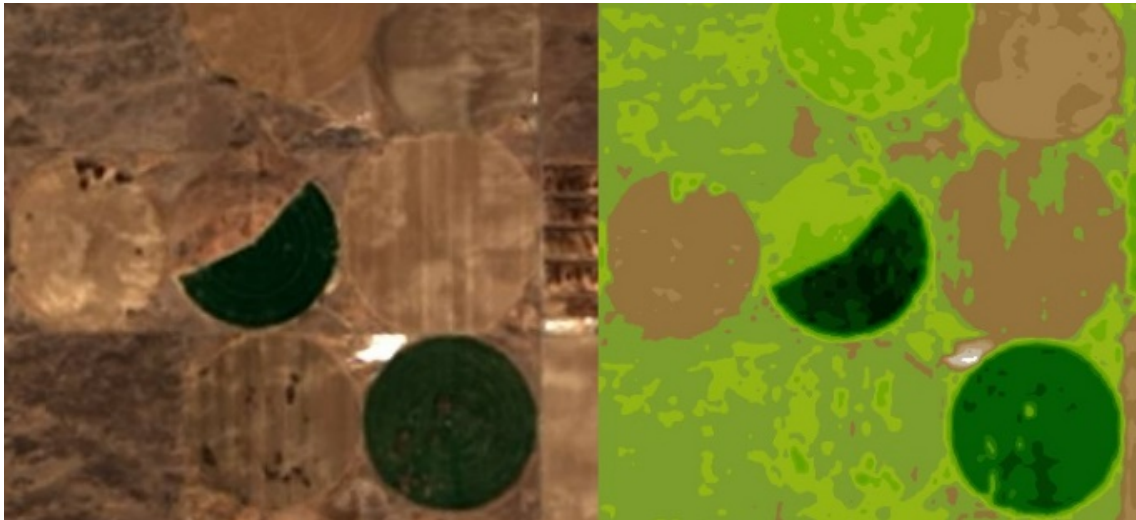


Рис. 1. RGB-композит (ліворуч) та NDVI-зображення (праворуч) фрагменту знімка Landsat 8

Покращення візуальної якості передбачає проведення паншарпенінга зображення індексу, для чого необхідно використовувати панхроматичний канал більш високої роздільної здатності, ніж використані при отриманні NDVI червоний і інфрачервоний канали. У разі застосування даних супутника Landsat 8 для отримання NDVI використовуються канали 5 (NIR) і 4 (RED) просторового розрізнення 30 м. Панхроматичний 8 канал цього сенсора має розрізнення удвічі вище – 15 м. Саме зображення індексу є одноканальним і тому далеко не всі алгоритми паншарпенінга можуть бути застосовані в даному випадку. Більше того, кожний з них має ті або інші недоліки, які можуть спотворювати результуюче зображення отриманого індексу. Наприклад, використання широко відомого Brovey Transform призводить до втрати просторової інформації з панхроматичного каналу [3].

Тому був розроблений алгоритм, який отримує ваги для паншарпенінга на основі інтерполяцій зображень каналів і проміжних обчислюваних вагових коефіцієнтів між цими інтерполяціями. Алгоритм цілком застосовний як для багатоканального (наприклад, паншарпенінг RGB) злиття зображень, так і для одноканального, як в даному випадку.

Отже, початковими даними для алгоритму є дві матриці, що містять значення яскравості пікселів панхроматичного зображення та зображення індексу однієї тієї ж ділянки місцевості, причому матриця з панхроматичними даними вдвічі більша, що обумовлено вищою роздільною здатністю. Алгоритм складається з наступних кроків.

1. Інтерполяція панхроматичної матриці до розмірів індексної ( $PAN_{05}$ ).
2. Розрахунок першої матриці ваг полягає в діленні матриці початкового індексного зображення на результат середнього арифметичного між цією ж індексною матрицею та результатом першого кроку:

$$W_1 = \frac{2 \cdot MS}{PAN_{05} + MS}, \quad (2)$$

де  $MS$  – матриця початкового індексного зображення,  $PAN_{05}$  – матриця інтерпольованого до вдвічі меншого розміру панхроматичного зображення.

3. Інтерполяція результату першого кроку до вдвічі більших розмірів та ділення на нього панхроматичної матриці. Тобто, по суті здійснюємо обчислення ваг, що відображають викривлення зображення під час інтерполяцій.

$$W_2 = \frac{PAN}{PAN_{05 \times 2}}, \quad (3)$$

де  $PAN$  – матриця початкового панхроматичного зображення,  $PAN_{05 \times 2}$  – матриця інтерпольованого до вдвічі меншого розміру панхроматичного зображення, яке потім було інтерпольоване до початкових розмірів.

4. Інтерполяція індексної матриці до розмірів панхроматичної ( $MS_{x2}$ ).
5. Інтерполяція ваг з кроку 2 ( $W_1$ ) до розмірів панхроматичної матриці ( $W_{1 \times 2}$ ).

6. Обчислення кінцевих ваг шляхом перемноження ваг з кроків 3 та 5:

$$W_3 = W_2 \cdot W_{1x2}. \quad (4)$$

7. Обчислення кінцевого результату за наступною формулою:

$$PS = \frac{MS_{x2} + PAN}{2} \cdot W_3. \quad (5)$$

Таким чином, результуюча матриця обчислюється на основі середнього арифметичного панхроматичної матриці та індексної матриці, що була інтерпольована до розмірів панхроматичної. Результат середнього арифметичного домножується на синтезовану матрицю ваг, яка враховує в собі всі перетворення над початковими матрицями даних.

Як видно з кроків алгоритму, він потребує лише початкових зображень, що робить його більш застосовним та універсальним на відміну від того ж вищезгаданого Brovey Transform, який потребує конкретні значення ваг для кожного каналу. Зворотню стороною розробленого алгоритму є його критична залежність від застосованого методу інтерполяції. Так, інтерполяція кубічними сплайнами, яка в інших випадках є однією з найякісніших, дає занадто згладжене результуюче зображення, найпростіша інтерполяція методом ближнього сусіда – пікселізоване грубе зображення.

Результат паншарпенінга – це зображення індексу, яке на відміну від *RGB*, виходить візуально більше згладженим, а не чітким як очікувалося. Аналіз синтезованих зображень показує, що зображення індексу набагато грубіше за мультиспектральні, які були застосовані при його розрахунку. Тому при синтезі логічним кроком було встановити більший вплив саме панхроматичного каналу на результат. Цей аспект відчутно впливає на результат (див. рис. 2).

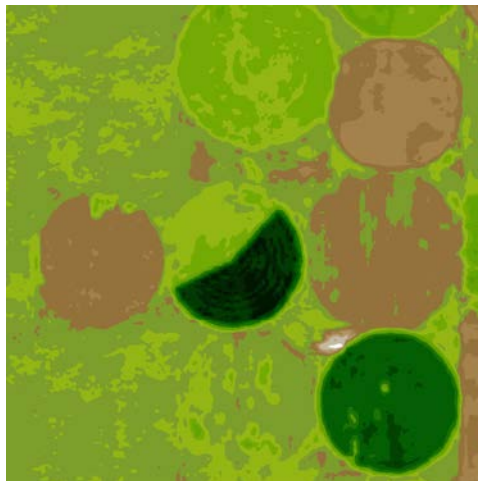


Рис. 2. *NDVI*-зображення після застосування алгоритму паншарпенінга

Стосовно обраного алгоритму інтерполяції, ґрунтуючись на проведених дослідях, оптимальною у даному випадку є бікубічна інтерполяція. Вона дає найменше викривлень на результуючому зображенні та максимально зберігає чіткість отриману з зображення панхроматичного каналу.

#### Висновки

Розроблено алгоритм паншарпенінга на основі інтерполяцій та обчислення вагових коефіцієнтів. На основі проведених експериментів визначено бікубічну інтерполяцію як найбільш ефективну з точки зору візуалізації. Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення застосовності алгоритму з іншими індексними зображеннями.

#### Список використаної літератури

1. Alparone, L.; Aiazzi, B.; Baronti, S.; Garzelli, A. Remote Sensing Image Fusion; CRC Press, Inc.: Boca Raton, FL, USA, 2015.
2. Choi J, Kim G., Park N., Park H., Choi S. A Hybrid Pansharpening Algorithm of VHR Satellite Images that Employs Injection Gains Based on NDVI to Reduce Computational Costs, Remote Sens. 2017, 9(10), 976; doi:10.3390/rs9100976.
3. Johnson, B. Effects of pansharpening on vegetation indices. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2014, 3, 507–522.
4. Schowengerdt, R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing, 3rd ed.; Academic Press: San Diego, CA, USA, 2007.

UDC 519.68; 681.513.7; 612.8.001.57; 007.51/.52

V.M. TOMASHEVSKII, Y.O. OLIYNIK, V.V. YASKOV, V.M. ROMANCHUK  
NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**REALTIME TEXT STREAM ANOMALIES ANALYSIS SYSTEM**

*Our project is an anomalies detecting system in real-time data streams in real-time mode. Anomaly is a deviation from the norm or general ordinariness. We can consider information of different types as a data stream. For example, server logs, information about customers visits at website, clicks on advertisement posted on the Internet, etc. So data streams can be tweets, messages which are published by the people from all over the world on the popular site Twitter.com. The tweet is a post which is published on users pages of the popular social network. Message should not exceed 140 characters by twitter.com rules.*

*The data stream analysis will be done by means / using of MLlib library, which is the part of the Apache Spark. In general, we can take any data stream and create test data samples that are satisfactory to us and do not go beyond ordinariness, as well as test samples that have anomalies. Such a test sample will be tweets that were written by people who were related to terrorist acts. The result of program will be user's alert about detecting social network messages with anomaly or other words of detecting suspicious messages that may precede terrorist attacks. Ideally, the program's working can help to prevent a terrorist act and to save people lives. Methods for problem solving.*

*In our system, to solve the problem of real time recognizing abnormalities in data stream, the Isolation Forest algorithm is used. The method by which the algorithm constructs a partition initially creates an isolation tree or random decision tree. Then, the estimate is calculated as the length of the path for the isolation of the observation. Tree is build based on a extracted keywords from tweets using RAKE algorithm. Those keywords are translated to feature vectors with a help of word2vec predefined models of Matlib before they can be used in DecisionTrees.*

*Software architecture. The program is the integration of several powerful technologies. We take the data stream from site twitter.com by using Twitter.API, which transmits posts and all attributes of instances to the Apache Kafka. Kafka is the system that works on principle "publisher - subscribers". Data stream goes to the broker, and server processing it by RDD parties. Under the control of the zookeeper server, the consumer signs up for obtaining of incoming data stream. Then the zookeeper directs the stream from the consumer to the Apache Spark.*

*Keywords: data mining, classification of textual information, content analysis, machine learning, classification algorithms*

V.M. ТОМАШЕВСЬКИЙ, Ю.О. ОЛІЙНИК, В.В. ЯСЬКОВ, В.М. РОМАНЧУК  
НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського"**СИСТЕМА АНАЛІЗУ АНОМАЛІЙ У ТЕКСТОВИХ ПОТОКАХ ДАНИХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ**

*Проект присвячений розробці системи моніторингу аномалій в потоках текстових даних в реальному часі. Цілі розробки – забезпечення аналізу потоку текстових даних у режимі реального часу з використанням методів та алгоритмів машинного навчання.*

*Ключові слова: інтелектуальний аналіз даних, класифікація текстової інформації, аналіз контенту, потоки даних, алгоритми класифікації.*

V.M. ТОМАШЕВСЬКИЙ, Ю.О. ОЛЕЙНИК, В.В. ЯСЬКОВ, В.М. РОМАНЧУК  
НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського"**СИСТЕМА АНАЛИЗА АНОМАЛИЙ В ТЕКСТОВЫХ ПОТОКАХ ДАННЫХ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

*Проект посвящен разработке системы мониторинга аномалий в потоках текстовых данных в реальном времени. Цели разработки – обеспечение анализа потока текстовых данных в режиме реального времени с использованием методов и алгоритмов машинного обучения.*

*Ключевые слова: интеллектуальный анализ данных, классификация текстовой информации, анализ контента, потоки данных, алгоритмы классификации*

### **Problem Statement**

There are many systems for text analysis like CUE-CNN [4], election analysis [8]. But these systems can't work in real-time. Therefore, we need to develop a scalable system that can perform data stream in real-time mode.

