

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ДЗЮБА ВІКТОРІЯ АНАТОЛІВНА**



УДК 004.384

**МЕТОД ТА ЗАСОБИ ПОБУДОВИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ  
КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Черкаси – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Черкаському державному технологічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор  
**Рудницький Володимир Миколайович**,  
Черкаський державний технологічний  
університет, завідувач кафедри інформаційної  
безпеки та комп'ютерної інженерії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент  
**Єременко Володимир Станіславович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря  
Сікорського», завідувач кафедри інформаційно-  
вимірювальної техніки

кандидат технічних наук, старший дослідник  
**Запорожець Артур Олександрович**  
Інститут технічної теплофізики НАН України  
Відділ моніторингу та оптимізації  
теплофізичних процесів,  
старший науковий співробітник відділу  
моніторингу та оптимізації теплофізичних  
процесів

Захист відбудеться «10» лютого 2021 р. о 12<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 73.052.04 при Черкаському державному технологічному університеті за адресою: 18000, Черкаси, бульв. Шевченка, 460, корпус 1, конференц зала.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Черкаського державного технологічного університету за адресою: 18000, Черкаси, бульв. Шевченка, 460.

Автореферат розісланий « 04 » січня 2021 року

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 73.052.04



Бондаренко Ю. Ю.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні дослідження науковців у напрямі підвищення ефективності виробництва оболонкових конструкцій тісно пов'язані з розвитком та вдосконаленням комп'ютерних систем. Найбільш зручними для практичного використання є саме тонкостінні оболонкові конструкції, які можна успішно використати у найрізноманітніших технічних областях; це пояснюється тим, що вони володіють надважливими властивостями, такими як міцність, жорсткість, стійкість.

До елементів, які називають пластинками і оболонками, можна віднести: фланці, дискові пружини, днища поршнів, гумові покриття, сільфони, лопатки турбін, котли, балони, хімічні апарати, камери згорання двигунів, ротори, барабани та корпуси (літаків, вертольотів, ракет, кораблів, ядерних реакторів).

Прогресивні інженерні технології формують новітні підходи до оцінки експлуатаційних характеристик просторових конструкцій, що, в свою чергу, потребує розвитку теорії обчислювальних методів із потужним програмно-апаратним комплексом. Реалізація програмних комплексів передбачається на базі спеціалізованих комп'ютерних систем (СКС), які на практиці дозволять здійснювати розрахунок із підвищеною точністю параметрів напружено-деформованого стану (НДС) задач теорії оболонок в режимі реального часу.

Вагомий внесок у розвиток СКС зробили такі вітчизняні й зарубіжні науковці, як П. М. Гончаров, М. І. Гордійчук, А. О. Мельник, Я. М. Николайчук, В. М. Рудницький, J. Axelson, M. Barr, J. Gannsle, T. Hill, R. Rajsuman та ін.

Незважаючи на те, що при використанні стандартних КС вдається знайти розв'язок великої кількості технічних задач, разом із цим, архітектура універсальних КС не дає можливості успішно вирішувати великомасштабні задачі прикладного характеру, які мають важливе практичне застосування у реальному житті.

Класичним підходом до побудови теорії оболонок є використання гіпотез або спрощувальних пропозицій; перевагою використання такого підходу є те, що вихідні співвідношення мають достатньо просте математичне формулювання, у такий спосіб можна звести вихідні співвідношення тривимірної теорії пружності до двовимірних рівнянь. Наукові праці, присвячені теорії оболонок із застосуванням спрощувальних гіпотез, належать І. Г. Бубнову, Б. Г. Галеркіну, С. П. Тимошенку.

---

Висловлюємо подяку д.ф.-м.н., професору каф. кібербезпеки та інформаційних технологій Університету митної справи та фінансів Стеблянку П.О., за консультативну допомогу в процесі виконання дисертаційної роботи.

Основні теоретичні аспекти стосовно відшукування розв'язку крайових задач механіки деформівного тіла висвітлено у роботах А. В. Баженова, Я. Гаслінгера, О. С. Кравчука, В. М. Кислоокого, В. В. Киричевського, М. Альтенбаха та ін.

Процес моделювання, розрахунку, проектування тонкостінних оболонкових конструкцій є досить проблематичним та має значні обчислювальні труднощі при виконанні граничних умов з достатньою точністю, особливо при проведенні розрахунків НДС таких оболонок.

При підході до вибору методу розв'язання задач теорії оболонок можливими варіантами є аналітичні та чисельні методи, кожен із яких, у конкретній задачі, має свої переваги та недоліки, що обмежує його застосування.

Дослідженням проблематики розвитку аналітичних та чисельних методів для задач механіки деформівного тіла присвячені роботи Я. Й. Бурака, О. М. Гузя, А. О. Камінського, Б. Я. Кантора, В. Д. Кубенка, В. І. Кузьменка, Р. М. Кушніра, В. В. Лободи, В. В. Матвєєва, В. В. Мелешка, В. В. Панасюка, Я. С. Підстригача, Г. М. Савіна, Г. Т. Сулима та багатьох інших. Подальше вдосконалення існуючих чисельних методів та розробка нових методів можливі за умови комбінування ключових підходів аналітичних та напіваналітичних методів.

У процесі створення новітніх конструкцій оболонки забезпечують високу міцність, жорсткість, теплоізоляційні характеристики. Питання розвитку обчислювальних методів для оболонкових конструкцій можна знайти у роботах Х.М. Муштарі, О.Т. Беккера, А.Т. Василенка, Я.М. Григоренка, П. О. Стеблянка, Дж. Кемпнера, А. В. Беляєва, Н. Я. Цимбельмана та ін.

Проте на сьогоднішній день недослідженою залишається область задач механіки деформівного тіла, пов'язаних із розробленням нових підходів до побудови досліджуваної моделі оболонки та нових методів розрахунку її механічних характеристик. Тобто потребує розробки комплексне вирішення крайових задач для тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини.

Вирішення поставлених задач забезпечить підвищення ефективності виробництва тонкостінних оболонок, що, в свою чергу, створює нові перспективи до використання спеціалізованої комп'ютерної системи контролю якості технологічних процесів. Виходячи з цього, виникає необхідність щодо вдосконалення моделі СКС, яка у своїй структурі міститиме функціонал, що дасть змогу виявити виробничий брак на ранніх етапах.

Таким чином, можна констатувати, що тема дисертаційного дослідження «Метод та засоби побудови спеціалізованої комп'ютерної системи контролю якості технологічних процесів виробництва» є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до постанови Президії НАНУ від 20.12.13 №179 «Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2019–2023 рр.», а саме – пп. 1.2.1.2. «Розроблення чисельних, чисельно-аналітичних методів та алгоритмів обчислювальної математики, розв'язування науково-технічних, фундаментальних і прикладних проблем», а також Постанови КМУ від 7 вересня 2011 року №942 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року», а саме – «Технології та засоби розробки програмних продуктів і систем». Результати дисертаційної роботи включені в НДР Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького «Архітектура інтерфейсу й електронні механізми формування ексимерів та ексимерів в мультишарових органічних світлодіодах і транзисторах» (ДР № 0118U003862), у якій автор брала участь як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Основною метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності виробництва тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини за рахунок розробки та впровадження спеціалізованої комп'ютерної системи контролю якості технологічних процесів.

Для досягнення поставленої мети сформульовано і вирішено такі задачі:

- вдосконалити модель спеціалізованої комп'ютерної системи контролю якості технологічних процесів виробництва тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини;
- розробити метод автоматизованого контролю якості технологічних процесів для комп'ютеризованого управління виробництвом тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини;
- реалізувати метод автоматизованого контролю якості технологічних процесів для комп'ютеризованого управління виробництвом тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини та оцінити його ефективність.

