УДК 665.6/7, 681.54

[0000-0001-8441-6692] **Л. Д. Ярощук,** *канд. техн. наук, доцент,*
e-mail: vicleon@i.ua
[0000-0003-4398-5930] **Є. О. Тюріна,** *аспірантка*
e-mail: eugenia.turina@gmail.com
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
просп. Перемоги, 37, корп. 19, м. Київ, 03056, Україна

ІЄРАРХІЯ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ НЕПЕРЕРВНИМ ПРОЦЕСОМ АДСОРБЦІЙНОГО ВІДНОВЛЕННЯ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розвиток суспільства супроводжується постійним збільшенням обсягів відпрацьованих олив та мастил. Сучасний підхід господарчих органів до цих речовин не набув системності, їх зростання та утилізація не знаходяться під належним контролем.

Актуальним напрямом дослідження є визначення сукупності задач керування процесами адсорбційного очищення у промислових масштабах, їхніх взаємозв'язків та пріоритетів.

Призначення технології утилізації та сучасні вимоги до промислових виробництв дали підстави сформувати такі стратегічні (загальновиробничі) задачі системи керування: забезпечення економічної ефективності виробництва; дотримання вимог до якості продукції; виконання екологічних вимог до виробництва.

Аналіз хіміко-технологічної системи неперервного адсорбційного очищення показав, що наступним рівнем ієрархії задач є технологічні (тактичні) задачі, обумовлені вимогами до властивостей регенерованих олив і мастил, а також властивостями забрудненої сировини, адсорбенту та стану самого адсорбера як основного технологічного апарата.

Кожну технологічну задачу було деталізовано, це дало можливість сформулювати задачі керування наближено до типових задач керування, враховуючи особливості технології.

Кінцевим етапом дослідження ієрархії задач було визначення переліку математичних методів, які можливо застосувати для систем керування адсорбційним очищенням олив та мастил.

Використання різноманітних схем спрощує розуміння проблем і логіку міркувань авторів, сприяє системному підходу до автоматизації адсорбційного очищення. Отримані результати дають змогу зацікавленим особам обґрунтувати свій вибір задач і математичного забезпечення.

Ключові слова: *утилізація, очищення, регенерація, олива, мастило, адсорбція, задачі керування.*

Вступ. Відпрацьовані оливи та мастила (ВОМ) – одне з джерел забруднення довкілля. Наразі обсяги ВОМ, накопичуючись (особливо у великих містах), починають створювати проблеми, але методи їх очищення (регенерації) поки що спрямовані або на регенерацію в межах окремих виробництв, або на несистемне спалювання. Так, наприклад, обсяги утворених відпрацьованих моторних мастил в Україні зросли з 725 000 т у 2008 р. до 750 000 т у 2016 р. [1]. Водночас близько 75 % ВОМ не проходять потрібної обробки, що призводить до критичного забруднення навколишнього середовища.

До недавнього часу найбільш поширеним було очищення в адсорберах періодичної дії, але високі темпи накопичення цих відходів потребують впровадження більш ефективних технологій неперервної адсорбції. За цих обставин варто враховувати складність адсорбційного очищення як об'єкта керування, викликану відсутністю необхідної інформації про властивості ВОМ, адсорбенту і регенерованого матеріалу.

Створення систем керування адсорберами в таких виробництвах є актуальною задачею, адже потужні виробництва ще не набули поширення і бракує досвіду використання математичного забезпечення цих систем.

Процеси очищення широко застосовують у різних галузях промисловості. Метод адсорбції нині є одним із найбільш перспективних завдяки ефективності та можливості суттєвого зменшення навантаження, спричи-

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

неного викидами у вигляді відпрацьованих оливних і мастильних матеріалів, на довкілля. Зростання інтересу до цього методу знайшло відображення в кількості та різноманітті публікацій. Так, у [2] автори детально розглянули механізми адсорбційних процесів та різні підходи до їх моделювання, але отримані моделі розраховані на однокомпонентне вилучення і є складними для їх подальшого використання в системах керування. У дослідженнях [3], [4] значну увагу приділено моделюванню саме структури частинок, які взаємодіють між собою, враховуючи температурні режими. Водночас отримані моделі не враховують різноманіття показників якості продукції. У низці праць [5], [6] процес описано з позиції поведінки адсорбенту та варіантів його розподілу на поверхні масообміну при однокомпонентному очищенні. Таким чином, наведені дослідження не враховують багатокомпонентність сировини та продукції й не розглядають способи узгодження властивостей продукції.

У працях [7], [8] автори сформували задачі адаптивного оптимального керування процесом розділення газових сумішей зі створенням аналітичних та імітаційних моделей. У [9], [10] запропоновано дворівневу систему адаптивної оптимізації та керування процесом адсорбції з неперервним контролем зовнішніх збурень, наведено методи розв'язування задач оптимізації на верхньому рівні з корекцією завдань регуляторам у локальних системах автоматичного керування. В [11] автори запропонували екстремальну адаптивну систему керування процесом адсорбційного очищення водню з постійною структурою та можливістю зміни налаштувань параметрів процесу. У наведених працях описані системи керування концентрацією одного компонента або суміші, тобто вони не враховують багатокомпонентну адсорбцію. Таким чином, постає питання моделювання процесів очищення, враховуючи декілька компонентів, які необхідно вилучити. Також у цих працях не досліджено питання керування адсорбційними процесами, їх розглядають в основному з позиції узагальнених властивостей суміші компонентів (витрата, температура, концентрація певної речовини в іншій тощо), що дає можливість вирішувати задачі керування при малій кількості різноманітних забруднювачів чи хоча б стабільних складах сировини, яку треба очистити. При регенерації відпрацьованих ВОМ має місце багатокомпонентна адсорбція, для керування якої необхідна більша деталізація у поданні властивостей речовин. При створенні моделей, призначених для використання в системах керування, зазвичай враховують один, рідше два компоненти, які потрібно вилучити з суміші, що не може задовольнити всім вимогам, встановленим до якості продукції.