The main goal of the article is to create a text stream anomalies analysis system that can work in real-time mode.

Today the importance of text mining is rapidly increasing. This is due to the large amount of text information (that is) available through the Internet. Since millions of content symbols are formed every day, the person does not have the physical ability to process all the information.

Actually existing tools for text mining (for example, the "Statistica" system) do not allow to obtain the acceptable results to be achieved in solving the task of text classification, therefore, there is a need in the development of new algorithms.

Now almost all companies are seeking for reliable data storing and maintaining of corresponding reporting and documentation regardless of the endpoint product or in which spheres they are operating.

### **Purpose of the Study**

Yet a few years ago it was implemented by means of data storing on relational databases. And all the reported data was calculated at night by using of automated processes. But the development of Internet technology and its broad usage have forced everyone to move on further. The next step is the big data processing, and then its processing in real-time mode. That is, any event immediately comes to the server and is stored, and the server immediately reacts on the new events and displays it in its report.

Our project is an anomalies detecting system in real-time data streams in real-time mode. Anomaly is a deviation from the norm or general ordinariness. We can consider information of different types as a data stream. For example, server logs, information about customers visits at website, clicks on advertisement posted on the Internet, etc. So data streams can be tweets, messages which are published by the people from all over the world on the popular site Twitter.com. The tweet is a post which is published on users pages of the popular social network. Message should not exceed 140 characters by twitter.com rules.

### **Analysis of Recent Researches and Publications**

The data stream analysis will be done by means / using of MLlib library, which is the part of the Apache Spark[2]. In general, we can take any data stream and create test data samples that are satisfactory to us and do not go beyond ordinariness, as well as test samples that have anomalies. Such a test sample will be tweets that were written by people who were related to terrorist acts. Thus, it is possible with the fraction of probability to predict such events or relation of tweets authors to the commission of terrorist acts. The result of the program will be user's alert about detecting social network messages with anomaly or other words of detecting suspicious messages that may precede terrorist attacks. Ideally, the program's working can help to prevent a terrorist act and to save people lives.

What is an anomaly in text data?

Point anomalies appear in situations where a separate data sample can be considered as anomalous with respect to the rest of data. This type of anomalies is rather rare.

Contextual anomalies [3] can be observed if a data sample is abnormal only in a certain context. For identification of the anomalies of this type, the key part is to detect contextual and behavioral attributes. The contextual attribute may be position in space or more complex combinations of data properties. The behavioral attributes may be the characteristics of data that are not contextual. Thus, a data sample can be considered as a contextual anomaly in one context and absolutely normal in another.

Collective anomalies [3] arise where the sequence of connected data samples (for example, a line segment of a series) is abnormal in relation to a whole dataset. A separate data sample in such sequence may not be an anomaly, but the joint appearance of such instances is a collective anomaly. In addition, while point and contextual anomalies can be observed in any dataset, collective is observed only where the instances are connected.

### **Descriptions of Main Material of Researching**

#### **Methods for problem solving.**

Like any algorithm of machine learning algorithm, it is necessary to have initial data. The task complexity is in that how to choose the data structure, that perfectly (enough) represented documents, cost function.

There are several variants of classification methodologies for finding anomalies. Depending on the applied algorithm, the result of operation of anomalies identification may be label of data instance as abnormal or an estimation of degree probability that instance is abnormal.

The methodology of supervised recognition requires the existence of training sample that fully describes the system and data instances of normal class and abnormal class. The work of the algorithm takes place in two stages: learning and recognition. In the first stage, a model is constructed to compare data instances that don't have labels. The main complexity of algorithms that operate on the basis of the supervised recognition is the data forming of data for learning. Often an abnormal class is represented by a much smaller number of instances than normal, which may lead to inaccuracies in the obtained model. In such cases it is recommended to use the anomalies generation.

Partially supervised recognition mode. Initial data is only a normal class. After passing learning by a normal class, the system can define relevance of new data to it, thus the opposite. Algorithms that operate in

partially supervised recognition mode don't require information about an abnormal class of instances. As a result, such system can be broadly used, however such approach isn't very effective when it is necessary to detect particular class of anomalies.

Unsupervised recognition mode. Applied in the absence of a priori information about the data. Unsupervised recognition algorithms are based on the assumption that abnormal instances occur much less frequently than normal. The data is processed and the most remote instances are defined as abnormal.

**The problem definition.**

The problem of text classification can be formulated as the task of approximation unknown function

$$\Phi : D \times C \rightarrow \{0,1\} \tag{1}$$

in what way text documents may be classified) through function

$$K : D \times C \rightarrow \{0,1\} , \tag{2}$$

which is a classifier, where  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{|C|}\}$  – a set of possible categories, and  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{|D|}\}$  – a set of documents.

$$\Phi(d_j, c_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } d_j \in c_i \\ 0, & \text{if } d_j \notin c_i \end{cases} \tag{3}$$

In our system, to solve the problem of real time recognizing abnormalities in data stream, the Isolation Forest[5] algorithm is used. The method by which the algorithm constructs a partition initially creates an isolation tree or random decision tree. Then, the estimate is calculated as the length of the path for the isolation of the observation. Tree is build based on a extracted keywords from tweets using RAKE algorithm. Those keywords are translated to feature vectors with a help of word2vec predefined models of Matlib before they can be used in DecisionTrees.

**Software architecture.**

The program is the integration of several powerful technologies. We take the data stream from site twitter.com by using Twitter.API, which transmits posts and all attributes of instances to the Apache Kafka[1] . Kafka is the system that works on principle "publisher-subscribers". Data stream goes to the broker, and server processing it by RDD parties. Under the control of the zookeeper server, the consumer signs up for obtaining of incoming data stream. Then the zookeeper directs the stream from the consumer to the Apache Spark.

There, using the embedded Spark Streaming module, data analysis using the MLlib module is performed. A model is being built and taught of machine learning. Posts processing is performed using the Twitter API. Output of posts and notifications about anomalies detection is implemented in the interface. Spark is very well integrated with with the HBase database, where all the publications and instances attributes are stored. All this can be seen at deployment diagram.

**Processing pipeline.**

Tweets are consumed from the api by tweetsProducer. It extracts keywords from tweets content with rake algorithm and pushes them with some additional data extracted from tweet to kafka topic.

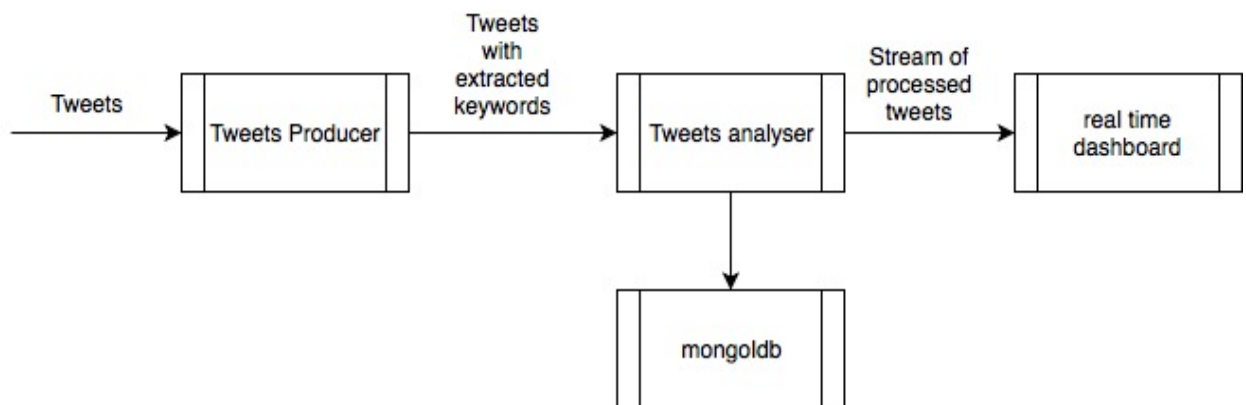


Figure 2. Processing pipeline.

Messages from kafka topic created by producer are consumed by tweetAnalyser. TweetAnalyser is an Spark application that uses trained word2vec[10] model to transform keywords to numeric vectors, these vectors are passed to isolation forest models to detect outliers. Outliers detected on previous step are then saved to MongoDB collection. Afterwards data about processed tweets are sent to another kafka topic processed by dashboardConsumer. Usage of multiple streams during processing.



**Experiments**

Proposed architecture was tested using tweets stream about Donald Trump. According to [9] twitter streaming API produces ~ 1% of tweets to end users. During testing we had an input rate 100 tweets per second.

Results of experiments are shown on figures 4 and 5.

On figure 3 presents the PieChart with totals of inline(normal tweets) and outline(abnormal tweets). It is updated at the real time with incoming data.

On figure 4 presents view saved outlier tweets with their content and links.

**Conclusion**

In this paper creation of realtime text stream anomalies analysis system is reviewed. Scalable software architecture are proposed. The Isolation Forest algorithm is used for text anomalies detection.