**Об'єктом дослідження** є процеси автоматизованого контролю технологічних процесів виробництва.

**Предметом дослідження** є методи та засоби побудови спеціалізованої комп'ютерної системи автоматизованого контролю якості технологічних процесів для комп'ютеризованого управління виробництвом тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини.

**Методи дослідження.** У процесі вдосконалення моделі спеціалізованої комп'ютерної системи керування технологічними процесами використовується математичний апарат механіки деформівного тіла, теорії

пружності, теорії оболонок, диференціальної геометрії. Розробка методу підвищеної точності та швидкості керування контролем якості технологічних процесів базується на положеннях чисельних методів, лінійної алгебри, теорії алгоритмів, математичного аналізу. Для реалізації методу підвищеної точності та оцінки його ефективності було використано теорії: диференціальних рівнянь, пружності, лінійної алгебри із застосуванням методів комп'ютерного моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У процесі вирішення поставлених завдань автором одержано такі наукові результати:

1) вперше розроблено метод автоматизованого контролю якості технологічних процесів для комп'ютеризованого управління виробництвом тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини на основі моделювання напружено-деформованого стану шляхом порівняння зміни розрахункових та реальних параметрів у процесі виробництва, що забезпечило прогнозування завершення технологічного процесу;

2) вдосконалена модель спеціалізованої комп'ютерної системи на основі автоматизованого контролю якості технологічних процесів, що дозволило забезпечити управління виробництвом тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини на основі прогнозування значень параметрів для успішного завершення виробничих процесів;

3) отримали подальший розвиток методи оцінки швидкості та точності управління технологічними процесами на основі реалізації спеціалізованої комп'ютерної системи, шляхом використання розроблених правил і алгоритмів для оцінки збіжності та адекватності моделей для автоматизованого контролю якості технологічних процесів, що забезпечує стійкість управління виробництвом тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини в реальному часі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність роботи полягає в доведенні отриманих наукових результатів до конкретних інженерних методик, алгоритмів, моделей та варіантів розрахункових схем для блоку спеціалізованого програмного забезпечення, які можна успішно використати при вдосконаленні існуючих та побудові нових спеціалізованих комп'ютерних систем.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє отримувати чисельні результати параметрів напружено-деформованого стану циліндричних оболонок змінної товщини для управління виробництвом, інженерного проектування поверхонь та вирішення крайових задач теорії пружності.

Отримані результати дозволили підвищити точність контролю за якістю виробництва в режимі реального часу за рахунок зменшення кількості елементарних операцій на кожній ітерації. За результатами впровадження результатів роботи, отримано підвищення точності на 3 – 5 % та швидкості

роботи комп'ютеризованої системи, яка дала змогу реалізувати управління технологічним процесом в режимі реального часу.

**Реалізація.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до плану НДР Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького. Одержані в ній теоретичні й практичні результати використані та впроваджені у таких закладах, установах, організаціях:

– Випробувальна лабораторія ТОВ «ТЕКСТОН» – інженерні методики для контролю якості технологічних процесів виробництва циліндричних елементів в режимі реального часу. Акт впровадження від 12.09.2019;

– ТОВ «ЧЕРКАСИ-АВТОТЕХ» для вдосконалення спеціалізованої комп'ютерної системи за допомогою розрахункових схем для блоку спеціалізованого програмного забезпечення. Акт впровадження від 22.10.2019;

– Черкаська філія ПВНЗ «Європейський університет» у матеріалах лекційних курсів «Комп'ютерні системи» та «Моделювання систем» бакалаврам за галуззю знань 12 – «Інформаційні технології». Акт впровадження №24/01 від 05.02.2020;

– Черкаський національний університет ім. Богдана Хмельницького – під час викладання дисциплін «Математичне моделювання» та «Операційні системи» бакалаврам за галузями знань 11 – «Математика та статистика» та 12 – «Інформаційні технології». Довідка про впровадження №14/04-а від 21.01.2020.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є самостійно виконаною завершеною роботою здобувача. Наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. Результати, опубліковані в [1, 11, 13, 14], отримані одноосібно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, з питань, що стосуються цього дослідження, автору належать: побудова методу підвищення контролю якості тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини [2], побудова узагальненого комбінованого методу для задач механіки деформівного тіла [3], розробка чисельно-аналітичного варіанту методу дослідження механічних характеристик пластин та оболонок змінної товщини підвищеної точності із використанням сплайнів [4], формулювання математичного представлення операцій, придатного для практичної реалізації [5], розробка основних етапів автоматизації процесів розрахунку напружено-деформованого стану циліндричних оболонок [6], розробка нового способу до побудови спеціалізованої комп'ютерної системи для розрахунку з підвищеною точністю механічних характеристик задач напружено-деформованого стану тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини [7], проведення математичного обґрунтування стосовно використання обчислювальних методів у моделюванні складних систем [8], проведення порівняльної оцінки основних параметрів реалізації методу

підвищеної точності при розв'язанні стаціонарної задачі для оболонки змінної товщини [9], визначення основних підходів при використанні ітераційних методів, на основі яких здійснюється моделювання технічних процесів у складних системах [10], розробка алгоритму реалізації комбінованого методу для розв'язання задач оболонкових конструкцій змінної товщини [12].

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на IX Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології в економіці, освіті та соціальній сфері» (Сімферополь, 13–14 березня 2014 р.), на Міжнародній науково-технічній конференції «Математичні проблеми технічної механіки – 2014» (Дніпропетровськ, 14–17 квітня 2014 р.), XVI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми природничих та гуманітарних наук у дослідженнях молодих вчених» (Черкаси, 24–25 квітня 2014 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми гуманітарних та природничих наук» (Одеса, 3–4 квітня 2015 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика. Математика. Автоматика» (Суми, 20–25 квітня 2015 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології в моделюванні» (Миколаїв, 24–25 березня 2016 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика. Математика. Автоматика» (Суми, 18–22 квітня 2016 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи викладено в 14 друкованих працях, у тому числі: в 6 статтях у фахових виданнях України, 1 статті в закордонному виданні; 7 тезах доповідей на міжнародних, всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації – 147 сторінок. Основний зміст викладений на 116 сторінках, у тому числі 10 таблиць, 16 рисунків. Список використаних джерел містить 135 найменувань. Робота містить 3 додатки на 9 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** дисертаційного дослідження обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету дослідження та визначено задачі для її реалізації, описано наукову новизну та практичне значення результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** здійснено огляд сучасного стану та перспективних напрямів розвитку комп'ютерних систем та їх компонентів, проведено огляд сучасних методів і засобів для моделювання та розрахунку механічних характеристик напружено-деформованого стану тонкостінних циліндричних



оболонок змінної товщини. Наведено обґрунтування необхідності вдосконалення моделі спеціалізованої комп'ютерної системи керування технологічними процесами на основі методу контролю якості виробництва тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини.

Проаналізовано та вказано основні напрямки підвищення якості виробництва тонкостінних оболонкових конструкцій. Виявлено, що одним із перспективних напрямів розвитку спеціалізованих комп'ютерних систем для вирішення задач механіки деформівного тіла є використання комбінованих методів, які дозволять успішно спрогнозувати завершення технологічного процесу.

Висловлено припущення про можливість підвищення якості технологічних процесів виробництва в режимі реального часу шляхом використання нового підходу до проектування структури спеціалізованої комп'ютерної системи, який дозволяє розраховувати ключові невідомі напружено-деформованого стану циліндричних оболонок змінної товщини за рахунок використання комбінованого чисельно-аналітичного методу підвищеної точності. Сформульовано мету, задачі та наукову новизну дисертаційного дослідження.