Отже, в літературних джерелах не запропоновано системного підходу до вибору способів керування промисловим неперервним адсорбційним очищенням ВОМ та до вибору математичних методів (зокрема для моделювання), що можуть лягти в основу керування.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення основних задач, які постають при керуванні адсорберами неперервної дії при регенерації олив та мастил. Задачами дослідження є визначення типів алгоритмів і математичних моделей, які дають змогу розв'язувати сформовані задачі керування.

Виклад основного матеріалу. Адсорбційний метод (АМ) регенерації за неперервним циклом застосовують для очищення низькоплавких парафінів, виділених із дизельних палив, від ароматичних вуглеводнів. Його прийнято до впровадження також для очищення ВОМ (надалі будемо називати сировину для АМ забрудненими речовинами). Значною перевагою такого методу очищення перед іншими є мінімальні виробничі втрати, які визначаються кількістю випалюваних з адсорбенту смол, і отримання нового продукту – високоароматизованого рафінату, що містить невелику кількість парафінових і нафтенових вуглеводнів і може бути використаний як сировина для нафтохімічної промисловості (пластифікатор, наповнювач для синтетичного каучуку та гумотехнічних виробів тощо) [12], [13].

Продуктивність неперервного АМ достатньо велика, тому забруднені матеріали можуть надходити з різних джерел, отже, мати різні властивості.

Розглянемо хіміко-технологічну систему (ХТС) адсорбційного очищення забруднених олив та мастил (рисунок 1). Виділимо в ній три складові – етапи підготовки сировини, адсорбції та відновлення адсорбенту.

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

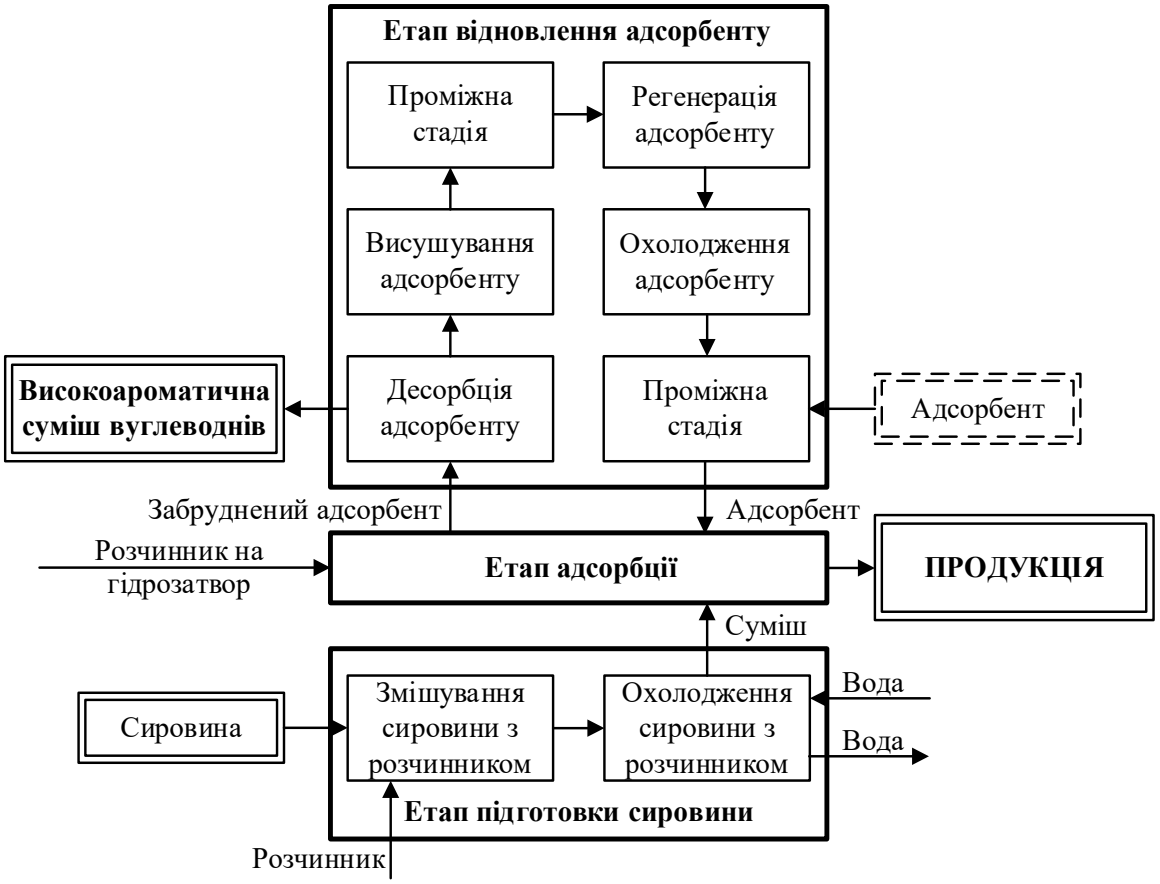

Рисунок 1 – Схема хіміко-технологічної системи адсорбційного очищення

На етапі підготовки забруднену сировину змішують з розчинником (для зниження в'язкості) й охолоджують до температури, яка виключає можливість перетворення фізичної адсорбції на хімічну (забезпечення температурного режиму процесу очищення). Адсорбція – основний етап, який полягає у поглинанні адсорбентом забруднюючих речовин з ВОМ, у досліджуваній ХТС адсорбент і сировину подають протитечією. Процес адсорбції визначимо як технологічний об'єкт керування (ТОК).