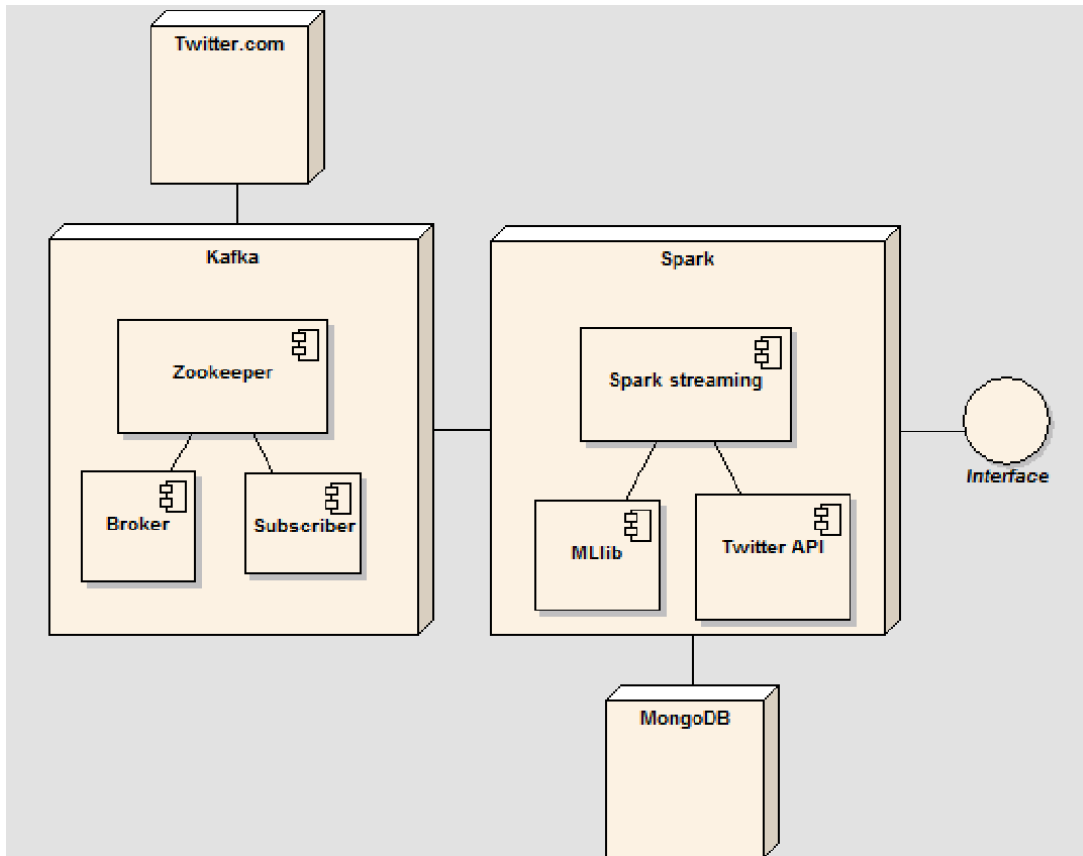


Figure 3. Software architecture.



Figure 4. Anomalies detection.



Tweet id	Created at	Lang	Text	Tweet url
942152249786191872	2017-12-16T21:59:35	en	JUST IN: Peter Strzok claims that his anti-Trump text messages didn't affect his investigation and were simply role-play for his mistress. In other words, he is lying.	http://twitter.com/4645598232/status/942152249786191872
942152248133636097	2017-12-16T21:59:34	en	Wow. This is massive. How many more rules does Mueller get to break before being shut down?	http://twitter.com/33905880/status/942152248133636097
942152248540499968	2017-12-16T21:59:35	en	SOURCES/ If you still need evidence of collusion, here it is. But as you read it, remember: (1) this is a "fraction" of the evidence Mueller has; (2) this only needs to make you 1% fearful Trump is guilty—as that's enough to 100% support an investigation.	http://twitter.com/851871276/status/942152248540499968
942152248121085952	2017-12-16T21:59:34	en	Anyone who thinks that Trump should fired Mueller, needs to read this article. Mueller, not only is a lifelong Republican, but is an American hero in EVERY sense of the word. He genuinely wants what's good for America and is as honest as they come.	http://twitter.com/79016425/status/942152248121085952
942152246963392512	2017-12-16T21:59:34	en	Remarkable	http://twitter.com/359536006/status/942152246963392512
942152245675560960	2017-12-16T21:59:34	en	Senior White House Official says "Thanks, but no thanks" to divesting from her private business interests. Must be nice when the rules don't apply to you.	http://twitter.com/348780432/status/942152245675560960
942152245432463360	2017-12-16T21:59:34	en	#Mueller did an end run around the Trump team. The power of the subpoena! @AlexWitt @MSNBC	http://twitter.com/503334928/status/942152245432463360

Figure 5. List of Anomal tweets.

### References

1. Apache Kafka documentation // <https://kafka.apache.org/documentation>
2. Big data processing using Apache Spark // <https://www.udemy.com/learning-path-spark-data-science-with-apache-spark>.
3. Chandola V., Banerjee A., Kumar V. Anomaly Detection: A Survey. // ACM Computing Surveys, Vol. 41(3), Article 15, 2009.
4. Election analyses // <https://mkdev.me/posts/analiz-vyborov-v-ssha-s-pomoschyu-apache-spark-graphx>
5. Isolation Forest // <https://cs.nju.edu.cn/zhoush/zhoush.files/publication/icdm08b.pdf>
6. Near Real-time data processing // <https://blog.cloudera.com/blog/2015/06/architectural-patterns-for-near-real-time-data-processing-with-apache-hadoop/>
7. Spark Streaming documentation // <https://spark.apache.org/docs/latest/streaming-programming-guide.html>.
8. "Sarcasm Detection" // <https://arxiv.org/pdf/1607.00976v2.pdf>
9. How Twitter Samples Tweets in Streaming API // <http://blog.falcondai.com/2013/06/666-and-how-twitter-samples-tweets-in.html>
10. Tomas Mikolov, Ilya Sutskever, Kai Chen // Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality // <https://arxiv.org/pdf/1310.4546.pdf>

УДК 004.056: 004.492

М.О. ЦАРЕНКО, О. В. ПОНОМАРЕНКО

Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського»

### НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНЕ ДОПОВНЕННЯ ЩОДО ВИВЧЕННЯ ТЕМИ "КОМП'ЮТЕРНІ ВІРУСИ ТА БОРОТЬБА З НИМИ"

*На сьогодні, масове застосування персональних комп'ютерів, на жаль, пов'язане з появою самовідтворюючих програм-вірусів, які унеможливають їх нормальну роботу, руйнують файлову структуру дисків, завдають шкоду персональній базі даних користувача. Метою чинного методичного дослідження є впровадження у навчальний процес структурованої інформації, яка дозволяє виокремити особливості підходів, що орієнтовані на ефективну боротьбу з комп'ютерними вірусами. Для досягнення цієї мети використано дослідницький метод, що дозволив визначити саме ту групу комп'ютерних вірусів, з якими, на сьогодні, можливо боротися та мінімізувати негативні наслідки від них. Відзначено, що незважаючи на прийняті в багатьох країнах заходи боротьби з комп'ютерними вірусами і розробкою спеціальних програмних засобів захисту від них, кількість нових вірусів постійно зростає. Цей факт свідчить про необхідність розширення означеної в роботі проблематики дослідження.*

*Ключові слова: віруси, антивірусна програма, файли, програми-детектори, програми-ревізори, програми-фільтри.*

Н.А. ЦАРЕНКО, Е.В. ПОНОМАРЕНКО

Южноукраинский национальный педагогический университет имени К. Д. Ушинского

### УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ДОПОЛНЕНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ "КОМПЬЮТЕРНЫЕ ВИРУСЫ И БОРЬБА С НИМИ"

*На сегодня, массовое применение персональных компьютеров, к сожалению, связано с появлением программ-вирусов, которые делают невозможными их нормальную работу, разрушают файловую структуру дисков, наносят вред персональной базе данных пользователя. Целью методического исследования является внедрение в учебный процесс структурированной информации, которая позволяет выделить особенности подходов, которые ориентированы на эффективную борьбу с компьютерными вирусами. Для достижения этой цели использован исследовательский метод, который позволил определить именно ту группу компьютерных вирусов, с которыми, на сегодня, возможно бороться и минимизировать негативные последствия от них. Отмечено, что невзирая на принятые во многих странах мероприятия борьбы по компьютерным вирусам и разработке специальных программных средств защиты от них, количество новых вирусов постоянно растет. Этот факт свидетельствует о необходимости расширения отмеченной в работе проблематики исследования.*

*Отмечено также, что существует три условных группы хакеров, которые создают проблемы для работы компьютерной техники. Первую группу создают студенты и школьники, которые только что изучили язык ассемблера, хотя и попробовали свои силы, но не могут найти для них более достойного применения. Вторую группу составляют также молодые люди, которые еще не полностью овладели искусством программирования, но уже решили посвятить себя написанию и распространению вирусов. Единственная причина, толкающая подобных людей на написание вирусов, это комплекс неполноценности, который проявляет себя в компьютерном хулиганстве. Третья, наиболее опасная группа, которая создает и запускает в мир "профессиональные" вирусы. Эти, очень тщательно продуманные и отлаженные программы создаются профессиональными, часто очень талантливыми программистами. Такие вирусы нередко используют достаточно оригинальные алгоритмы, не документированы и мало кому известные способы проникновения в системные области данных. "Профессиональные" вирусы часто выполнены по технологии "стелс" и являются полиморфно-вирусами, поражают не только файлы, но и загрузочные сектора дисков.*

*Ключевые слова: вирусы, антивирусная программа, файлы, программы-детекторы, программы-ревисоры, программы-фильтры.*

M. TSARENKO, O. PONOMARENKO

Southern Ukrainian National Pedagogical University named after K. D. Ushinsky

### EDUCATIONAL AND METHODOICAL ADDITION FOR STUDYING OF THE SUBJECT "COMPUTER VIRUSES AND FIGHT AGAINST THEM"

*For today, the mass use of personal computers, unfortunately, connected with emergence of programs viruses which make impossible their normal work destroy file structure of disks, do harm to personal base bathing*

*the user. The purpose of the methodical research is implementation in educational process of the structured information which allows to select features of approaches which are oriented to effective fight against computer viruses. For achievement of this purpose the research method which allowed to define that group of computer viruses with which, for today, it is possible to fight and minimize negative effects from them is used. It is noted that despite of the fight actions for computer viruses and development of special software of protection against them hosted in many countries, the quantity of new viruses constantly grows. This fact testifies to need of expansion of the research perspective noted in work.*

*It is noted also that there are three conditional groups of hackers who create problems for operation of the computer equipment. The first group is created by school and university students who just learned assembler language, want to try the hand, but cannot find for them more worthy application. The second group is made by also young people who not completely seized programming art, but already decided to devote themselves to writing and spread of viruses. The only reason pushing similar people on writing of viruses is the inferiority complex which proves in computer hooliganism. The third, most dangerous group which creates and starts "professional" viruses to the world. These, very carefully thought over and debugged programs are created by professional, often very talented programmers. Such viruses quite often use rather original algorithms, is not documented also to very few people the known methods of penetration into system areas of data. "Professional" viruses are often executed on stealth technology and is polymorfik-viruses, affect not only files, but also the boot sectors of disks.*

*Keywords: viruses, anti-virus program, files, programs detectors, programs auditors, programs filters.*

### Постановка проблеми

Очевидно, що комп'ютери стали справжніми помічниками людини і без них вже не може обійтися ані комерційна фірма, ані державна організація [1]. З іншого боку, загострилася проблема захисту інформації [2]. Віруси, що сьогодні широко поширюються в комп'ютерній мережі, розбурхали весь світ [3–7]. Користувачі стурбовані тим, що зловмисники здатні дістатися до конференційної приватної, фінансової, технічної та іншої важливої інформації. Отже, масове застосування персональних комп'ютерів, гаджетів має інший, небажаний бік. Поява нових і нових програм-вірусів перешкоджає нормальному функціонуванню всесвітньої павутини, руйнує не лише файлово структуру дисків, але і створює відповідну психологічну недовіру до виробників, як комп'ютерної техніки, так і програмного забезпечення щодо збереження важливої інформації [8]. Зовсім недавно зараження вірусом текстових файлів вважалося абсурдом, а зараз – цим вже нікого не здивуєш. Досить згадати появу "першої ластівки", яка наробила багато шуму – вірусу Win Word Concept, що вражає документи у форматі текстового процесора Microsoft Word for Windows [1]. Незважаючи на прийняті в багатьох країнах закони про боротьбу з комп'ютерними злочинами і розробку спеціальних програмних засобів захисту, кількість нових програмних вірусів теж зростає у геометричній прогресії. Саме така напружена ситуація у світі гаджетів і комп'ютерів визначила напрямок чинного методичного дослідження: систематизація знань користувачів про природу вірусів, способи зараження ними та захисту [5-7].