**Другий розділ** присвячений вдосконаленню моделі СКС для контролю технологічних процесів виробництва тонкостінних просторових конструкцій високої складності. Проведений огляд та формування математичного апарату для спрощення задач механіки деформівного тіла, зокрема гіпотези Кірхгофа – Лява, принципу Лагранжа, які можна використовувати для зведення вихідної тривимірної задачі про деформацію тонкостінної циліндричної оболонки до двовимірної задачі про деформацію деякої координатної поверхні.

Високий рівень розвитку сучасної техніки потребує збереження надійності та міцності конструктивних систем, що приводить до виникнення нових теорій та необхідності розроблення методів розрахунку із підвищеною точністю для елементів теорії оболонок, які локалізуються на базі СКС.

У зв'язку з цим виникає потреба вдосконалити модель спеціалізованої комп'ютерної системи для підвищення точності і своєчасності управління виробництвом. Для досягнення зазначеного результату нами взято за основу систему автоматизованого контролю якості технологічних процесів, вдосконаливши її засобами моделювання.

У процесі подальших досліджень побудовано загальну структуру СКС, яка представлена на рис. 1.

Запропоноване вдосконалення дало змогу забезпечити управління виробництвом тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини на

основі прогнозування значень параметрів для успішного завершення виробничих процесів.

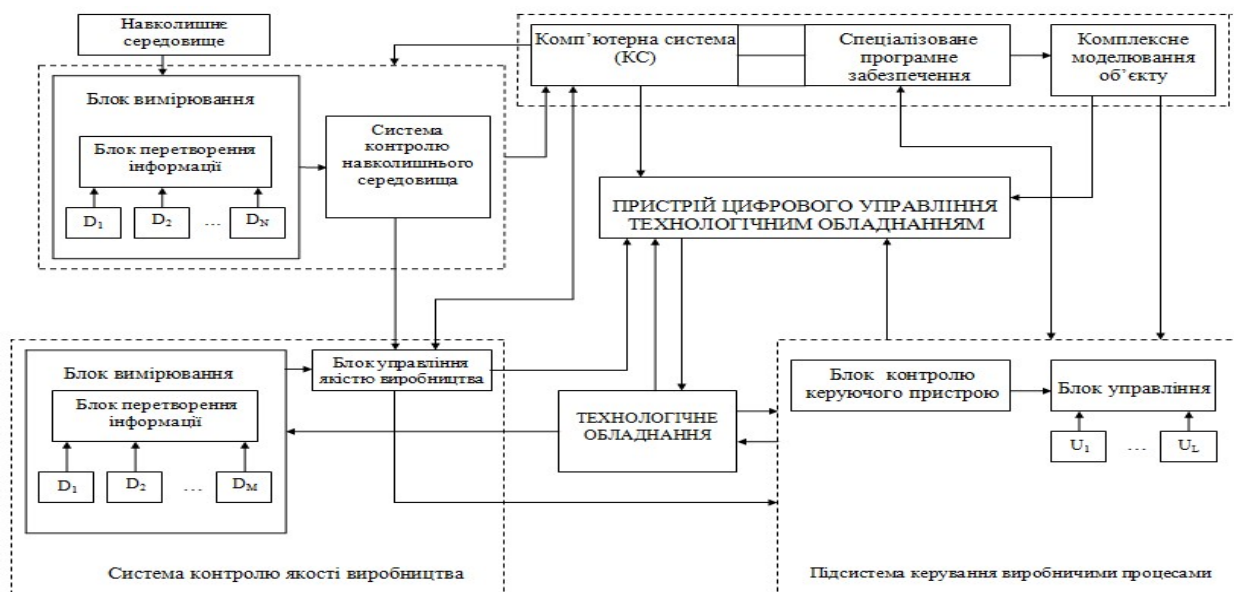


Рис. 1. Узагальнена схема спеціалізованої комп'ютерної системи

Представлена вдосконалена модель СКС, яка містить множину всіх функціональних блоків та взаємозв'язки між ними, а саме:

- 1) Система контролю навколишнього середовища:  $G_K = f(G_B)$ , де  $G_{\hat{A}}(F_{n1}({}^3_1), F_{n2}({}^3_2), \dots, F_{nm}({}^3_n))$  – функція роботи блоку вимірювання інформації;
- 2) Система контролю якості виробництва:  $S_K = f(S_B)$ , де  $S_{\hat{A}}(Q_{m1}(j_1), Q_{m2}(j_2), \dots, Q_{mm}(j_m))$  – функція взаємозв'язків для блоку вимірювання інформації;
- 3) Підсистема керування виробничими процесами:  $P_K = f(P_Y)$ , де  $P_Y(Y_{l1}(t_1), Y_{l2}(t_2), \dots, Y_{ll}(t_l))$  – функція роботи блоку керування.

Структурний опис моделі СКС деталізовано за рахунок представленої математичної формалізації комплексної моделі об'єкта:

$$B_M = f(\Delta t, Y_i), i = \overline{1;19};$$

$$Y_i = \{U, V, W, W', \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{12}, \chi_1, \chi_2, \chi_{12}, N_1, N_2, S, Q_1, Q_2, M_1, M_2, H, H'\};$$

$$\Delta t = t_k - t_n,$$

де  $\Delta t$  – максимально допустимий час зміни сигналів керування технологічним обладнанням;

$\Delta t'$  – розрахунковий час зміни сигналів керування технологічним обладнанням із урахуванням часових обмежень вихідної моделі;

$\Delta t' \geq \Delta t$  – відсутній контроль за керуванням якістю технологічного процесу в режимі реального часу;

$\Delta t' < \Delta t$  – відбувається контроль за керуванням якістю технологічного процесу в режимі реального часу;

$$\Delta t = t_{\min} - t_{\max}^* ;$$

$t_{\min}$  – мінімальний час керування контролем якості параметрів моделі;

$t_{\max}^*, t_{\min}^*$  – максимальний та мінімальний час розрахунку контролю якості параметрів моделі.

Керування в режимі реального часу можливе при умові, що  $t_{\min} - t_{\max}^* > 0$ .

Передбачається, що успішна практична реалізація наведеної структури СКС дозволить продуктивно організувати виробничий процес із мінімальними затратами сировини.

Подальші дослідження проводились для організації роботи блоку спеціалізованого програмного забезпечення, який в основі міститиме розрахунковий метод підвищеної точності для розрахунку основних параметрів напружено-деформованого стану тонкостінних оболонок змінної товщини.

При розробці чисельно-аналітичного методу підвищеної точності за основу було взято наступні припущення та співвідношення: 1) виконання гіпотези Кірхгофа – Лява, припущень за В. В. Новожиловим та узагальненого закону Гука; 2) введені інтегральні характеристики замість компонент тензора напружень – нормальні зусилля та згинальні моменти; 3) співвідношення пружності для встановлення зв'язку між внутрішніми зусиллями, моментами і компонентами деформації; 4) принцип Лагранжа для побудови диференціальних рівнянь рівноваги елемента координатної поверхні.

Проте успішне практичне застосування рівнянь, отриманих зведенням тримірних моделей теорії пружності до двомірних, неможливе без використання комбінованих підходів існуючих обчислювальних методів. Потребує додаткового дослідження питання зниження порядку для комплексної математичної моделі системи диференціальних рівнянь в частинних похідних. Це пов'язано з тим, що з'являються математичні та обчислювальні труднощі при виконанні граничних умов із достатньою точністю, які неможливо вирішити, використовуючи відомі наближені методи розрахунку.

Результати подальших досліджень замкненої системи диференціальних рівнянь, які описують напружено-деформований стан циліндричної оболонки, дозволили створити новий підхід до розрахунку механічних характеристик та довести його коректність, що забезпечило можливість побудови комбінованого чисельно-аналітичного методу підвищеної точності.

Основні результати розділу опубліковані в [4 – 6, 8, 13].