Для повторного використання адсорбенту застосовують наступний етап – відновлення адсорбенту – десорбцію з нього ароматичних вуглеводнів з подальшим висушуванням, випалюванням у регенераторі, охолодженням та поверненням у технологічну ланку для адсорбції (для спрощення додаткові матеріальні потоки цього етапу не вказуємо).

Стратегічні задачі системи керування адсорбером. Запропонуємо спочатку визначити стратегічні (загальновиробничі) задачі системи керування:

I – забезпечення економічної ефективності виробництва;

II – дотримання вимог до якості продукції;

III – виконання екологічних вимог до виробництва.

Наведені задачі передбачають розв'язання задач оптимального керування і потребують додаткової щодо виробництва інформації: попит на продукцію, ціни на сировину та енергоносії, екологічні обмеження, заробітна плата тощо. Ця інформація формує пріоритети зазначених задач. Для визначення пріоритетів зазвичай використовують методи експертного оцінювання [14]. У [15] розглянуто взаємодію економічного й екологічного аспектів керування процесами в рамках положень сталого розвитку. Існує безліч показників, які використовують для забезпечення економічних вимог до виробництва.

У [15] як такий показник використано критерій прямих питомих витрат K_{ads}, які безпосередньо пов'язані з технологічним процесом адсорбційного очищення:

$$K_{ads} = \left(a_1 K + a_2 F_{hs} + a_3 S\right)/G,$$

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

де K – змінна частина витрат, що залежить від режиму ведення технологічного процесу адсорбції, грн; F_{hs} – витрати, спрямовані на зменшення концентрацій шкідливих речовин у повітрі робочої зони навколо адсорбера; S – соціальна складова витрат, грн; G – кількість (маса) продукції, кг; a_1, a_2, a_3 – вагові коефіцієнти.

Наведемо узагальнений показник прямих питомих витрат $K_{g,opt}$, враховуючи економічну та екологічну складові при керуванні адсорбером (без соціальної складової) [15]-[17]:

$$K_{g,opt} = K_{ad} / G,$$

де K_{ad} – показник, що враховує витрати на роботу адсорбера.

$$K_{ad} = q_1 G_m P_m + q_2 G_a P_a + q_3 G_{sol} P_{sol} + q_4 Q_e P_e + \\ + q_5 A + q_6 F_{hs},$$

де G_m, G_a, G_{sol} – обсяги суміші сировини й розчинника, адсорбенту, розчинника на гідрозатвор, які надходять в адсорбер, відповідно, м^3; P_m, P_a, P_{sol} – ціни за одиницю обсягу вищеназваних матеріалів відповідно, грн/м^3; Q_e – кількість витраченої енергії, кВт·с; P_e – тариф на витрачену електроенергію, грн/(кВт·с), A – витрати на амортизацію основних фондів, необхідних для перебігу процесу адсорбції, грн; F_{hs} – витрати, спрямовані на зменшення концентрацій шкідливих речовин, які можуть утворюватися у повітрі робочої зони навколо адсорбера, грн, $q_1 \ldots q_6$ – вагові коефіцієнти (залежать від поточної пріоритетності задач керування).

Сформулюємо задачу оптимального керування адсорбером у нормальному режимі експлуатації (екологічні обмеження виділені напівжирним шрифтом) [15], [18]:

$$K_{opt2}(U) = f(C_{FC}, C_S, C_{AH}, \Theta_a, G_a) \rightarrow \min;$$

$$b_{i,\min} \le \vec{\boldsymbol{X}}(C_{CN}, C_{FC}, C_{Visc}, \Theta_a, \boldsymbol{C_S}, \boldsymbol{C_{AH}}) \le b_{i,\max}$$

$$\vec{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{C_j}) \le b_{j,\max},$$

де $\vec{\boldsymbol{X}}(C_{CN}, C_{FC}, C_{Visc}, \Theta_a, \boldsymbol{C_S}, \boldsymbol{C_{AH}})$ – вектор обмежень на властивості продукції; $\vec{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{C_j})$ – вектор обмежень на показники екологічності виробництва; C_j – концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони навколо адсорбера; $b_{i,\ \min}$, $b_{i,\ \max}$ (i = *CN, FC, Visc, a, S, AH*), $b_{j,\ \max}$ – відповідні коефіцієнти, *CN* – цетанове число, *FC* – фракційний склад, *Visc* – в'язкість, *S* – сірка, *AH* – ароматичні вуглеводні.

З наведених постановок задач оптимізації видно, що вони містять вимоги до властивостей продукції. Враховуючи її багатокомпонентний склад, розглянемо питання про якість детальніше.

Запропонуємо узагальнений показник якості K_a:

$$K_a = \sum_{i=1}^{n} q_i K_i,$$

де n – кількість властивостей продукції, які враховують; q_i – ваговий коефіцієнт, який характеризує ступінь важливості показника (i = = 1, 2, …, n) на K_a; K_i – i-й показник якості.

Для використання в системах керування значення n може визначатися тим, скільки властивостей можливо виміряти за допомогою технічних засобів автоматизації, визначити за прийнятний час лабораторно, розрахувати за допомогою інших властивостей або оцінити органолептично.

Наведені стратегічні задачі I-III можуть бути розв'язані шляхом їх декомпозиції, зокрема перші дві задачі передбачають наступне: пошук зв'язків для зменшення показників якості, що характеризують продукцію; узгодження показників якості між собою; прогнозування значень показників якості; коригування математичного забезпечення в умовах нестаціонарності процесу очищення.