### Мета дослідження

Мета статті полягала у систематизації відомих методів боротьби з вірусами. Підготовлений матеріал є додатковою інформацією, який може бути використаний у форматі лабораторної роботи щодо вивчення та аналізу основних вірусів, які можуть вплинути на роботу програмного забезпечення.

Згідно до мети визначені *задачі* роботи: вивчити, дослідити та проаналізувати факти існування деяких груп вірусів, можливостей боротьби з ними з метою мінімізації впливу негативних наслідків на роботу систем персонального комп'ютера. Для досягнення поставленої мети та вирішення завдань дослідження використано сукупність взаємопов'язаних методів: *загальнонаукових*: аналіз, синтез, абстрагування, *порівняння та узагальнення* – для з'ясування особливостей концептуальних підходів покладених в основу боротьби з вірусами; *конкретно наукових* метод термінологічного аналізу, застосування якого дозволило уточнити основоположні поняття дослідження; хронологічний, на основі якого було визначено основні етапи створення вірусів.

### Викладення основного матеріалу дослідження

У літературі досить наполегливо пропагується, що позбутися від вірусів можна лише за допомогою складних і дорогих антивірусних програм, і нібито тільки під їх захистом ви можете відчувати себе в цілковитій безпеці. Це не зовсім так – знайомство з особливостями будови і способами впровадження комп'ютерних вірусів допоможе вчасно їх виявити і локалізувати, навіть якщо під рукою не виявиться підходящої антивірусної програми. Зараз застосовуються персональні комп'ютери, в яких користувач має вільний доступ до всіх ресурсів ПК. Саме це відкрило можливість для небезпеки, яка отримала назву комп'ютерного вірусу. Вірус – це програма яка здатна до самовідтворення. Така здатність є єдиним засобом, властивим всім типам вірусів. Але не тільки віруси здатні до самовідтворення. Будь-яка операційна система і ще безліч програм здатні створювати власні копії. Копії ж вірусу не тільки не зобов'язані повністю збігатися з оригіналом, але, і можуть взагалі з ним не збігатися! Вірус не може існувати в "повній ізоляції": сьогодні не можна уявити собі вірус, який не використовує код інших програм, інформацію про файлово

структуру або навіть просто імена інших програм. Причина зрозуміла: вірус повинен якимось способом забезпечити передачу собі управління [1]. Залежно від середовища перебування віруси можна розділити на мережеві, файлові, завантажувальні і файлово-завантажувальні. Мережні віруси поширюються по різним комп'ютерним мережах. Файлові віруси впроваджуються, головним чином, у модулі які виконуються, тобто у файли, які мають розширення COM або EXE. Завантажувальні віруси впроваджуються в завантажувальний сектор диска (Boot-сектор) або в сектор, що містить програму завантаження системного диска (Master Boot Record). Файлово-завантажувальні віруси вражають як файли, так і завантажувальні сектори дисків.

За ступенем впливу віруси можна розділити на наступні види:

- Безпечні, не заважають роботі комп'ютера, але зменшують обсяг вільної оперативної пам'яті і пам'яті на дисках, дії таких вірусів проявляються в будь-яких графічних або звукових ефектах.
- Небезпечні віруси, які можуть привести до різних порушень в роботі комп'ютера.
- Дуже небезпечні, вплив яких може призвести до втрати програм, знищення даних, стирання інформації в системних областях диска.

За особливостями алгоритму віруси важко класифікувати через великі розмаїття. Найпростіші віруси – паразитичні, вони змінюють вміст файлів і секторів диска і можуть бути досить легко виявлені і знищені. Можна відзначити віруси-реплікатори, звані хробаками, які поширюються по комп'ютерних мережах, обчислюють адреси мережних комп'ютерів і записують за цими адресами свої копії [1].

Відомі віруси-невидимки, так звані стелс-віруси, які дуже важко знайти й знешкодити, так як вони перехоплюють звертання операційної системи до вражених файлів і секторів дисків і підставляють замість свого тіла незаражені ділянки диска. Найбільш важко виявити віруси-мутанти, що містять алгоритми шифрування-розшифровки, завдяки яким копії одного і того ж вірусу не мають ні одного повторювального ланцюжка байтів. Є й звані квазівірусні або "троянські" програми, які хоч і не здатні до самопоширення, але дуже небезпечні, оскільки, маскуючись під корисну програму, руйнують завантажувальний сектор і файлово систему дисків.

*Троянські коні, програмні закладки та мережеві "черв'яки".* Троянський кінь – це програма, що містить у собі деяку руйнуючу функцію, яка активізується при настанні деякої умови спрацьовування. Зазвичай такі програми маскуються під які-небудь корисні утиліти. Віруси можуть нести в собі троянських коней чи "троянізовувати" інші програми – вносити в них руйнівні функції [2]. Зазвичай вони маскуються під ігрові або розважальні програми та завдають шкоди під красиві картинки або музику. Якщо віруси і "троянські коні" завдають шкоди за допомогою лавиноподібного саморозмноження або явного руйнування, то основна функція вірусів типу "хробак", діючих в комп'ютерних мережах, це злом, атакується система, тобто подолання захисту з метою порушення безпеки і цілісності.

У понад 80% комп'ютерних злочинів, розслідуваних ФБР, "зломщики" проникають в систему, що атакується через глобальну мережу Internet. Коли така спроба вдається, майбутнє компанії, на створення якої пішли роки, може бути поставлено під загрозу за якісь секунди [3]. Цей процес може бути автоматизований за допомогою вірусу, званого мережевий черв'як.

Хробаками називають віруси, які поширюються по глобальним мережам, вражаючи цілі системи, а не окремі програми. Це найнебезпечніший вид вірусів, так як об'єктами нападу в цьому випадку стають інформаційні системи державного масштабу. З появою глобальної мережі Internet цей вид порушення безпеки представляє найбільшу загрозу, оскільки його в будь-який момент може зазнати будь-який з 40 мільйонів комп'ютерів підключених до цієї мережі.

*Шляхи проникнення вірусів у комп'ютер і механізм розподілу вірусних програм.* Основними шляхами проникнення вірусів у комп'ютер є змінні диски, а також комп'ютерні мережі. Враження жорсткого диска вірусами може відбутися при завантаженні програми з диску, що містить вірус. Таке враження може бути і випадковим, наприклад, якщо диск не вийняли з дисководу і перезавантажили комп'ютер, при цьому диск може бути і не системним [3]. Вразити диск набагато простіше. На нього вірус може потрапити, навіть якщо диск просто вставили в дисковод враженого комп'ютера і, наприклад, прочитали його зміст.

Вірус, як правило, впроваджується в робочу програму таким чином, щоб при її запуску управління спочатку передалося йому і тільки після виконання всіх його команд знову повернулося до робочої програми. Отримавши доступ до управління, вірус, перш за все, переписує сам себе в іншу робочу програму і вражає її [4]. Після запуску програми, що містить вірус, стає можливим враження інших файлів.

Найчастіше вірусом вражаються завантажувальний сектор диска і виконувані файли, що мають розширення EXE, COM, SYS, BAT. Вкрай рідко вражаються текстові файли.

Після враження програми вірус може виконати якусь диверсію, не дуже серйозну, щоб не привертати уваги. І, нарешті, не забуває повернути управління тій програмі, з якої був заведений. Кожне виконання враженої програми переносить вірус у наступну. Таким чином, вразиться все програмне забезпечення.

*Ознаки появи вірусів.* При враженні комп'ютера вірусом важливо його виявити. Для цього слід знати про основні ознаки прояву вірусів. До них можна віднести наступні:

- Припинення роботи або неправильна робота раніше успішно функціонуючих програм
- Повільна робота комп'ютера
- Немоżliвість завантаження операційної системи
- Зникнення файлів і каталогів чи спотворення їх вмісту
- Зміна дати і часу модифікації файлів
- Зміна розмірів файлів
- Несподіване значне збільшення кількості файлів на диску
- Істотне зменшення розміру вільної оперативної пам'яті
- Виведення на екран непередбачених повідомлень або зображень
- Подача непередбачених звукових сигналів
- Часті зависання і збої в роботі комп'ютера

Незважаючи на те, що загальні засоби захисту інформації дуже важливі для захисту від вірусів, все ж їх недостатньо. Необхідно вживати застосування спеціалізованих програм для захисту від вірусів [5]. Ці програми можна розділити на кілька видів: детектори, лікарі (фаги), ревізори, лікарі-ревізори, фільтри та вакцини (імунізатори).

*Програми-детектори* дозволяють виявляти файли, вражені одним з декількох відомих вірусів. Ці програми перевіряють, чи є у файлах на зазначеному користувачем диску специфічна для даного вірусу комбінація байтів. При її виявленні в якомусь файлі на екран виводиться відповідне повідомлення. Багато детекторів мають режими лікування або знищення вражених файлів. Слід підкреслити, що програми-детектори можуть виявляти тільки ті віруси, які їй "відомі". Програма Scan фірми Mc Afee Associates і Aidstest Д. Н. Лозінського дозволяє виявляти близько 9000 вірусів, але всього їх більше двадцяти тисяч! Деякі програми-детектори, наприклад Norton Anti Virus або AVSP фірми "Діалог", можуть налаштовуватись на нові типи вірусів, їм необхідно лише вказати комбінації байтів, властиві цим вірусам.

Багато програм-детекторів (у тому числі і Aidstest) не вміють виявляти враження "невидимими" вірусами, якщо такий вірус активний в пам'яті комп'ютера. Справа в тому, що для читання диска вони використовують функції DOS, що перехоплюються вірусом, який говорить, що все добре. Правда, Aidstest та інші детектори намагаються виявити вірус шляхом перегляду оперативної пам'яті, але проти деяких "хитрих" вірусів це не допомагає. Так що надійний діагноз програми-детектори дають тільки при завантаженні DOS з "чистого", захищеного від запису диску, при цьому копія програми-детектора також повинна бути запущена з цього диску. Деякі детектори (скажімо ADinf фірми "Діалог-Наука") вміють ловити "невидимі" віруси, навіть коли вони активні. Для цього вони читають диск, не використовуючи виклики DOS. Щоправда, цей метод працює не на всіх дисководах. Більшість програм-детекторів мають функцію "лікаря", тобто вони намагаються повернути вражені файли або області диска в їх початковий стан [6]. Ті файли, які не вдалося відновити, як правило, робляться непридатними або видаляються. Більшість програм-лікарів вміють "лікувати" тільки від деякого фіксованого набору вірусів, тому вони швидко застарівають. Але деякі програми можуть навчатися не тільки способам виявлення, а й способам лікування нових вірусів. До таких програм відноситься AVSP фірми "Диалог".