Третій розділ присвячений побудові автоматизованого методу контролю якості технологічних процесів виробництва тонкостінних оболонок, який

дозволить прогнозувати значення необхідних фізико-технічних характеристик.

При розробці даного методу за основу було використано припущення, що геометричні та механічні властивості оболонки, способи її закріплення і навантаження вибрані таким чином, що виконується гіпотеза Кірхгофа – Лява. Це дозволило вихідну тривимірну задачу, у постановці Х. М. Муштарі, Л. Г. Донелла, В. З. Власова, про деформацію тонкостінної циліндричної оболонки, звести до двовимірної задачі про деформацію деякої координатної поверхні. Замість компонент тензора напружень вводяться інтегральні характеристики – нормальні зусилля та згинальні моменти.

Таким чином, було встановлено наступну систему рівнянь, яка описує напружено-деформований стан ізотропної циліндричної оболонки, що знаходиться під дією несиметрично розподіленого поверхневого та контурного силового навантаження  $q_z$  при умові, що  $q_x = q_y = 0$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U(x,y)}{\partial x} = -\frac{W(x,y)}{R_1} + \varepsilon_1(x,y); \quad \frac{\partial V(x,y)}{\partial x} = -\frac{\partial U(x,y)}{\partial y} + \varepsilon_{12}(x,y); \quad \frac{\partial W(x,y)}{\partial x} = W'(x,y); \\ \frac{\partial W'(x,y)}{\partial x} = -\chi_1(x,y); \quad \frac{\partial N_1(x,y)}{\partial x} = -\frac{\partial S(x,y)}{\partial y}; \quad \frac{\partial S(x,y)}{\partial x} = -\frac{\partial N_2(x,y)}{\partial y}; \\ \frac{\partial M_1(x,y)}{\partial x} = -\frac{\partial H(x,y)}{\partial y} + Q_1(x,y); \quad \frac{\partial H(x,y)}{\partial x} = H'(x,y); \\ \frac{\partial Q_1(x,y)}{\partial x} = -\frac{\partial Q_2(x,y)}{\partial y} + \frac{N_2(x,y)}{R_2} - q_z; \\ H'(x,y) = 2\frac{\partial D_{66}(x,y)}{\partial x} \chi_{12}(x,y) + 2D_{66}(x,y) \frac{\partial \chi_1(x,y)}{\partial y}; \\ N_2(x,y) = C_{12}\varepsilon_1(x,y) + C_{22}\varepsilon_2(x,y); \quad M_2(x,y) = D_{12}\chi_1(x,y) + D_{22}\chi_2(x,y); \\ Q_2(x,y) = H'(x,y) + \frac{\partial M_2(x,y)}{\partial y}; \\ \varepsilon_1(x,y) = \frac{1}{C_{11}}(N_1(x,y) - C_{12}\varepsilon_2(x,y)); \quad \varepsilon_2(x,y) = \frac{\partial V(x,y)}{\partial y} + \frac{W(x,y)}{R_2}; \quad \varepsilon_{12}(x,y) = \frac{S(x,y)}{C_{66}}; \\ \chi_1(x,y) = \frac{1}{D_{11}}(M_1(x,y) - D_{11}\chi_2(x,y)); \quad \chi_2(x,y) = -\frac{\partial^2 W(x,y)}{\partial y^2}; \quad \chi_{12}(x,y) = -\frac{\partial W'(x,y)}{\partial y}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $U$  – переміщення за твірною;  $V$  – переміщення, яке напрямлене по дотичній до серединної поверхні оболонки;  $W$  – переміщення, яке напрямлене вздовж нормалі до поверхні;  $N_1, N_2$  – нормальні зусилля;  $S$  – зусилля зсуву;  $Q_1, Q_2$  – поперечні зусилля;  $H$  – скручувальний момент;  $M_1, M_2$  – згинальні моменти;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}, \chi_1, \chi_2, \chi_{12}$  – тангенціальні та згинні деформації.

Розглянуто круговий поперечний переріз серединної поверхні із радіусом  $R$ , де товщина оболонки варіюється у окружному та меридіональному напрямках.

Припускається, що один торець оболонки жорстко закріплений для  $x=0$ , а інший – шарнірно  $x=L$ . Разом з цим, закріплення оболонки на краях забезпечує її вільне переміщення у напрямку, перпендикулярному до її серединної поверхні.

Виходячи з цього, граничні умови для системи рівнянь (1) представляються у вигляді (2):

$$\begin{aligned} x=0, u=v=w=0, w' &= \frac{\partial w}{\partial x} = 0; \\ x=L, u=v=w=0, w'' &= \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Розв'язання, в замкнутій формі, великомасштабних рівнянь теорії оболонок є не завжди можливим через досить непросту структуру диференціальних рівнянь, тому прийнято використовувати дещо спрощені математичні методи та наближені методи розрахунку. Оскільки, залежно від вибору методу дослідження, задачу механіки можна звести до розв'язання СЛАР, що значно спрощує процедуру отримання розв'язків. Для цього, ввівши позначення для невідомих параметрів системи (1), отримали загальний матричний вигляд вихідної задачі із узагальненими граничними умовами:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{Y}}{dx} &= A(x) \cdot \vec{Y} + \vec{f}(x), \\ 0 \leq x \leq L, \quad \vec{Y}(0) &= \vec{Y}_0, \quad \vec{Y}(L) = \vec{Y}_L. \end{aligned} \quad (3)$$

Для зручності міркувань, було виокремлено із системи (1) диференціальні рівняння в загальному вигляді:

$$\frac{d\vec{Y}}{dx} = \vec{F}(x, Y_n), \quad n=1,2,\dots,9. \quad (4)$$

Побудовано розрахунковий алгоритм шляхом комбінування підходів кількох відомих методів, а саме: організовано ітераційну процедуру всередині методу прогонки із використанням відомих виразів [4] для сплайн-апроксимації при фіксованих значеннях коефіцієнтів –  $n_0=8$ ;  $k_0=1$ ;  $k_1=11$ ;  $k_2=18$ ;  $k_3=9$ ;  $k_4=2$ ;  $k_5=3$ ;  $k_6=6$ . Такий підхід дозволив додати деяке мале значення  $h$ . Виведено розрахункові формули для організації прямого ходу методу прогонки для системи (4) для  $n=1,4$

$$U_0 = U_*$$

$$\begin{aligned} U_1^k &= \frac{1}{k_2} (6hf_{10}^{k-1} + k_1 U_0 + k_3 U_2^{k-1} - k_4 U_3^{k-1}) \\ U_2^k &= \frac{1}{k_6} (6hf_{11}^{k-1} + k_4 U_0 + k_5 U_1^{k-1} + k_0 U_3^{k-1}) \\ U_3^k &= \frac{1}{k_6} (6hf_{12}^{k-1} + k_4 U_1^{k-1} + k_5 U_2^{k-1} + k_0 U_4^{k-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

.....

$$U_i^k = \frac{1}{k_6} (6hf_{i-1}^{k-1} + k_4 U_{i-2}^{k-1} + k_5 U_{i-1}^{k-1} + k_0 U_{i+1}^{k-1}); i = 2, 3, \dots, N-1$$

$$U_{i+1}^k = \frac{12h}{n_0} f_{i+1}^{k-1} + U_{i-1}^{k-1} + \frac{k_0}{n_0} (U_{i+2}^{k-1} - U_{i-2}^{k-1}); i = 2, 3, \dots, N-2$$

$$U_N^k = \frac{6}{17} h (3f_{1N-1}^{k-1} + f_{1N}^{k-1}) + \frac{9}{17} (U_{N-1}^{k-1} + U_{N-2}^{k-1}) - \frac{1}{17} U_{N-3}^{k-1}$$