Технологічні джерела впливу на процес адсорбції. Схема ХТС (рисунок 1) дає змогу також визначити технологічні (обумовлені технологією) джерела впливу на стан ТОК і обґрунтувати склад підзадач для I-III.

До цих джерел належать властивості продукції, сировини, адсорбенту та адсорбера. Вони обумовлюють необхідність розв'язування задач керування, які можна назвати технологічними або тактичними. На рисунку 2 подано схему прикладання технологічних джерел впливу при формуванні технологічних задач. За її допомогою дослідимо процес адсорбції як об'єкт керування.

Продукція: типи та властивості. Продукцією є регенеровані мастильні матеріали, які пройшли процес очищення в адсорбері та можуть бути використані повторно. Розрізняють нафтові (мінеральні) і синтетичні оливи та мастила. На основі нафтових олив отримують пластичні й технологічні мастила, мастильно-охолоджуючі, гідравлічні рідини тощо. Існує багато класифікацій продукції (мастильних матеріалів): за походженням (або вихідною сировиною), зовнішнім станом, призначенням тощо.

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

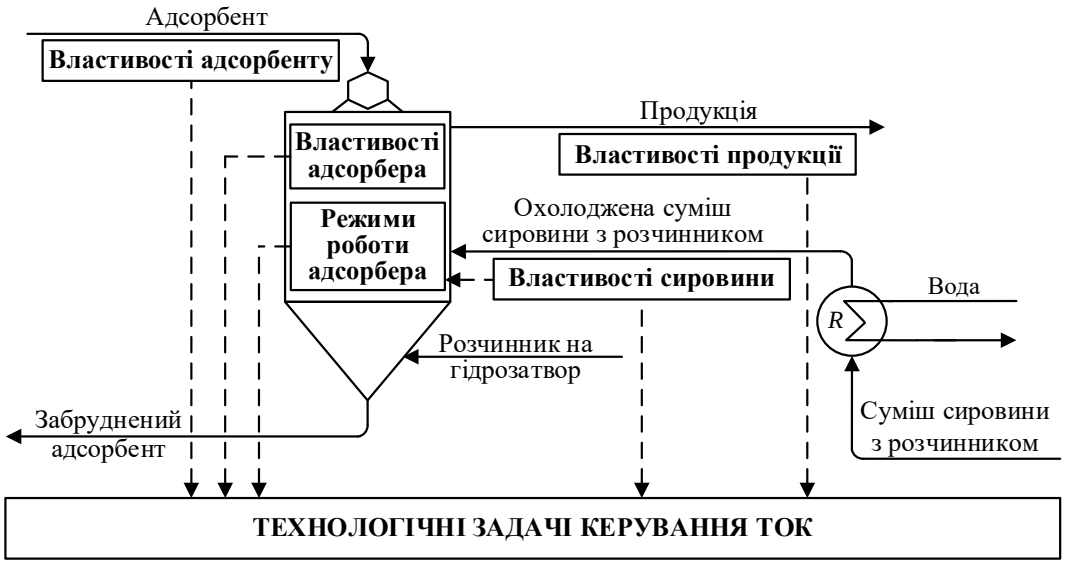

Рисунок 2 – Схема прикладання технологічних джерел впливу на перебіг адсорбції при формуванні технологічних задач

Так, за призначенням мастильні матеріали поділяють на моторні, трансмісійні, редукторні, гідравлічні, харчові, індустріальні (текстильні, для прокатних станів, електроізоляційні тощо), консистентні (пластичні), зокрема з консистентних виробляють електропровідні мастила (пасти) [19].

Для кожного з типів мастил залежно від призначення важливі декілька характеристик. Цю проблему відображає рисунок 3.

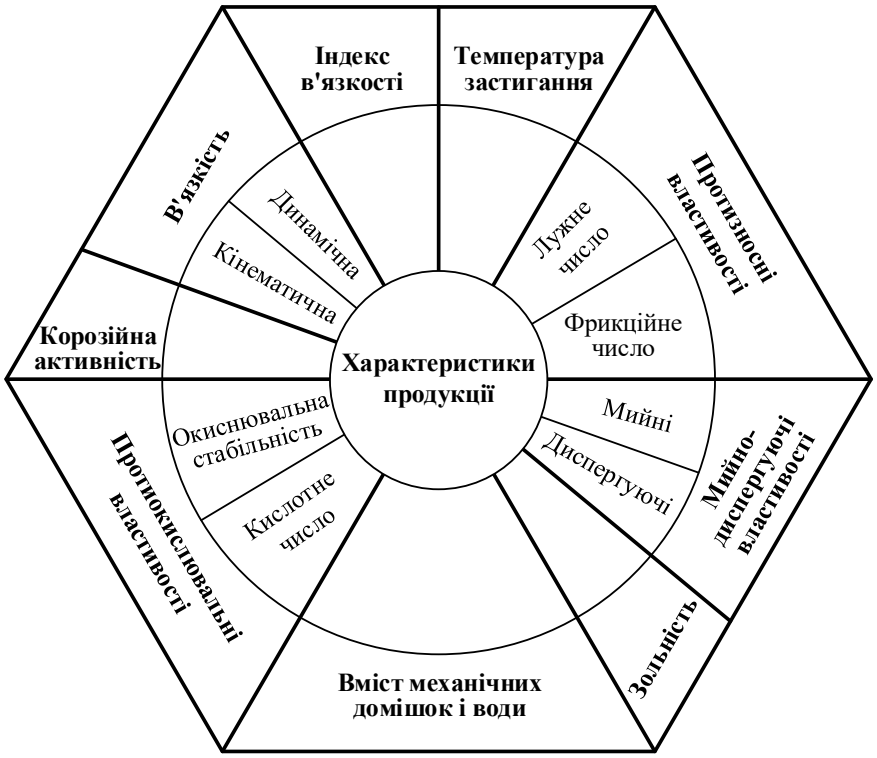

Рисунок 3 – Схема основних характеристик продукції

Наведені показники є загальними, тому для оцінювання якості конкретного типу оливних або мастильних матеріалів, які направляють на очищення, застосовують визначену нормативними документами комбінацію наведених факторів.