*Програми-ревізори* мають дві стадії роботи. Спочатку вони запам'ятовують відомості про стан програм і системних областей дисків (завантажувального сектора і сектора з таблицею розбиття жорсткого диска). Передбачається, що в цей момент програми та системні області дисків не вражені. Після цього за допомогою програми-ревізора можна в будь-який момент порівняти стан програм і системних областей дисків з вихідним. Про виявлені невідповідності повідомляється користувачеві. Щоб перевірка стану програм і дисків проходила при кожному завантаженні операційної системи, необхідно включити команду запуску програми-ревізора в командний файл AUTOEXEC BAT. Це дозволяє виявити враження комп'ютерним вірусом, коли він ще не встиг завдати великої шкоди. Більше того, та ж програма-ревізор зможе знайти ушкоджені вірусом файли. Останнім часом з'явилися дуже корисні гібриди ревізорів і лікарів, тобто ЛІКАРІ-ревізора – програми, які не тільки виявляють зміни у файлах і системних областях дисків, а й можуть у разі змін автоматично повернути їх в початковий стан [7]. Такі програми можуть бути набагато більш універсальними, ніж програми-лікарі, оскільки при лікуванні вони використовують заздалегідь збережену інформацію про стан файлів і областей дисків. Це дозволяє їй вилікувати файли навіть від тих вірусів, які не були створені на момент написання програми. Але вони можуть лікувати не від усіх вірусів, а тільки від тих, які використовують "стандартні", відомі на момент написання програми, механізми враження файлів.

*Програми-фільтри* – розташовуються резидентно в оперативній пам'яті комп'ютера і перехоплюють ті звернення до операційної системи, які використовуються вірусами для розмноження і нанесення шкоди, і повідомляють про них користувача. Користувач може дозволити або заборонити виконання відповідної операції. Однак переваги використання програм-фільтрів дуже значні – вони дозволяють виявити багато вірусів на самій ранній стадії, коли вірус ще не встиг розмножитися і щось зіпсувати. Тим самим можна звести збитки від вірусу до мінімуму.

*Програми-вакцини*, або імунізатори, модифікують програми і диски таким чином, що це не відбивається на роботі програм, але той вірус, від якого виробляється вакцинація, вважає ці програми або диски вже враженими. Ці програми є вкрай неефективними. *Антивірусні програми*. Отже, що ж таке антивірус? Відразу ж розвіємо одну часто виникаючу ілюзію. Чомусь багато хто вважає, що антивірус може виявити будь-який вірус, тобто, запустивши антивірусну програму або монітор, можна бути абсолютно впевненим у їх надійності. Така точка зору не зовсім вірна. Справа в тому, що антивірус – це теж програма, звичайно, написана професіоналом. Але ці програми здатні розпізнавати і знищувати лише відомі віруси. Тобто антивірус проти конкретного вірусу може бути написаний лише в тому випадку, коли у програміста є у наявності хоча б один екземпляр цього вірусу. От і йде ця нескінченна війна між авторами вірусів і антивірусів, щоправда, перших у нашій країні чомусь завжди більше, ніж других. Але і у творців антивірусів є перевага! Справа в тому, що існує велика кількість вірусів, алгоритм яких практично скопійований з алгоритму інших вірусів. Як правило, такі варіації створюють непрофесійні програмісти, які з якихось причин вирішили написати вірус. Для боротьби з такими "копіями" придумано нову зброю – евристичні аналізатори. З їх допомогою антивірус здатний знаходити подібні аналоги відомих вірусів, повідомляючи користувачеві, що у нього, схоже, завівся вірус. Природно, надійність евристичного аналізатора не 100%, але все ж його коефіцієнт корисної дії більше 0,5. Таким чином, в цій інформаційній війні, як, втім, і в будь-якій іншій, залишаються найсильніші. Віруси, які не розпізнаються антивірусними детекторами, здатні написати тільки найбільш досвідчені й кваліфіковані програмісти. При запуску Aidstest перевіряє себе, оперативну пам'ять на наявність відомих йому вірусів і знешкоджує їх. При цьому паралізуються тільки функції вірусу, пов'язані з розмноженням, а інші побічні ефекти можуть залишатися. Тому програма після закінчення знешкодження вірусу в пам'яті видає запит про перезавантаження. Слід обов'язково наслідувати цьому, якщо оператор ПК не є системним програмістом, який займається вивченням властивостей вірусів. Причому слід перезавантажитися кнопкою RESET, тому що при "теплому перезавантаженні" деякі віруси можуть зберігатися. Краще запустити ПК і Aidstest з захищеного від запису диску, так як при запуску із враженого диску вірус може записатися на згадку резидентом і перешкоджати лікуванню. Як показала практика, найоптимальніший режим для щоденної роботи задається ключами / g (перевірка всіх файлів, а не тільки з розширенням EXE, COM, SYS) та / s (повільна перевірка). Збільшення часу при таких опціях практично не відчутно, зате вірогідність виявлення на порядок вище. При звичайному тестуванні не слід ставити ключ / f (виправлення заражених програм і стирання не підлягають відновленню), навіть з ключем / q (видавати запит про видалення файлу), оскільки будь-яка програма, в тому числі і антивірусна, не застрахована від помилок. Ключ / f слід використовувати тоді, коли Aidstest, а також інші антивіруси вказують на наявність вірусу у файлі [7, 8]. При цьому слід перезавантажити комп'ютер з захищеного від запису диску, так як система може бути заражена резидентним вірусом, і тоді лікування буде неефективним, а то й просто небезпечним. При виявленні вірусу в коштовному файлі слід переписати його на електронний диск і там спробувати вилікувати за допомогою вказівки Aidstest – в опції / f. Якщо спроба не увінчається успіхом, то треба видалити всі заражені копії файлу і перевірити диск знову. Якщо у файлі міститься важлива інформація, яку слід зберегти, то необхідно провести архівацію файлу до виходу нової версії Aidstest, або іншої антивірусної програми, здатної лікувати цей тип вірусу. Для прискорення процесу можна направити заражений файл в якості зразка Лозинському. Для створення у файлі протоколу роботи програми Aidstest служить ключ / p. Протокол виявляється за потрібне, коли користувач не встигає переглянути імена вражених файлів. Для підтримки антивірусного програмно-апаратного комплексу Sheriff служить ключ / z.

*Doctor Web*. Останнім часом стрімко зростає популярність іншої антивірусної програми – Doctor Web (Dr.Web). Ця програма разом з Aidstest належить до класу детекторів-лікарів, але на відміну від останнього, він має так званий "евристичний аналізатор" – алгоритм, що дозволяє виявляти невідомі віруси. "Лікувальна павутина", як перекладається з англійської назва програми, стала відповіддю вітчизняних програмістів на навалу самоіндифікуючих вірусів-мутантів. Останні при розмноженні модифікують своє тіло так, що не залишається жодного характерного ланцюжка байт, присутнього в вихідній версії вірусу. Dr.Web можна назвати антивірусом нового покоління в порівнянні з Aidstest та його аналогами.

Управління режимами як і в Aidstest здійснюється за допомогою ключів. Користувач може вказати програмі, тестувати як весь диск, так і окремі підкаталоги або групи файлів, або ж відмовитися від перевірки дисків і тестувати тільки оперативну пам'ять. У свою чергу можна тестувати або тільки базову пам'ять, або, ще і розширену (вказується з допомогою ключа / H). Як і Aidstest Doctor Web може створювати звіт про роботу (ключ / P), завантажувати знакогенератор Кирилиці (ключ / R), підтримує роботу з програмно-апаратним комплексом Sheriff (ключ / Z) [3]. Але, звичайно, головною особливістю "Лікувальної павутини" служить наявність евристичного аналізатора, який підключається ключем / S. Балансу між швидкістю і якістю можна домогтися, вказавши ключу рівень евристичного аналізу: 0 - мінімальний, 1 - оптимальний, 2 - максимальний; при цьому, природно, швидкість зменшується пропорційно збільшенню якості. До того ж Dr.Web дозволяє тестувати файли, вакциновані CPAV, а також упаковані LZEXE, PKLITE, DIET. Для цього слід вказати ключ / U (при цьому розпакування файлів проведуть на поточному пристрої) чи / U диск: (де диск: це пристрій, на якому буде здійснюватися розпакування), якщо диск, з якого запущений Doctor Web захищений від запису. Багато програм упаковані таким способом, хоча користувач може і не підозрювати

про це. Якщо ключ / U не встановлено, то Doctor Web може пропустити вірус, який заліз в запаковану програму. Важливою функцією є контроль враження тестованих файлів резидентним вірусом (ключ / V). При скануванні пам'яті не має стовідсоткової гарантії, що "Лікувальна павутина" знайде всі віруси, які перебувають там. Так от, при завданні функції / V Dr.Web намагається перешкодити тим, які залишилися резидентним вірусам, вразити тестовані файли. Тестування вінчестера Dr.Web-ом займає на багато більше часу, ніж Aidstest-ом, тому кожен користувач не може собі дозволити витратити стільки часу на щоденну перевірку всього жорсткого диску. Таким користувачам можна порадити ретельніше (з опцією / S2) перевіряти внесені ззовні диски. Якщо інформація на диску знаходиться в архіві (а останнім часом програми і дані переносяться з машини на машину тільки в такому вигляді; навіть фірми-виробники програмного забезпечення, наприклад Borland, купують свою продукцію), слід розпакувати його в окремий каталог на жорсткому диску і відразу ж, не відкладаючи, запустити Dr.Web, поставивши йому як параметр замість імені диска повний шлях до цього підкаталогу. І все ж потрібно хоча б раз на два тижні робити повну перевірку "вінчестера" на віруси із завданням максимального рівня евристичного аналізу.

*Microsoft Antivirus.* До складу сучасних версій MS-DOS входить антивірусна програма Microsoft Antivirus (MSAV). Цей антивірус може працювати в режимах детектора-лікаря і ревізора. MSAV має дружній інтерфейс в стилі MS-Windows, природно, підтримується миша [2]. Добре реалізована контекстна допомога: підказка є практично до кожного пункту меню, до будь-якої ситуації. Універсально реалізований доступ до пунктів меню: для цього можна використовувати клавіші управління курсором, ключові клавіші (F1-F9), клавіші, відповідні одній з літер назви пункту, а також миша. Прапорці установок у пункті меню Options можна встановлювати як клавішею ПРОБІЛ, так і клавішею ENTER. Серйозною незручністю при використанні програми є те, що вона зберігає таблиці з даними про файли не в одному файлі, а розкидає їх по всіх директоріях. Слід ще раз зазначити, що комп'ютерний вірус – це спеціально написана програма, яка здатна мимовільно приєднуватися до інших програм, створювати свої копії і упродовжувати їх у файли, системні області комп'ютера і в обчислювальні мережі з метою порушення роботи програм, псування файлів і каталогів, створення всіляких перешкод в роботі комп'ютера.