та, відповідно, зворотного ходу методу прогонки для системи (4) при  $n = \overline{5, 9}$

$$V_0^k = -\frac{6}{17} h [f_{20}^{k-1} + 3f_{21}^{k-1}] + \frac{9}{17} (V_1^{k-1} + V_2^{k-1}) - \frac{1}{17} V_3^{k-1}$$

$$V_{j-1}^k = \frac{1}{n_0} (-12hf_{2j}^{k-1} - k_0 (V_{j+2}^{k-1} - V_{j-2}^{k-1}) + V_{j+1}^{k-1}); j = 2$$

$$V_j^k = \frac{1}{k_6} (-6hf_{2j+1}^{k-1} + k_0 V_{j-1}^{k-1} + k_5 V_{j+1}^{k-1} + k_4 V_{j+2}^{k-1}); j = N-2; N-3; \dots; 3, 2 \quad (6)$$

$$V_{N-2}^k = \frac{1}{k_6} (-6hf_{2N-1}^{k-1} + k_0 V_{N-3}^{k-1} + k_5 V_{N-1}^{k-1} + k_4 V_N^{k-1})$$

$$V_{N-1}^k = \frac{1}{k_2} (-6hf_{2N}^{k-1} - k_4 V_{N-3}^{k-1} + k_3 V_{N-2}^{k-1} + k_1 V_N^{k-1})$$

$$V_N = V_*$$

Відзначено, що при організації зворотного ходу для методу прогонки, окрім відповідних крайових умов для системи диференціальних рівнянь (4) при  $n = \overline{5, 9}$ , очевидним є виконання наступних рівностей:

$$N_1 = 0; S = 0; \dot{I}_1 = 0; \dot{I} = 0; Q_1 = 0.$$

Таким чином, описаний комбінований метод є достатньо простим, легко алгоритмізується та включає прямий та зворотній хід, що характерно для методу прогонки, а всередині алгоритму організована ітераційна процедура із використанням коефіцієнтів сплайн-апроксимації.

Перевага цього методу полягає в тому, що ми отримуємо явні розрахункові формули; так як система може бути громіздкою в залежності від кількості кроків по  $x$ , то відшукання її розв'язку добре відомими методами може викликати труднощі, оскільки не вдасться знайти обернену матрицю. Крім цього, ми отримуємо стійку різницеву схему, яка залежить від кроків дискретизації та стійку обчислювану схему, яка базується на використанні «прямого» та «оберненого» ходу для відшукання розв'язку вихідної системи.

При використанні такого роду чисельно-аналітичних методів виникає необхідність до розв'язання систем рівнянь з матрицями, у складі яких переважають нулі, а ненульові елементи розташовані на головній діагоналі і на суміжних до неї діагоналях. Ключовими питаннями при реалізації чисельно-аналітичних методів є проблеми збіжності та стійкості (помилка не зростає в ході процесу обчислень).

Виходячи з цього, виникає необхідність до визначення умов збіжності ітераційного процесу для запропонованого варіанту методу прогонки. Для

того щоб покращити збіжність та точність в ітераційному методі, потрібно підібрати необхідну кількість апроксимуючих елементів, при якій поставлена задача буде стійкою, а також не менш важливо здійснити на кожній ітерації вдалий перехід вихідних параметрів задачі при проведенні дискретизації без втрати існуючих зв'язків.

Для досягнення збіжності та підвищення точності розрахункових результатів запропоновано новий підхід [11], а саме – по-іншому представити апроксимацію похідної із використанням спеціальних коефіцієнтів  $\alpha$  та за рахунок перетворень матриці вихідної системи (3).

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} & A_{57} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{64} & A_{65} & A_{66} & A_{67} & A_{68} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{75} & A_{76} & A_{77} & A_{78} & A_{79} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{86} & A_{87} & A_{88} & A_{89} & A_{8 \times 10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{97} & A_{98} & A_{99} & A_{9 \times 10} & A_{9 \times 11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{10 \times 7} & A_{10 \times 8} & A_{10 \times 9} & A_{10 \times 10} & A_{10 \times 11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{11 \times 7} & A_{11 \times 8} & A_{11 \times 9} & A_{11 \times 10} & A_{11 \times 11} \end{pmatrix}$$

Сформульовано умови для успішної реалізації ітераційного процесу запропонованого комбінованого чисельно-аналітичного методу підвищеної точності за допомогою СКС: необхідно і достатньо, щоб модулі діагональних коефіцієнтів вихідної системи мали перевагу, тобто були більшими у порівнянні з модулями недіагональних коефіцієнтів цієї системи (вільні члени при цьому не беруться до уваги).

$$y'_i = \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^6 \alpha_j y_i, \text{ де } \alpha_j \geq 0 \text{ та } \sum_{j=1}^6 \alpha_j = 1.$$

Встановлено, що використання різних способів апроксимації похідної дає змогу:

- 1) представляти нові способи наближення до результату із необхідною точністю;
- 2) робити вибір необхідних за складом та кількістю арифметичних операцій;
- 3) власноруч визначати межі досліджуваного інтервалу та норм допустимої похибки обчислень.

Значною перевагою запропонованого методу є те, що при практичному застосуванні можна отримати результати, максимально наближені до точних, за рахунок дискретного подання апроксимації. Розроблені правила до побудови комбінованого методу підвищеної точності дають змогу

автоматизувати його побудову як на програмному, так і на апаратному рівнях.

Основні результати розділу опубліковані в [1, 3, 9, 11, 12, 14].

**Четвертий розділ** присвячений розгляду реалізації чисельно-аналітичного методу підвищеної точності у складі блоку спеціалізованого програмного забезпечення для СКС контролю якості технологічних процесів, а також оцінюванню ефективності його використання.

На основі розроблених правил та алгоритмів створено програмний комплекс на MATLAB, що в кінцевому результаті дозволяє отримати чисельно-аналітичний розв'язок. Структурна схема реалізації методу автоматизованого контролю якості технологічних процесів на основі прогонки для блоку спеціалізованого програмного забезпечення представлена на рис. 2.

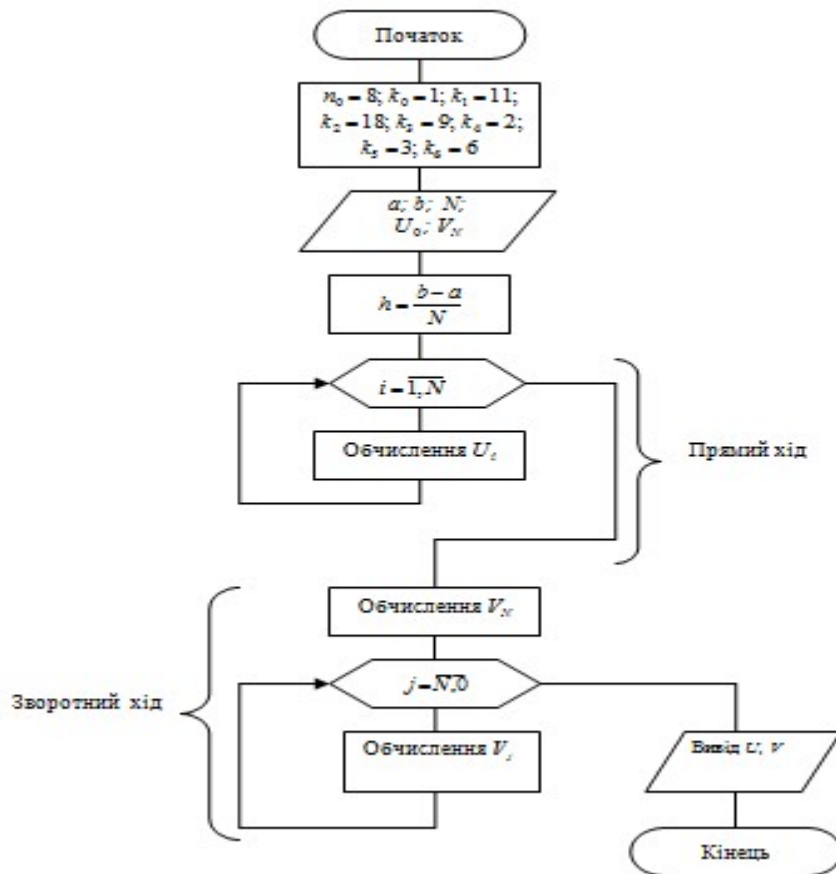


Рис. 2. Алгоритм реалізації методу автоматизованого контролю якості технологічних процесів

Для вихідної системи (3) було отримано значення основних невідомих, що дозволяє, на наступному етапі дослідження, безпосередньо за допомогою геометричних та фізичних співвідношень знайти деформації, кривизни, скрут, питомі зусилля та питомі моменти. Результати практичної реалізації ітераційної процедури (5 – 6) наведено в табл. 1, 2.