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

Наприклад, для дизпалива ДЕСТи і регламенти виділяють такі основні характеристики: основні експлуатаційні показники дизельних палив [19], [20]: цетанове число, цетановий індекс, фракційний склад, в'язкість, щільність, температурні властивості (температури помутніння, застигання, спалаху, точка закупорки), коксованість палива, масова частка сірки, змащувальна здатність, вміст води і твердих суспендованих частинок, вуглецевий нагар, вогнетривкі шлаки, сублімація.

На якість продукції впливає безліч факторів [21]-[23], зокрема властивості забрудненої оливи, адсорбенту, розчинника, конструкційні властивості апарата, тиск у ньому тощо [24].

З наведеного випливає, що до якості регенерованої сировини висувають численні вимоги [19]. Такі показники, як індекс в'язкості, цетановий індекс можна визначити з розрахунків або за таблицями, температури застигання, помутніння встановлюють лабораторно. В'язкість можна вимірювати неперервно.

Отже, актуальними є задачі вибору властивостей продукції $\vec{Q}$ для керування адсорбцією та методів їх оцінювання з узгодженням результатів оцінювання, зокрема і в часі:

а) визначення залежностей між властивістю продукції і режимними параметрами та властивостями сировини, адсорбенту й адсорбера

$$Q_k(t) = F_1(\overrightarrow{X_j}(t+\Delta t)),$$

де $Q_k(t)$ – k-й показник якості, значення якого невідоме на час t; $\vec{X}(t+\Delta t)$ – вектор відомих властивостей сировини, адсорбенту та адсорбера, враховуючи вектор часових зсувів $(t+\Delta t)$ між вимірюваннями; $F_1()$ – функціонал для оцінювання $Q_k(t)$;

б) визначення залежностей між однією властивістю й іншими властивостями продукції

$$Q_k(t) = F_2(\overrightarrow{Q_j}(t+\Delta t)),$$

де $Q_k(t)$ – k-й показник якості, значення якого невідоме на час t; $\vec{Q}(t+\Delta t)$ – вектор показників якості, значення яких відомі, враховуючи вектор часових зсувів $(t+\Delta t)$ між вимірюваннями; $F_2()$ – функціонал для оцінювання $Q_k(t)$.

Властивості сировини. Особливістю цього виробництва є нестабільність властивостей сировини, оскільки її не отримують цілеспрямовано (дотримуючись певних вимог до якості та кількості), а збирають як відходи. В ній містяться як базові складові мастильних матеріалів (див. вище «Продукція…»), так і забруднювачі.

Наведемо на рисунку 4 характеристики сировини [19].

Залежно від того, які групи переважають у складі оливи або мастила, виділяють декілька їх різновидів: парафінові, нафтенові, ароматичні та змішані. Так, для виробництва мастильних матеріалів поширеним є використання парафінових мастил, які мають необхідні в'язкісно-температурні характеристики [19]. На ступінь адсорбції відпрацьованих матеріалів, а отже, і вибір типу адсорбенту, істотно впливає компонентний склад забрудненої оливи або мастила, зокрема полярність елементів. Так, вуглеводні є неполярними або слабко полярними речовинами, а смоли та сірчисті сполуки – полярними [24].

Оскільки йдеться про очищення, то відмінність властивостей різних партій сировини непередбачувана і може бути суттєвою. Для керування адсорбцією треба знати властивості сировини та рекомендовані режимні параметри до кожного вектора властивостей. Сучасний стан вимірювальних засобів не здатен забезпечити потрібну точність та оперативність вимірювань. Отже, визначення режимних параметрів процесу адсорбції при зміні сировини є задачею, що пов'язана з суттєвою невизначеністю. Вищесказане призводить до необхідності розрізняти задачі керування при сировині з відомими і невідомими властивостями. Такі особливості виробництва дають підстави розглядати два режими в системі керування з окремими задачами.

Режим **«Стала сировина»** – режим експлуатації, при якому тип та обсяги сировини тривалий час не змінюються, режимні параметри системи керування забезпечують якість продукції.

Режим **«Зміна сировини»** – режим експлуатації, який починається при зміні типу й обсягів сировини (наприклад сировина від іншого постачальника). Режимні параметри в цьому випадку невідомі, керувальні впливи не відповідають властивостям матеріального потоку, якість продукції та економічна ефективність виробництва погіршуються.