#### Висновки

Підводячи підсумок, зазначимо, що, на сьогодні, існує майже п'ять тисяч вірусів і їх кількість безперервно збільшується. Відомі випадки, коли створювалися навчальні посібники, які допомагають у написанні вірусів. Основні види вірусів: завантажувальні, файлові, файлово-завантажувальні. Самий небезпечний вид вірусів – поліморфний. Причини появи і розповсюдження вірусів приховані з одного боку в психології людини, з другого боку – з відсутністю засобів захисту у операційної системи. Навіть, якщо загрози вірусів начебто немає, необхідно заздалегідь провести заходи антивірусного захисту, в тому числі організаційного характеру. Таким чином, в роботі систематизовані та проаналізовані основні програми-віруси, які можуть вплинути на роботу програмного забезпечення гаджетів та персональних комп'ютерів. Наведені сучасні методи і прийоми боротьби з вірусами.

Вирішені наступні *задачі*: вивчені, досліджені та проаналізовані факти існування деяких груп вірусів, можливості боротьби з ними з метою мінімізації впливу негативних наслідків на роботу систем персонального комп'ютера. Показано, що першим, хто захищає персональний комп'ютер є програми-фільтри. Другу групу складають програми-ревізори, програми-лікаря та лікарі-ревізори. Надана в статті інформація може бути використана під час виконання лабораторної роботи за відповідною темою.

#### Список використаної літератури

1. Норок А.П. Сучасні технології боротьби з вірусами / А.П. Норок // МИР ПК. – № 8. – 2011. – С. 97
2. Использование криптографии // Энциклопедия безопасности – [Цит. 2011 26 листопада] – Доступний з: <http://www.opasno.net/st.832html>.
3. Фейнштайн К. Защита ПК от спама, вирусов, всплывающих окон и шпионских программ / К Фейнштайн; Пер с англ. О.Б.Вереиной. – М.: ИТ Пресса, 2015. – 240 с. .
4. Чігірьов С.П. Методи автентифікації даних. Електронний цифровий підпис / С.П. Чігірьов, С.І. Ганжела // Збірник тез доповідей Всеукраїнського студентського науково-практичного семінару "Сучасні інформаційні технології та програмне забезпечення комп'ютерних систем" – Кіровоград: Вид-во "КОД" 2012. – С. 45-47.
5. Лутченко О.В. Цифровий підпис із застосуванням кода автентифікації повідомлення / О.В. Лутченко, С.І. Ганжела // Студентські наукові записки (Збірник наукових статей студентів фізико-математичного факультету). – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В.Винниченка, 2012. – Вип. 5. – С. 21-23.
6. Компьютерный вирус. – Лаборатории Касперского – [Цит. 2011 29 листопада]. – Доступний з: [http://ru.kaspersky.org/faq/Компьютерный\\_вирус](http://ru.kaspersky.org/faq/Компьютерный_вирус).
7. Троянские программы – AnVir – [Цит. 2011 14 грудня] – Доступний з: <http://www.anvir.net/trojanskie-programmy.html>.
8. Способы борьбы с программами-вымогателями класса Trojan-Ransom – Служба технической поддержки Лаборатории Касперского – [Цит. 2011 25 грудня]. – Доступний з: <http://support.kaspersky.ru/faq/?qid=208637133>.

УДК 519.6: 004.942

С.В. ЧОПОРОВ

Запорожский национальный университет

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТОК В СИСТЕМАХ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА

Статья посвящена разработке формального представления дискретных моделей геометрических объектов для использования в системах инженерного анализа. Дискретные модели представлены множествами узлов и элементов, а также списками инцидентности. Разработанные представления не зависят от формы элементов и размерности моделей. Предложено две возможные реализации на основе векторных и списковых структур данных, для которых выполнены вычислительное исследование скорости выполнения операций добавления и удаления узлов или элементов.

Ключевые слова: дискретная модель, сетка, структура данных, формальное представление, быстроедействие.

С.В. ЧОПОРОВ

Запорізький національний університет

## ПОДАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СІТОК У СИСТЕМАХ ІНЖЕНЕРНОГО АНАЛІЗУ

Дискретні моделі геометричних об'єктів (або сітки) є важливими компонентами систем інженерного аналізу, заснованих на розв'язанні систем рівнянь у частинних похідних. Інтуїтивно, дискретна модель геометричного об'єкта – це колекція вузлів і елементів. Координати вузлів визначають геометрію об'єкта. Елементи визначають зв'язки між вузлами, тобто топологію геометричного об'єкта. У загальному випадку, елементи можуть мати тільки спільні вершини, ребра та грані. Для забезпечення чисельної збіжності для кожного внутрішнього ребра або грані одного елемента повинні існувати відповідне ребро або грань іншого. Отже, у статті розглянута проблема подання дискретних моделей геометричних об'єктів у системах інженерного аналізу.

У статті запропоновано підхід до подання дискретних моделей геометричних об'єктів множинами вузлів і елементів, а також списками інцидентності. Розроблений підхід до подання сіток не залежить від форми елементів і розмірності моделі. Для запропонованого підходу представлено алгоритми додавання та видалення вузлів або елементів.

Розглянуто дві можливі реалізації подання дискретних моделей геометричних об'єктів: на основі векторних і спискових структур даних. Векторні структури базуються на розміщенні даних у послідовних адресах пам'яті, що дозволяє ефективно їх обробляти у циклах. Натомість, спискові структури дозволяють ефективно видаляти дані. У статті наведено результати обчислювальних експериментів для дослідження швидкодії операцій ставки та видалення вузлів та елементів.

Розроблені класи для програмної реалізації подання дискретних моделей. Ці класи дозволяють використовувати простий і дружній до користувача інтерфейс для автоматизації алгоритмів генерації дискретних моделей.

Перспективи подальших досліджень можуть полягати у розробці подання дискретних моделей геометричних об'єктів у паралельних і розподілених комп'ютерних системах.

Ключові слова: дискретна модель, сітка, структура даних, формальне подання, швидкодія.

S.V. CHOPOROV

Zaporizhzhya National University

## REPRESENTATION OF COMPUTATIONAL MESHES IN COMPUTER-AIDED ENGINEERING

A discrete model of a geometric object (aka grid, mesh) is an essential part of computer-aided engineering based on the solution of partial differential equations. Intuitively, a discrete model of geometric object is a collection of nodes and elements. Coordinates of nodes define the geometry of the object. Elements define the connectivity between nodes and the topology of the object. Generally, elements have only common vertices, edges and faces. To support computational convergence, for each internal edge or face of some element must exist the corresponding edge or face of the another element. In this paper, we present the problem of representation of discrete models of geometric models in computer-aided engineering.

In the paper, the approach for the discrete model representation based on sets of nodes, elements and lists of incidence has been developed. This approach does not depend on the element shape or the model dimension. For this representation, algorithms of node and element inserting and deleting have been described.



*Two possible implementations of the developed representation have been compared. The first implementation uses list data structures, the second uses dynamic arrays. Lists allow effective deleting of nodes and elements by the modification of references only. Dynamic arrays store all data in contiguous block of memory and they are effective in searching and iterating procedures. Results of benchmarks for both implementations have been described in the paper.*

*Classes for both implementations have been developed. These classes allow using a simple user-friendly interface for meshing algorithms programming.*

*The further prospects of the research include the development of the representation adapted for parallel and distributed computer systems.*

*Keywords: discrete model, mesh, data structure, representation, benchmark.*

### **Постановка проблеми**

Моделі, основані на численному розв'язанні рівнянь в частинних похідних, часто використовують в задачах проектування і дослідження технічних об'єктів. Один з найбільш розповсюджених на практиці численних методів – метод кінцевих елементів – (як і деякі інші) заміняє початкову неперервну модель дискретною, яку можна обробити комп'ютером. В результаті на першому етапі моделювання для певної неперервної області необхідно побудувати кінцеве множинство простих фігур (елементів), наприклад, трикутників, чотирикутників, тетраєдрів, шестигранників і т. д. Взаємне розташування вершин елементів суттєво впливає на точність численного аналізу. Отже, автоматизація побудови дискретних моделей геометричних об'єктів є одним з ключових етапів реалізації систем інженерного аналізу.

Інтуїтивно, дискретна модель геометричного об'єкта – це колекція вузлів і елементів, які визначають форму цього об'єкта. Координати вузлів визначають геометрію об'єкта, елементи – його топологію. В загальному випадку, елементи можуть мати тільки спільні вершини, ребра і грані. При цьому для кожної пари вузлів, яка є ребром в одному елементі, повинен існувати ребро в іншому елементі, якщо обидва елементи інцидентні в цих вузлах. Аналогічне вимогу можна сформулювати стосовно граней. Ці дві вимоги необхідні для забезпечення неперервності численного розв'язання, відповідно, вздовж ребер і граней.

Формальне визначення дискретної моделі геометричного об'єкта – це опис відповідної структури даних. Це необхідно з точки зору того, що пара алгоритм і структура даних є основою для створення програми. В той же час, розробка загальної структури даних для довільної дискретної моделі є дуже складною задачею.

### **Аналіз останніх досягнень і публікацій**

Найбільш розповсюджені отримали полігональні дискретні моделі поверхонь геометричних об'єктів. Для них розроблені дуже ефективні програмні і апаратні методи візуалізації (наприклад, за допомогою зворотної трасировки променів). Многокутник в порядку обходу однозначно визначається координатами своїх вершин. Відповідно, в задачах візуалізації для кожного полігона достатньо зберігати тільки координати його вершин. В результаті на кожен полігон буде витрачатися  $3 \cdot k \cdot f$  байт пам'яті ( $k$  – кількість вершин,  $f$  – кількість байт, використовується для зберігання одного числа з плаваючою точкою).

В задачах генерації і обробки дискретних моделей виникає необхідність вставки або видалення вузлів. В випадку зберігання елементів в вигляді масивів координат необхідний пошук елементів серед вузлів. В результаті в системах інженерного аналізу розповсюджені структури даних, засновані на представленні вершин елементів вказувачами на позиції в загальному масиві або списку координат вершин. При цьому, як правило, елементи мають додаткову топологічну інформацію, що спрощує пошук сусідів. Піонером в цьому напрямку можна вважати схему "крилате ребро" (winged edge) [1]. В ній кожен вузол зберігає інформацію про своїх координатах і посилання на одне з своїх ребер, грань зберігає посилання на ребра в порядку їх обходу. Ребро зберігає посилання на два вузли і дві грані (умовно ліву і праву), а також чотири "крила": посилання на попереднє і наступне ребра в порядку обходу обох граней. Схожі ідеї закладені в схеми "радіальне ребро" (radial-edge) [2], "орієнтоване ребро" (directed edge) [3], "полуребро" (half-edge) [4], а також узагальненні останнього [5, 6, 7]. Подібні схеми дуже ефективні при зберіганні і обробці полігональних моделей, але їх важко застосовувати для об'ємних елементів. Компактні схеми зберігання об'ємних елементів розроблені для тетраєдрів в вигляді узагальнення схем для трикутників [8, 9]. В той же час, в роботі [10] запропонована схема стислого зберігання дискретних моделей на основі шестигранників.