Таблиця 1

**Чисельні результати комбіновано-аналітичного методу для  
циліндричної оболонки сталої товщини із заданими початковими  
умовами**

Сітка Ox/Oy	x=0	x=2	x=4	x=6	x=8	x=10	x=12	x=14	x=16	x=18	x=20
y=0	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0	-0,001
y=2	0	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,002	-0,002	-0,001	0	-0,000
y=4	0,000	0	0	-0,001	-0,022	-0,025	-0,018	-0,001	-0,001	0	-0,000
y=6	0,000	0	-0,001	-0,002	-0,032	-0,038	-0,029	-0,008	-0,003	-0,000	-0,000
y=8	0,000	-0,001	-0,011	-0,027	-0,041	-0,045	-0,035	-0,026	-0,014	-0,005	-0,001
y=10	0	-0,004	-0,014	-0,032	-0,043	-0,056	-0,045	-0,037	-0,028	-0,016	-0,007
y=12	0,000	-0,001	-0,011	-0,027	-0,041	-0,045	-0,035	-0,026	-0,014	-0,005	-0,001
y=14	0,000	0	-0,001	-0,002	-0,032	-0,038	-0,029	-0,008	-0,003	-0,000	-0,000
y=16	0,000	0	0	-0,001	-0,022	-0,025	-0,018	-0,001	-0,001	0	-0,000
y=18	0	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,002	-0,002	-0,001	0	-0,000
y=20	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0	-0,001

Таблиця 2

**Чисельні результати комбіновано-аналітичного методу для  
циліндричної оболонки із змінною по x товщиною та заданими  
початковими умовами**

Сітка Ox/Oy	x=0	x=2	x=4	x=6	x=8	x=10	x=12	x=14	x=16	x=18	x=20
y=0	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0	-0,001
y=2	0	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,001	-0,001	-0,001	0	-0,000
y=4	0,000	0	0	-0,001	-0,009	-0,011	-0,009	-0,001	-0,001	0	-0,000
y=6	0,000	0	-0,001	-0,002	-0,014	-0,018	-0,010	-0,005	-0,002	-0,000	-0,000
y=8	0,000	-0,001	-0,007	-0,017	-0,021	-0,025	-0,018	-0,021	-0,012	-0,003	-0,001
y=10	0	-0,003	-0,012	-0,023	-0,029	-0,034	-0,031	-0,027	-0,022	-0,014	-0,005
y=12	0,000	-0,001	-0,007	-0,017	-0,021	-0,025	-0,018	-0,021	-0,012	-0,003	-0,001
y=14	0,000	0	-0,001	-0,002	-0,014	-0,018	-0,010	-0,005	-0,002	-0,000	-0,000
y=16	0,000	0	0	-0,001	-0,009	-0,011	-0,009	-0,001	-0,001	0	-0,000
y=18	0	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,001	-0,001	-0,001	0	-0,000
y=20	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0	-0,001

Проведено порівняльний аналіз результатів, які отримані при одному і тому ж навантаженні для ідеальної циліндричної оболонки (табл. 1, коли  $k_1=0$ ,  $k_2=0$ ) та оболонки зі змінною по  $x$  товщиною (табл. 2, коли  $k_1=0,05$ ;  $k_2=0,001$ ).

Ітераційний алгоритм всередині методу прогонки дозволив покращити процедуру отримання розв'язку у відповідності до встановленого критерію (3.15) у підрозділі 3.4 дисертаційного дослідження. Використання даних умов для успішної організації ітераційного процесу автоматизовано та наведено на рис 3. та рис 4.

Точність прогнозування значень для невідомих параметрів будемо визначати по адекватності рішення крайової задачі, необхідної для програмної реалізації методу.

```

File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 - f = fopen('result.txt', 'w');
2 - p = fopen('result1.txt', 'w');
3 - k = [4,5,6,6,5,4];
4
5 - for j = 0:1:5
6 -     fprintf(f, 'Row %u\n', j+1);
7 -     fprintf(p, 'Row %u', j+1);
8 -     m = zeros(6);
9 -     n = 0; % max b
10 -    AR = k_set(k(j+1));
11 -    for i = 1:length(AR)
12 -        a = AR(i,:);
13 -        if (not (sum(a) == 1))
14 -            continue;
15 -        end
16 -        [b,c,d] = g(a,j);
17 -        if ((abs(b) > d) && ((b+c) == 0) && (min(a(1:k(j+1))) > 0))
18 -            fprintf(p, '.');
19 -            fprintf(f, '%4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f\n', a);
20 -            if (abs(n) < abs(b))
21 -                m = a; n = b;
22 -            end
23 -        end
24 -    end
25 -    [b,c,d] = g(m,j);
26 -    fprintf(p, '\n%4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f\n%6.4f\n', m, 1);
27 -    fprintf(p, '%6.2f %6.2f %6.2f\n', b, c, d);
28 - end
29
30 - fclose(p);
31 - fclose(f);
32

```

Рис. 3. Програмна реалізація критерію для ітераційного процесу

```

File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 function [ b ] = check( a )
2 -     b = 1;
3 -     for j = 0:5
4 -         ac = 0;
5 -         ar = [];
6 -         for i = 0:5
7 -             if i == j
8 -                 ac = A(j,i,a);
9 -             else
10 -                ar(i+1) = A(j,i,a);
11 -            end
12 -        end
13 -        am = abs(max(ar));
14 -        if ((ac <= am) || (sum(ar) >= 1))
15 -            b = 0;
16 -        end
17 -    end
18 - end
19

```

Рис.4. Програмна реалізація вимог до головної матриці методу

Використаємо тестову задачу (7), модель точного розв'язку якої є відомою:

$$y'(x) = \frac{x}{z(x)}; \quad z'(x) = -\frac{x}{y(x)}, \quad 0 \leq x \leq 1$$

$$y(0) = 1, z(1) = 1$$

(7)

Якщо припустити, що  $y(x, \alpha), z(x, \alpha)$  – розв'язки задачі Коші, то

$$y'(x, \alpha) = \frac{x}{z(x, \alpha)}; \quad z'(x, \alpha) = -\frac{x}{y(x, \alpha)}, \quad y(0, \alpha) = 1, \quad z(0, \alpha) = \alpha.$$

Точний розв'язок матиме вигляд  $y(x, \alpha) = e^{\frac{x^2}{2\alpha}}, z(x, \alpha) = 2\alpha e^{-\frac{x^2}{2\alpha}}$ .

На рис. 5 та рис. 6 наведено чисельні результати для системи (7) та їх порівняння з точним розв'язком.