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

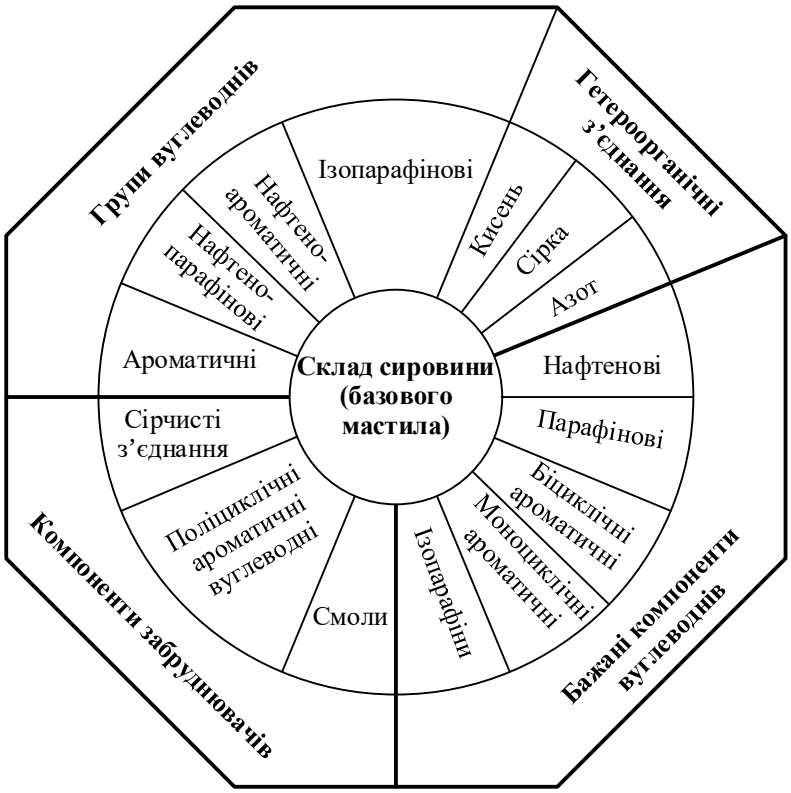

Рисунок 4 – Схема структурних компонентів сировини

Ці режими вказують на існування таких задач керування: визначення властивостей сировини, перевірки факту їх зміни, визначення керувальних впливів, якщо виявлено факт зміни. Отже, якщо на переробку надходить нова партія ВОМ, то визначення нових режимних параметрів адсорбції стає окремою задачею, пов'язаною як з якістю продукції, так і з економічною ефективністю.

Адсорбент: вид та властивості. При очищенні ВОМ використовують синтетичні адсорбенти, зокрема крихту (фракція 0,25-0,5 мм) синтетичного алюмосилікатного каталізатора [12], властивості якого змінюються з кожним циклом використання (цикл – перебіг процесів від етапу адсорбції до відновлення адсорбенту).

До властивостей адсорбенту належать [24]: ***фізико-хімічні***: хімічний склад, вологоємність, водостійкість, механічна міцність; ***структура:*** каркасна структура, об'єм шпарин; ***додані*** (тобто ті, що набуті після регенерації): каркасна структура, об'єм шпарин, вологоємність, водостійкість, механічна міцність, концентрації ароматичних вуглеводнів, сірки та смол.

Інформація про властивості адсорбенту дає можливість вчасно коригувати його витрату та інші режимні параметри, запобігаючи тривалій невідповідності між властивостями сировини й адсорбенту. На жаль, через складність побудови окремої частинки адсорбенту не варто розраховувати на вимірювання її властивостей у прийнятному майбутньому. Відсутність інформації про адсорбент викликає необхідність розв'язування задачі адаптивного керування, яку в загальному вигляді можна записати так:

$$\vec{U}(t+\Delta t)=\vec{\Phi}(\vec{U}(t),\vec{Q}(t)),$$

де $\vec{U}(t)$, $\vec{U}(t+\Delta t)$ – поточний та прогнозований вектори керувальних впливів; вектор $\vec{Q}(t)$ – вектор властивостей сировини і продукції; $\vec{\Phi}()$ – функціонал.

Властивості адсорбера. За конструкцією адсорбери неперервної дії розподілені по висоті за зонами (секціями) [25]. Ці зони відокремлені одна від одної розподільними тарілками – трубчастими решітками, до яких знизу приєднані короткі відрізки труб. Тарілки призначені для більш рівномірного розподілу олив і мастил по перерізу колони та зменшення виносу частинок адсорбенту з потоком. Більш важкі компоненти-забруднювачі поглинаються адсорбентом у нижній частині ко-

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

лони, найбільш легкі та ще непоглинені компоненти (легка та верхня фракції) – у верхній частині адсорбційної зони.

Крім того, під час перебігу адсорбції виникає низка проблем, пов'язаних з конструкцією апарату, зокрема забивання міжтрубних просторів (що зменшує ефективність процесу).

Формування задач керування адсорбцією. Отже, визначений нами ТОК має суттєво розподілені властивості. Є також підстави вважати його нестаціонарним із загалом повільною зміною властивостей, що можна подати у вигляді $\vec{\Psi}(t)$ – функціонала залежностей властивостей від часу.

На рисунку 5 зображено схему формування задач керування за кожним джерелом впливу. Використовуючи числові позначення задач, сформуємо перелік можливих методів їх розв'язування (рисунок 6).

Рисунок 5 – Схема формування задач керування за кожним джерелом впливу

Ця схема дає можливість досліджувати ієрархію задач керування адсорбцією. Сформульовані задачі доцільно ідентифікувати за допомогою шифрів і пов'язати з методами, які їх можуть розв'язати, та з моделями, прийнятними для цих методів. Перспективним результатом подальших досліджень можна вважати визначення задач, методів та моделей, які є найбільш поширеними або критичними з погляду впливу на задачі вищого рівня.

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

Визначення математичних методів для розв'язання задач керування. На рисунку 6 наведено приклад схеми зв'язків між задачами керування, методами та моделями (автори не перелічували усі варіанти з огляду на обмеженість статті).