### **Ціль дослідження**

Розробка систем інженерного аналізу вимагає єдиної абстрактної структури даних, незалежної від форми елемента. Її введення дозволить використовувати єдину формальну нотацію при викладі алгоритмів. Таким чином, метою дослідження є розробка схеми представлення дискретних моделей геометричних об'єктів, а також відповідних структур даних.

**Изложение основного материала исследования**

Формально, дискретная модель геометрического объекта – пара множеств вида

$$\mathbf{M} = (\mathbf{V}, \mathbf{E}), \tag{1}$$

где  $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_m)$  – множество координат узлов;

$$\mathbf{E} = \left( e_1 = (k_{1,1}, k_{1,2}, \dots, k_{1,n_1}), e_2 = (k_{2,1}, k_{2,2}, \dots, k_{2,n_2}), \dots, e_q = (k_{q,1}, k_{q,2}, \dots, k_{q,n_q}) \right) \text{ – множество}$$

$n_i$ -вершинных элементов ( $n_i = |e_i|$ ) – кортежей номеров узлов из множества  $\mathbf{V}$ , определяющих положения вершин элемента;  $m$  – число узлов;  $q$  – число элементов.

Координаты  $j$ -го элемента с  $n$  вершинами определяются подстановкой  $\mathbf{V}(e_j) = (v_{k_{j,1}}, v_{k_{j,2}}, \dots, v_{k_{j,n}})$ .

Множество  $\mathbf{V}$ , в общем случае, можно считать ассоциативным массивом, в котором хранятся пары ключ-значение. Ключом выступает номер, код или адрес в памяти узла, значением – его координаты. Соответственно, запись  $\mathbf{V}[k]$  обозначает координаты (радиус-вектор) узла  $v_k \in \mathbf{V}$ .

Аналогичное утверждение справедливо и для множества  $\mathbf{E}$ , в котором ключами могут выступать номера, коды или адреса элементов, а значениями соответствующие списки или массивы, хранящие кортежи. В таком случае запись  $\mathbf{E}[i]$  обозначает элемент  $e_i \in \mathbf{E}$ . Учитывая, что  $e_i$  является кортежем, то  $e_i[j] = \mathbf{E}[i][j]$  обозначает номер узла  $k_{i,j}$ , определяющего положение  $j$ -й вершины.

Алгоритмы вставки и удаления узлов и элементов для дискретной модели вида (1) являются элементарными. Добавление нового элемента требует поочередного добавления всех его вершин. В свою очередь, вставка нового узла требует проверки наличия узла с такими же координатами. Результатом операции вставки будет код (номер) узла в множестве  $\mathbf{V}$  (новый или существующий, если такой же узел был найден). При удалении узла также необходимо будет удалить инцидентные элементы, а при удалении элемента необходимо удалить только узлы, на которые больше не участвуют в связях.

Для дискретной модели, состоящей из  $m$  узлов и  $q$   $n$ -вершинных элементов, операция вставки узла может быть реализована при помощи линейного алгоритма с вычислительной сложностью  $O(m)$ . Добавление элемента, заданного координатами своих вершин,  $n$  раз потребует выполнения вставки узла и, соответственно, будет обладать вычислительной сложностью  $O(nm)$ . Для формирования множества инцидентных некоторому узлу элементов достаточно будет одного прохода по элементам множества  $\mathbf{E}$ , следовательно, вычислительная сложность этой процедуры будет равна  $q$  операций. В результате при удалении одного элемента потребуется  $nq$  операций, а при удалении узла  $(kn + 1)q$  операций ( $k$  – число инцидентных в узле элементов).

Очевидным недостатком дискретной модели геометрического объекта вида (1) является необходимость использования линейного поиска для формирования списков инцидентных элементов. Эти операции возникают при удалении узлов и элементов, а также распространены при обработке дискретных моделей (например, локальном сглаживании). Для избавления от этого недостатка можно предположить, что каждый узел кроме своих координат хранит еще информацию о множестве смежных элементов. В результате дискретную модель геометрического объекта можно представить в следующем виде.

$$\mathbf{M} = (\mathbf{N}, \mathbf{E}), \tag{2}$$

где  $\mathbf{N} = ((v_1, \mathbf{I}_1), (v_2, \mathbf{I}_2), \dots, (v_m, \mathbf{I}_m))$  – множество пар координат  $i$ -го узла  $v_i$  и множеств инцидентных ему элементов  $\mathbf{I}_i = \{e \in \mathbf{E} : i \in E\}$ ;  $\mathbf{E}$  – такое же, как в (1).

В квадратных скобках можно обозначить операции доступа к элементам множества  $\mathbf{V}$ , а в круглых скобках – к элементам множества  $\mathbf{E}$ . То есть,  $\mathbf{M}[k] = \mathbf{N}[k] = v_k$ ,  $\mathbf{M}(i) = \mathbf{E}[i]$ ,  $\mathbf{M}(i,j) = \mathbf{E}[i][j]$ . Для дискретной модели вида (2) к ним добавится операция получения множества инцидентных элементов:  $\mathbf{M.incident}(k) = \mathbf{I}_k$ . Также положим, что запись  $\mathbf{M.code}(n)$  соответствует коду  $n$  в  $\mathbf{M}$ .

Вставка узла в дискретную модель вида (2) аналогична описанной выше. В результате вставка узла может быть формализована следующим алгоритмом.

**algorithm** insert\_node

**input:**

$\mathbf{M}$  – дискретная модель геометрического объекта

$p$  – координаты узла  
**output:**  
 $k$  – код узла  
**begin**  
  **for each**  $n \in \mathbf{M.N}$  **do**  
    **if**  $\|p - n.v\| < \varepsilon$  **then**  
      **return**  $\mathbf{M.code}(n)$   
    **end if**  
  **end for**  
   $\mathbf{M.N} \leftarrow \mathbf{M.N} \cup \{(p, \emptyset)\}$   
**return**  $\mathbf{M.code}((p, \emptyset))$

Алгоритм вставки нового элемента, заданного списком координат своих вершин, в дискретную модель может быть формализован в виде

**algorithm** insert\_element  
**input:**  
   $\mathbf{M}$  – дискретная модель геометрического объекта  
   $\mathbf{V}$  – список координат вершин  
**begin**  
   $(e, k_e) \leftarrow$  Новый элемент с  $|\mathbf{V}|$  вершинами и его код в  $\mathbf{M.E}$   
  **for each**  $v \in \mathbf{V}$  **do**  
     $e[i] \leftarrow$  insert\_node( $\mathbf{M}, v$ )  
     $\mathbf{M.incident}(e[i]) \leftarrow \mathbf{M.incident}(e[i]) \cup \{k_e\}$   
  **end for**  
   $\mathbf{M.E} \leftarrow \mathbf{M.E} \cup \{e\}$   
**end**

Операция удаления элемента для дискретной модели геометрического объекта вида (2) требует обновления множеств инцидентных элементов в узлах, соответствующих вершинам удаляемого элемента. В результате эта операция может быть записана в виде следующего алгоритма.

**algorithm** remove\_element  
**input:**  
   $\mathbf{M}$  – дискретная модель геометрического объекта  
   $k_e$  – код элемента  
**begin**  
   $e \leftarrow \mathbf{M}(k_e)$   
  **for**  $i = 1$  **to**  $|e|$  **do**  
     $\mathbf{M.incident}(e[i]) \leftarrow \mathbf{M.incident}(e[i]) \setminus \{k_e\}$   
    **if**  $\mathbf{M.incident}(e[i]) = \emptyset$  **then**  
      remove\_node( $\mathbf{M}, e[i]$ )  
    **end if**  
  **end for**  
   $\mathbf{M.E} \leftarrow \mathbf{M.E} \setminus \{e\}$   
**end**

Операция удаления узла, используемая выше, может быть реализована в виде следующего алгоритма.

**algorithm** remove\_node  
**input:**  
   $\mathbf{M}$  – дискретная модель геометрического объекта  
   $k_n$  – номер (код) узла  
**begin**

```

I ← M.incident( $k_n$ )
for each  $k_e \in \mathbf{I}$  do
    remove_element(M, $k_e$ )
end for
M.N ← M.N \ {M.N[ $k_n$ ]}
end
    
```

Операции удаления узлов и элементов можно считать тесно связными друг с другом, т. к., вызов реализация одной из них зависит от реализации другой. Наличие взаимных вызовов в этих алгоритмах подчеркивает важность аккуратности их программной реализации.

Хранение дискретной модели геометрического объекта вида (2) возможно несколькими способами. Ключевыми отличиями между ними находятся в типах данных, используемых для хранения вершин и элементов. Традиционно, когда речь и идет о множествах однотипных экземпляров, противопоставляются две структуры данных: векторная и списковая.

Векторная структура данных базируется на размещении экземпляров в последовательных адресах памяти компьютера, что позволяет осуществлять доступ к элементу по его индексу за  $O(1)$  времени. При этом удаление и вставка в середину новых экземпляров в такую структуру данных связано с линейными затратами времени, вызванными сдвигами массивов данных.

Списковая структура данных основана на включении дополнительно к информационным полям адресных полей-указателей, которые служат для определения связей в списке. Они позволяют быстро удалять и вставлять экземпляры в список, но приводят к увеличению расхода памяти компьютера. Также их итерирование, как правило, является более медленным за счет большей фрагментации оперативной памяти.

Реализовать обе структуры можно в виде композиции трех классов: Mesh, Node и Element (рис. 1). Класс Mesh – абстракция сетки. Он является агрегацией экземпляров классов Node и Element и предоставляет интерфейс для манипулирования ими (добавления, удаления, создания итераторов). Класс Node является абстракцией узла и включает в себя (является композицией) координаты точки, тип узла (внутренний, граничный, характерный) и множество инцидентных элементов. Класс Element – абстракция элемента, которая хранит ссылки на узлы. При списковой реализации узлы и элементы хранятся в двусвязных списках, а в качестве ссылок (на узлы в элементах и на инцидентные элементы в узлах) используются соответствующие адреса памяти. При векторной – узлы и элементы хранятся в динамических массивах, а в качестве ссылок используются их индексы.