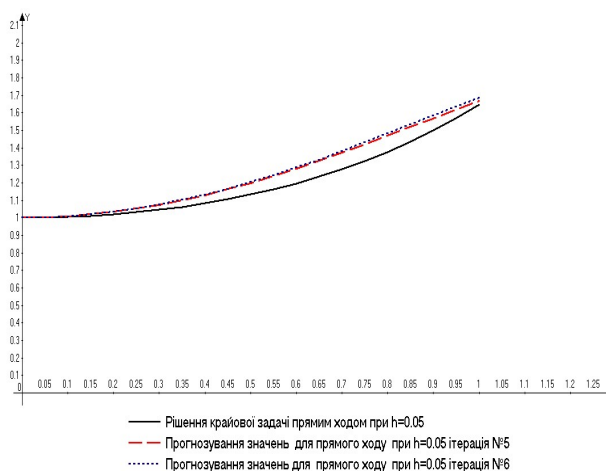


Рис. 5. Точність прогнозування крайових умов при різних варіантах прямого ходу прогонки

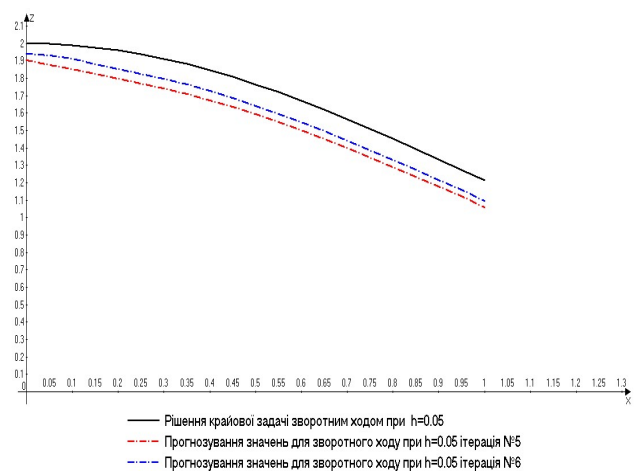


Рис.6. Точність прогнозування крайових умов при різних варіантах зворотного ходу прогонки

Проведені модельні дослідження показали, що організована нами ітераційна процедура з використанням сплайнів є успішною у використанні та збігається за 4–5 ітерацій з допустимою максимальною відносною похибкою в 1 %.

Крім цього, за результатами реалізації запропонованого алгоритму автоматизованого методу контролю якості технологічних процесів виробництва, на прикладі задачі зі змінною та сталою товщиною циліндричної оболонки, було доведено, що зменшилася кількість елементарних операцій на кожній із ітерацій близько 5 % у порівнянні з отриманими результатами за відомими методами. Тобто, використання запропонованої структури спеціалізованої комп'ютерної системи дало змогу підвищити контроль якості виробництва в режимі реального часу та продуктивно організувати виробничі процеси з мінімальними затратами сировини.

Основні результати розділу опубліковані в [2, 7, 10].

У **додатках** наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи та результати обчислювальних експериментів.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено важливу науково-технічну задачу підвищення ефективності виробництва тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини за рахунок розробки та впровадження спеціалізованої комп'ютерної системи (СКС) контролю якості технологічних процесів.

1. Вдосконалено модель спеціалізованої комп'ютерної системи для керування технологічними процесами в режимі реального часу, яка відрізняється наявністю елементів контролю керування, що забезпечує підвищення ефективності технологічних процесів. Це вдосконалення дозволило забезпечити управління виробництвом тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини на основі прогнозування значень параметрів для успішного завершення виробничих процесів.

2. Розроблено метод автоматизованого контролю якості технологічних процесів для комп'ютеризованого управління виробництвом тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини на основі моделювання напружено-деформованого стану шляхом порівняння зміни розрахункових та реальних параметрів у процесі виробництва, що забезпечило прогнозування завершення технологічного процесу. Прогнозування розрахункових показників реалізовано за рахунок організації ітераційної процедури з використанням сплайнів, які дозволяють забезпечити точність та швидкість реалізації методу.

3. Отримали подальший розвиток методи оцінки швидкості та точності управління технологічними процесами на основі реалізації спеціалізованої комп'ютерної системи. Розроблено підхід для оцінки ефективності запропонованого комбінованого методу за рахунок використання розроблених правил і алгоритмів для оцінки збіжності та адекватності моделей для автоматизованого контролю якості технологічних процесів, що забезпечує стійкість управління виробництвом тонкостінних циліндричних

оболонки змінної товщини. Підвищення точності та швидкості обчислень досягнуто за рахунок перетворень матриці вихідної системи та використання спеціальних коефіцієнтів. Отримані результати дозволили застосувати метод автоматизованого контролю якості технологічних процесів для комп'ютеризованого управління виробництвом у реальному часі.

4. Практична цінність роботи полягає в доведенні отриманих наукових результатів до конкретних інженерних методик, алгоритмів, моделей та варіантів розрахункових схем для блоку спеціалізованого програмного забезпечення, які можна успішно використати при вдосконаленні існуючих та побудові нових спеціалізованих комп'ютерних систем. Розроблене програмне забезпечення для моделювання напружено-деформованого стану тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини в режимі реального часу.

Отримані результати дозволили підвищити точність контролю за якістю виробництва в режимі реального часу за рахунок зменшення кількості елементарних операцій на кожній ітерації близько 5 %. Це, в свою чергу, дало змогу досягти більш рівномірного розподілу переміщень в серединній поверхні оболонки, що надає можливість продуктивно організувати виробничий процес із мінімальними затратами сировини.

Результати роботи впроваджені у випробувальній лабораторії ТОВ «ТЕКСТОН», ТОВ «ЧЕРКАСИ-АВТОТЕХ» та у навчальному процесі Черкаської філії ПВНЗ «Європейський університет» і Черкаського національного університету ім. Богдана Хмельницького.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дзюба В. А. Побудова комбінованого чисельно-аналітичного методу підвищеної точності для розрахунку задач оболонкових конструкцій. *Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*: зб. наук. пр. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2014. Вип. 29. С. 34–40.
2. Дзюба В. А., Стеблянко П. О. Ітераційні методи в задачах математичного моделювання технічних процесів. *Прикладна математика. Інформатика*: наук. журнал. Черкаси: ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2013. Вип. 38(291). С. 49–57.
3. Дзюба В. А., Стеблянко П. О. Побудова методу підвищеної точності розв'язку задачі для циліндричної оболонки змінної товщини на основі ітераційних методів. *Математичні проблеми технічної механіки*: зб. наук. пр. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. Вип. 1(24). С. 216–221.
4. Dzyuba V. A., Steblyanko P. O. Use of splines in the calculation of deflections for plates of variable thickness. *Physical and mathematical sciences: J. Science and Education a New Dimension*. Budapest, 2014. No 32. P. 41–47.
5. Lada N., Dzyuba V., Breus R., Lada S. Synthesis of sets of non-symmetric two-operand two-bit crypto operations within the permutation accuracy. *Reports*