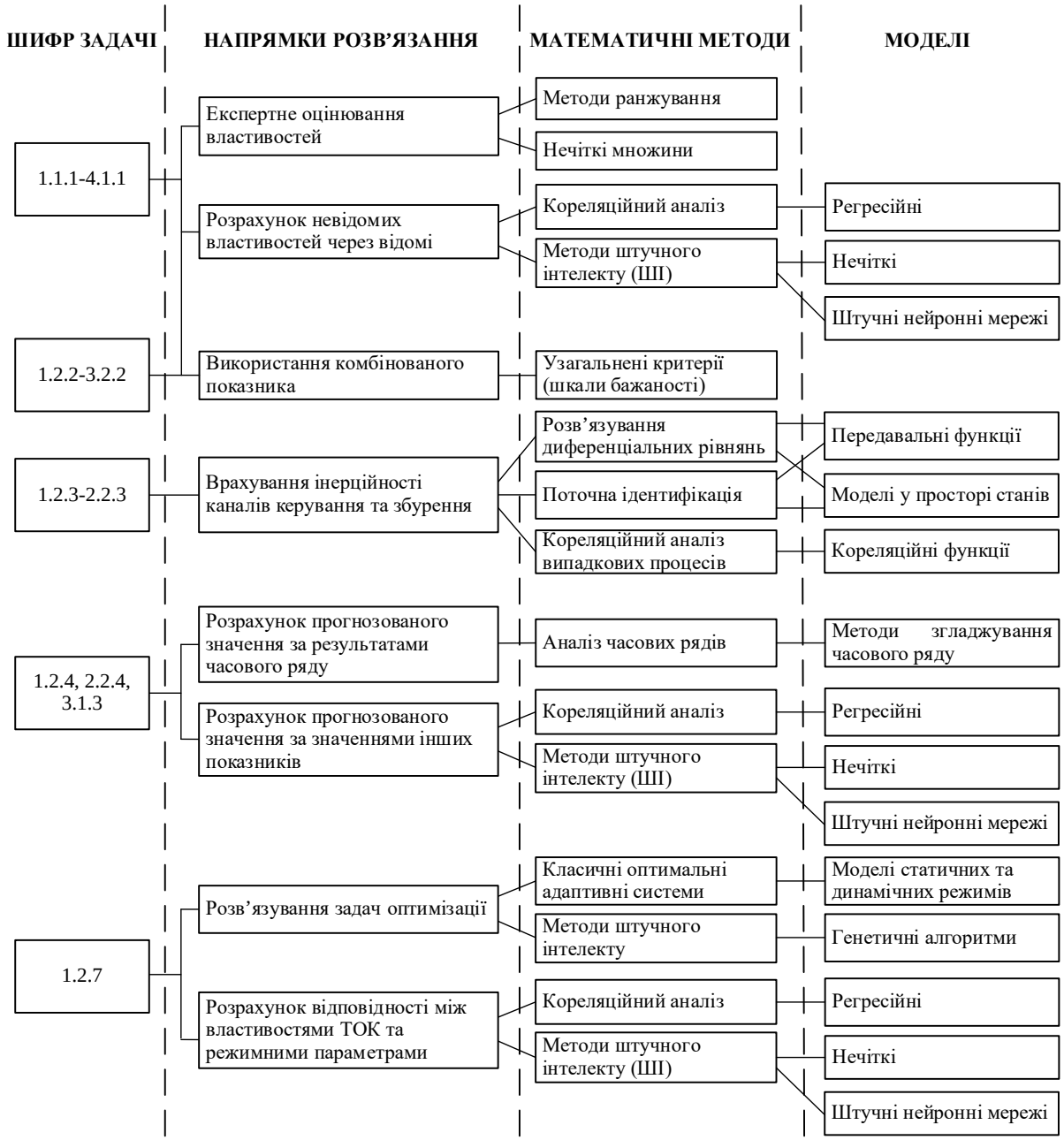

Рисунок 6 – Схема зв'язків між задачами керування, методами та моделями

Наведені схеми доцільно розглядати як семантичні мережі різних типів, які дають змогу формалізувати кроки проектувальника системи керування процесом адсорбції.

Результати досліджень. Проведені у статті дослідження визначили особливості технології адсорбційного очищення ВОМ з погляду керування.

Було сформульовано загальновиробничі задачі та задачі, пов'язані з конкретними технологічними особливостями, сформовано ієрархію задач керування.

Визначено, що загальновиробничі задачі мають вирішувати питання забезпечення економічної ефективності виробництва, дотримання вимог до якості продукції та виконання екологічних вимог до виробництва.

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

До технологічних задач, які враховують особливості перебігу адсорбційних процесів, віднесено такі, що пов'язані безпосередньо з властивостями продукції, сировини, адсорбенту та самого апарата – адсорбера.

Визначено базові задачі з погляду всієї ієрархії задач: урахування численних вимог до якості продукції; забезпечення якості продукції при відсутності оперативної інформації про більшість її показників; керування процесом в умовах малої кількості керувальних впливів; визначення керувальних впливів в умовах нестаціонарності процесів.

Відповідно до сформульованих задач запропоновано напрями розв'язання деяких із них. Зокрема, для узгодження в часі значної кількості показників якості продукції рекомендовано враховувати інерційності каналів керування та збурення. Зазначено, що це можливо реалізувати декількома способами, серед яких виконання кореляційного аналізу випадкових процесів з використанням кореляційних функцій.

Запропоновані схеми формування задач і зв'язків між задачами керування, методами та моделями дають можливість формалізувати процес створення математичного забезпечення системи керування адсорбційного очищення.

Обговорення результатів. Сучасний розвиток суспільства пов'язаний зі зростанням відходів різного виду – побутових та промислових. До побутових традиційно належать харчові, пластикові, деревина, папір, будівельні матеріали. Технології їхньої промислової утилізації визначені; заводи, обладнані сучасними системами автоматизації, успішно працюють у багатьох країнах.