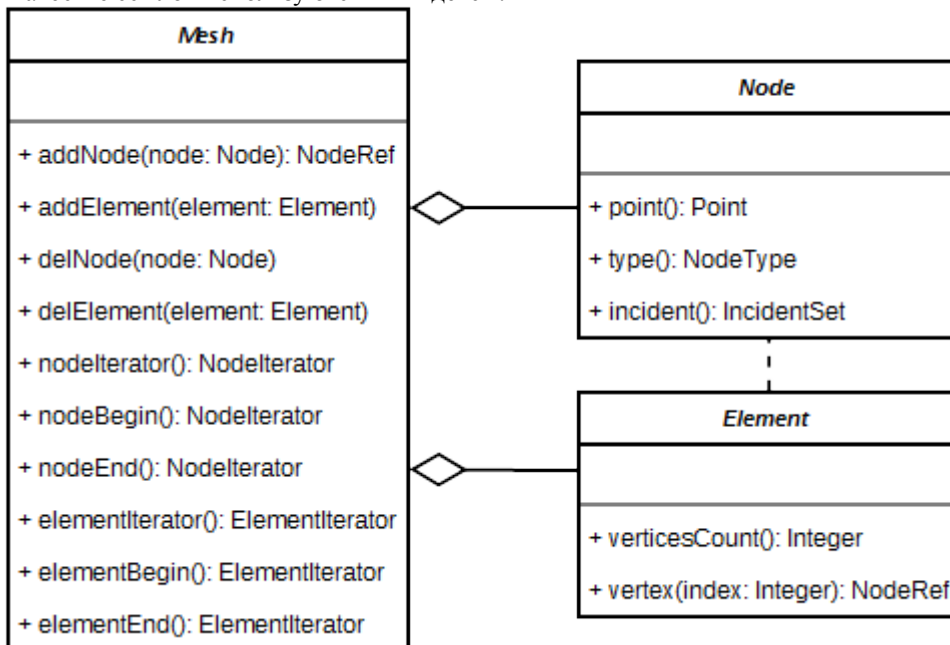


Рис. 1. Диаграмма классов

Рассмотрим две возможные реализации: 1 – основанную на использовании динамических массивов; 2 – основанную на использовании двусвязных списков для хранения узлов и элементов. Для исследования производительности воспользуемся модельными задачами: 1 – добавления произвольного набора восьми вершинных элементов, заданных координатами вершин; 2 – удаления произвольного набора узлов.

В качестве тестового используется компьютер с процессором Intel Core i5, 8 гигабайтами оперативной памяти, который находится под управлением операционной системы на базе Linux. Каждый тест запускается трижды, в результате фиксируется наименьшее время, потраченное на выполнение задачи.

На рис. 2 показана зависимость времени построения дискретной модели от числа элементов. Значения по оси абсцисс основное значение показывает число элементов в модели, а значения в скобках – узлов.

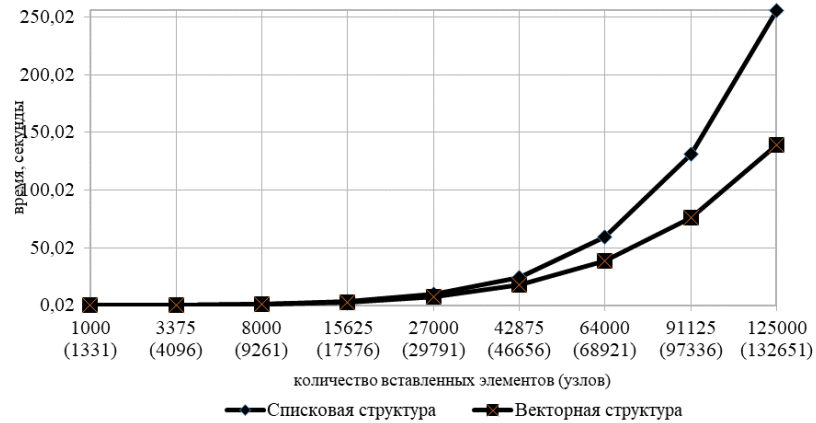


Рис. 2. Зависимость времени построения модели от числа элементов и узлов

Дискретная модель, основанная на динамических массивах (векторная структура), требует меньше времени на формирование дискретной модели относительно аналогичной списковой. В обоих случаях графики имеют вид степенной функции. Вид графика обуславливается тем, что вычислительная сложность

вставки  $n$  вершин с проверкой существования оценивается величиной  $\frac{m}{n} + 1$ .

На рис. 3 показана зависимость времени удаления тысячи узлов от общего их числа в дискретной модели геометрического объекта. Необходимость линейных сдвигов обуславливает существенно более медленное удаление (порядка 8 раз) при использовании векторных структур для хранения узлов и элементов в сравнении с списковыми. В обоих случаях зависимость времени от числа узлов в модели близка к линейной.

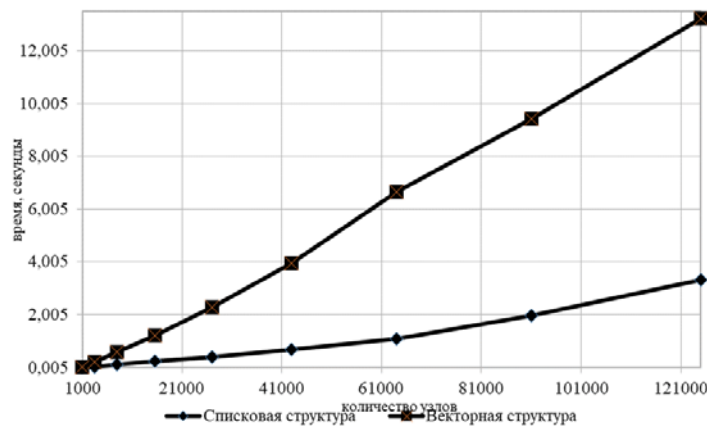


Рис. 3. Зависимость времени удаления 1000 узлов от числа узлов в модели

Для исследования влияния числа удаляемых узлов на время работы рассмотрим дискретную модель (рис. 4), состоящую из 27000 узлов и 24389 элементов. Как и в предыдущем случае, удаление узлов при использовании списковых структур для хранения узлов и элементов существенно быстрее векторных.

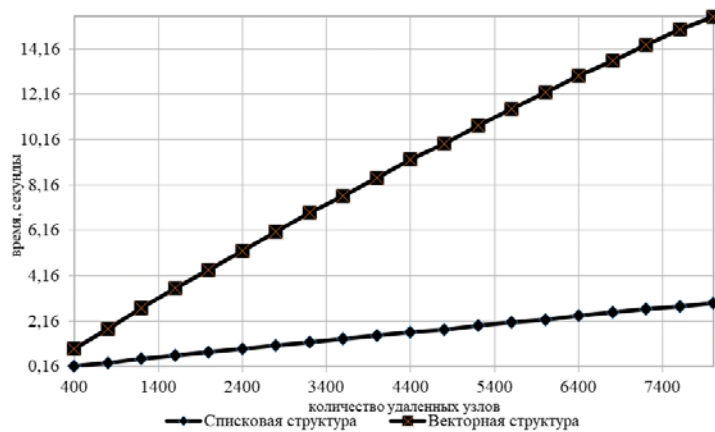


Рис. 4. Зависимость времени от числа удаленных узлов

В то же время, необходимо отметить, что операции удаления узлов и элементов при построении используются реже вставки и итерирования узлов, в которых более эффективными показали себя векторные структуры данных.

### Выводы

Итак, основным научным результатом исследования является подход к формальному описанию дискретных моделей геометрических объектов, который позволяет использовать единую нотацию при изложении методов их автоматической генерации. Хранение вместе с координатами списка инцидентных элементов каждого узла позволяет понизить порядок сложности алгоритмов вставки и удаления узлов.

Серия вычислительных экспериментов для сравнения двух реализаций: на основе списковых и векторных структур данных показала, что первые более эффективны при удалении узлов, а вторые – при безопасном добавлении.

Более высокая эффективность списковых структур при удалении обосновывается тем, что удаление одного экземпляра со списка обладает вычислительной сложностью порядка  $O(1)$ . Недостатком таких структур является отсутствие возможности произвольного доступа (в общем случае доступ к экземпляру по индексу в списке требует итерирования списка).

Векторные структуры располагают экземпляры в последовательных адресах памяти компьютера и позволяют осуществлять произвольный доступ к экземпляру. В результате алгоритмы линейного поиска, используемые при вставке для поиска одинаковых вершин, работают быстрее (в том числе за счет более эффективного использования кэшей процессора). В результате операции вставки в 1,2–2 раза быстрее, чем для списковых. В то же время, векторные структуры практически на порядок медленнее списковых при удалении узлов и элементов модели, что объясняется необходимостью сдвигов массивов данных и обновления индексов. Однако векторные структуры позволяют эффективно распараллелить их итерирование, в том числе при обновлении индексов.

### Список использованной литературы

1. Baumgart B. G. A polyhedron representation for computer vision / B. G. Baumgart // National Computer Conference and Exposition AFIPS'75 : New York, USA, 1975 : proceedings. – ACM, 1975. – P. 589–596.
2. Muuss M. J. Combinatorial solid geometry, boundary representations, and non-manifold geometry / M. J. Muuss, L. A. Butler // State of the Art in Computer Graphics: Visualization and Modeling. – 1991. – Volume 1. P. 185–223.
3. Campagna S. Directed Edges: A Scalable Representation for Triangle Meshes / S. Campagna, L. Kobbelt, H.-P. Seidel // Journal of Graphics Tools. – 1998. – Volume 3, Issue 4. – P. 1–11.
4. Kettner L. Using generic programming for designing a data structure for polyhedral surfaces / L. Kettner // Computational Geometry: Theory and Applications. – 1999. – Volume 13, Issue 1. – P. 65–90.
5. Alumbaugh T. J. Compact array-based mesh data structure / T. J. Alumbaugh, X. Jiao // The 14th International Meshing Roundtable : International Conference, San Diego, California, USA, September 11–14, 2005 : proceedings. – Sandia National Laboratories: Springer-Verlag, 2005. – P. 585–504.
6. Levy B. Circular incident edge list: a data structure for rendering complex unstructured grids / B. Levy, G. Caumon, S. Conreux, X. Cavin // Conference on Visualization : 2001, Washington, DC, USA :IEEE Computer Society, 2001. – P. 191–198.
7. Sieger D. Design, implementation, and evaluation of the surface\_mesh data structure / D. Sieger, M. Botsch // The 20th International Meshing Roundtable : International Conference, 2011 : proceedings. – Sandia: Sandia National Laboratories, 2011. – P. 533–550.

8. Blandford D. K. Compact representation of simplicial meshes in two and three dimensions / D. K. Blandford, G. E. Blueloch, D. E. Cardoze, C. Kadow // *International Journal of Computational Geometry and Applications*. – 2005. – Volume 15, Issue 1. – P. 3–24.
9. Lage M. Chf: A scalable topological data structure for tetrahedral meshes / M. Lage, T. Lewiner, H. Lopes, L. Vehlo // *The XIII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing : Washington, DC, USA, 2005 : proceedings*. – IEEE Computer Society, 2005. – P. 349–356.
10. Isenburg M. Compressing Hexahedral Volume Meshes / M. Isenburg, P. Alliez // *Graphical Models*. – 2003. – Volume 65, Issue 4. – P. 239–257.

# **ВІСНИК**

## **Херсонського національного технічного університету**

Відповідальний за випуск	Хомченко Анатолій Никифорович, д.ф.-м.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України
Технічний редактор	Литвиненко Олена Іванівна к.т.н., доцент
Макетування	Омельчук А.А.

Свідоцтво про державну реєстрацію засобу масової інформації –  
серія КВ № 17371-6141 от 17.12.2010

Підписано до друку 29.08.2018 р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.  
Ум. друк. аркушів 44.18. Замовлення № 12. Тираж 120 прим.

Матеріали друкуються в авторській редакції.  
Відповідальність за достовірність даних, зазначених у статтях,  
несуть їх автори.

© Херсонський національний технічний університет 2018

Видавництво та друк: «ОЛДІ-ПЛЮС»  
73033, м. Херсон, а/с 15  
E-mail: oldi-ks@i.ua  
Свід. ХС № 2 від 16.08.2000 р.