- on research projects. Technology audit and production reserves: Science J. Kharkiv, 2020. No 2/2(52). P. 28–31.*
6. Дзюба В. А., Зажома В. М., Рудницький В. М., Стеблянко П.О. Автоматизація процесів розрахунку напружено-деформованого стану циліндричних оболонок. *Вісник Інженерної академії України: теор. і наук.-практ. журнал*. Київ: ІА України, 2019. Вип. 4. С. 100–104.
  7. Дзюба В. А., Рудницький В. М. Спеціалізована комп'ютерна система для розрахунку з підвищеною точністю механічних характеристик задач напружено-деформованого стану тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини. *Системи управління, навігації та зв'язку: наук. період. Видання*. Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2020. Вип. 1(59). С. 101–104.
  8. Дзюба В. А., Стеблянко П. О. Використання обчислювальних методів в математичному моделюванні складних систем. *Інформаційно-комп'ютерні технології в економіці, освіті та соціальній сфері: матеріали ІХ Всеукраїнської наук.-практ. конф.: тези доп., (Сімферополь, 13–14 берез. 2014 р.)*. 2014. Вип. 9. С. 3–5.
  9. Дзюба В. А., Стеблянко П. О. До побудови методу підвищеної точності розв'язку стаціонарної задачі для оболонки змінної товщини. *Математичні проблеми технічної механіки – 2014: матеріали Міжнародної наук. конф.: тези доп., (Дніпропетровськ, 14–17 квіт. 2014 р.)*. С. 50–52.
  10. Дзюба В. А., Стеблянко П. О. Використання ітераційних методів при моделюванні технічних процесів в складних системах. *Актуальні проблеми природничих та гуманітарних наук у дослідженнях молодих вчених: матеріали XVI Всеукраїнської наук.-практ. конф.: тези доп., (Черкаси, 24–25 квіт. 2014 р.)*. С.107–108.
  11. Дзюба В. А. Новий варіант методу дослідження механічних характеристик пластин та оболонок змінної товщини підвищеної точності. *Актуальні проблеми гуманітарних та природничих наук: матеріали Міжнародної наук.-практ. конф.: тези доп., (Одеса, 3–4 квіт. 2015 р.)*. С. 12–14.
  12. Дзюба В. А., Стеблянко П. О. Чисельно-аналітичний підхід для розрахунку з підвищеною точністю механічних характеристик пластин та оболонок змінної товщини. *Інформатика. Математика. Автоматика: матеріали наук.-техн. конф.: тези доп., (Суми, 20–25 квіт. 2015 р.)*. С. 258.
  13. Дзюба В. А. Використання комп'ютерних технологій в математичному моделюванні задач теорії оболонок. *Інформаційні технології в моделюванні: матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф.: тези доп., (Миколаїв, 24–25 берез. 2016 р.)*. С. 25–26.
  14. Дзюба В. А. Новий підхід до побудови комбінованого ітераційного методу для розрахунку оболонок змінної товщини. *Інформатика*.

*Математика. Автоматика: матеріали наук.-техн. конф.:* тези доп., (Суми, 18–22 квіт. 2016 р.). С. 237.

### АНОТАЦІЯ

**Дзюба В.А. Метод та засоби побудови спеціалізованої комп'ютерної системи контролю якості технологічних процесів виробництва.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2021.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню точності контролю за якістю виробництва в режимі реального часу за рахунок розробки та впровадження спеціалізованої комп'ютерної системи контролю якості технологічних процесів.

У дисертаційній роботі проведено дослідження існуючих методів і обчислювальних комп'ютерних засобів для моделювання та розрахунку параметрів напружено-деформованого стану тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини, зокрема метод «напружених» сплайнів і метод прогонки та його модифікації.

Дослідження дозволило виявити основні недоліки існуючих підходів до організації виробництва тонкостінних конструкцій за допомогою спеціалізованих комп'ютерних систем та шляхи їх усунення.

Для цього розроблено чисельно-аналітичний варіант методу підвищення контролю якості тонкостінних циліндричних оболонок змінної товщини шляхом організації ітераційної процедури з використанням сплайнів; вдосконалено модель спеціалізованої комп'ютерної системи на основі методу контролю якості технологічних процесів виробництва тонкостінних оболонок змінної товщини; розроблено правила та алгоритми для оцінки швидкості та точності керування технологічними процесами, що забезпечило можливість їх застосування на програмному рівні та дало змогу оцінити їх ефективність використання при реалізації спеціалізованої комп'ютерної системи.

**Ключові слова:** спеціалізована комп'ютерна система, технологічний процес, метод контролю якості, тонкостінна циліндрична оболонка змінної товщини, напружено-деформований стан.

### АННОТАЦИЯ

**Дзюба В. А. Метод и средства построения специализированной компьютерной системы контроля качества технологических процессов производства.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Черкасский государственный технологический университет, Черкассы, 2021.

Диссертационная работа посвящена повышению точности контроля за

качеством производства в режиме реального времени за счет разработки и внедрения специализированной компьютерной системы контроля качества технологических процессов.

В первом разделе сделан обзор современного состояния и перспективных направлений развития специализированных компьютерных систем, проведено исследование существующих методов и вычислительных компьютерных средств для моделирования и расчета параметров напряженно-деформированного состояния тонкостенных цилиндрических оболочек переменной толщины, в частности метод «напряженных» сплайнов и метод прогонки и его модификации. Во второй главе проведен обзор и формирование математического аппарата для упрощения задач механики деформируемого тела. Сформулированы основные требования, задания к СКС и предложен новый вариант структуры СКС. Предполагается, что СКС будет ориентироваться на управление и проектирование производства тонкостенных цилиндрических оболочек и конструкций, которые обладают чрезвычайно важными свойствами на прочность, жесткость, устойчивость. Третий раздел посвящен построению численно-аналитического метода для повышения контроля качества тонкостенных цилиндрических оболочек переменной толщины путем организации итерационной процедуры с внедрением сплайнов. Сформулированы условия для успешной реализации итерационного процесса предложенного комбинированного численно-аналитического метода повышенной точности с помощью СКС. Четвертый раздел посвящен рассмотрению разработанных правил и алгоритмов для оценки скорости и точности управления технологическими процессами, что обеспечило возможность их применения на программном уровне и позволило оценить их эффективность использования при реализации специализированной компьютерной системы.

В работе усовершенствована модель специализированной компьютерной системы на основе метода контроля качества технологических процессов производства тонкостенных оболочек переменной толщины путем организации итерационной процедуры с использованием сплайнов, что позволило обеспечить контроль качества в режиме реального времени.

Результаты работы внедрены в испытательной лаборатории ООО «Текстон», ООО «Черкасы-АВТОТЕХ», в учебный процесс Черкасского филиала ПВНЗ «Европейский университет» и Черкасского национального университета им. Богдана Хмельницкого.

**Ключевые слова:** специализированная компьютерная система, технологический процесс, метод контроля качества, тонкостенная цилиндрическая оболочка переменной толщины, напряженно-деформированное состояние.

## ABSTRACT

**Dzyuba V. A. Method and means of building a specialized computer system for quality control of technological production processes.** – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2021.

The dissertation is devoted to improving the accuracy of control over the quality of production in real time through the development and implementation of a specialized computer system for quality control of technological processes.

In the dissertation work, a study of existing methods and computational computer tools for modeling and calculating the parameters of the stress-strain state of thin-walled cylindrical shells of variable thickness, in particular, the method of "stressed" splines and the sweep method and its modification has been carried out.

The study has made it possible to identify the main disadvantages of the existing approaches to organizing the production of thin-walled structures with the help of specialized computer systems and ways to eliminate them.

To achieve this purpose, a numerical-analytical version of the method of improving the quality control of thin-walled cylindrical shells of variable thickness by organizing an iterative procedure with the use of splines has been developed; the model of a specialized computer system based on the method of quality control of technological processes for the production of thin-walled shells of variable thickness has been improved; rules and algorithms for assessing the speed and accuracy of control of technological processes, which makes it possible to apply them at the software level and allows to assess their effectiveness in the implementation of a specialized computer system, have been developed.

Practical significance of the results obtained lies in bringing the obtained scientific results to specific algorithms, models and variants of calculation schemes for a block of specialized software which can be successfully used while improving the existing specialized computer systems as well as constructing the new ones.

The developed combined method can be used to solve real scientific, technical and engineering problems, which, in a mathematical formulation, are reduced to boundary value problems of the theory of elasticity.

The results obtained have made it possible to increase the accuracy of production quality control in real time, by reducing the number of elementary operations at each iteration by about 5%.

**Keywords:** specialized computer system, technological process, quality control method, thin-walled cylindrical shell of variable thickness, stress-strain state.