Інша справа – відпрацьовані нафтові оливи та мастила, які збирають з різних місць. Їхні властивості численні та непередбачувані, тому складно досягти бажаного очищення. Впровадження потужних технологічних комплексів для цих відходів – задача майбутнього, але створювати математичне забезпечення систем керування треба вже зараз.

На основі досліджень особливостей технологічної системи та положень системного аналізу запропоновано комплексний підхід до визначення задач керування адсорбційним очищенням олив та мастил. Показано логічний зв'язок між задачами, загальними для виробництва, і такими оперативними задачами, що виникають внаслідок роботи обладнання чи зі зміною властивостей забрудненої сировини.

Задачі, різні за причинами виникнення, були об'єднані, якщо мали однакові наслідки. За результатами дослідження всіх джерел впливу на процеси очищення було складено перелік задач автоматичних систем керування.

Для цих задач запропоновано алгоритми та математичні методи, які на цей час обґрунтовані теоретично і підтверджені практикою.

Отримані результати дадуть фахівцю з автоматизації технологічних процесів можливість пройти достатньо швидко шлях аналізу технології, аналізу задач керування та вибору математичного забезпечення системи керування адсорбційним відновленням властивостей олив та мастил.

Висновки. Проведений у статті аналіз процесів адсорбційного очищення олив та мастил дав змогу обґрунтувати і сформулювати систему задач, які мають бути враховані при автоматизації відповідного виробництва. Ці задачі були надалі пов'язані з математичними методами, якими вони можуть бути розв'язані. Результати були отримані завдяки застосуванню методів системного аналізу, зокрема аналізу процесів як об'єктів керування. В такому вигляді створення ієрархії задач і методів їх розв'язання щодо адсорбційного очищення у літературних джерелах не наводилось. Зазначені результати можна вважати такими, що мають як наукову новизну, так і практичну цінність.

Отримані результати дадуть можливість отримати продукцію належної якості з раціональним використанням ресурсів, задіяних при очищенні, та, відповідно, оперативно реагувати на можливі зміни джерел постачання сировини, що також суттєво впливає на якість продукції.

Наведена інформація може бути корисною при автоматизації адсорбційних процесів не тільки при утилізації відходів, а й для інших виробництв.

Список використаних джерел

[1] М. І. Кулик, "Утилізація відпрацьованих моторних мастил: еколого-економічний аспект", *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, вип. 1-2, с. 122-128, 2015.

[2] М. Р. Петрик та ін., *Математичне моделювання теплопереносу та адсорбції вуглеводнів в нанопористих цеолітних каталізаторах систем нейтралізації відпрацьованих газів.* Київ, Україна: Нац. акад.

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

наук України, Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова, 2017.

[3] Н. В. Ушева и др., *Математическое моделирование химико-технологических процессов.* Томск, Россия: Томский политехн. ун-т, 2014.

[4] М. Д. Мышлявцева, "Математическое моделирование сложных адсорбционных систем на поверхности твердых тел: метод трансфер-матрицы", дис. д-ра физ.-мат. наук, ОмГТУ, Омск, Россия, 2013.

[5] Л. Т. Файзуллина, и Е. Ю. Туманова, "Математическое моделирование гидродинамики течения газа в пористом насыпном слое", на *V Всерос. студ. науч.-техн. конф. Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология*, Казанский нац. исслед. технол. ун-т, 23-25 мая 2018, с. 276-280.

[6] Л. Т. Файзуллина, и Е. Ю. Туманова, "Математическое моделирование процесса адсорбции при различных способах укладки адсорбента", на *V Всерос. студ. науч.-техн. конф. Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология*, Казанский нац. исслед. технол. ун-т, 23-25 мая 2018, с. 280-283.

[7] Е. И. Акулинин и др., "Задачи анализа, оптимизации и управления при разделении газовых смесей", *Вестник ВГУИТ*, т. 80, вып. 2, с. 93-100, 2018. doi: 10.20914/2310-1202-2018-2-93-100.

[8] Е. И. Акулинин, Д. С. Дворецкий, и С. И. Дворецкий, "Динамика циклических адсорбционных процессов обогащения воздуха кислородом: моделирование и оптимизация", *Вестник технологического университета*, т. 19, вып. 17, с. 108-114, 2016.

[9] В. Г. Матвейкин, А. А. Ишин, С. А. Скворцов, и С. И. Дворецкий, "Автоматизация процесса адсорбционного разделения газовых смесей и получение водорода", *Вестник ТГТУ*, т. 23, вып. 4, с. 548-556, 2017. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556.

[10] В. Г. Матвейкин и др., "Оптимизация и управление циклическим процессом адсорбционного обогащения воздуха кислородом", *Вестник ТГТУ*, т. 24, вып. 4, с. 556-568, 2018. doi: 10.17277/vestnik.2018.04.pp.556-568.

[11] С. А. Скворцов, и А. А. Ишин, "Разработка экстремальной адаптивной системы управления процессом адсорбционного получения водорода", *Вестник ВГУ, Серия: Системный анализ и информационные технологии*, вып. 4, с. 84-90, 2016.

[12] Л. В. Иванова, И. И. Корнеев, и В. Н. Юзбашев, *Технология переработки нефти и газа*. Москва, Россия: Химия, 1966.

[13] Н. В. Кельцев, *Основы адсорбционной техники,* 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Россия: Химия, 1984.

[14] Л. Д. Ярощук, *Інтелектуальні системи управління: Експертні системи – основи проектування та застосування в системах автоматизації:* посіб. для студ. спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології". Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.

[15] Л. Д. Ярощук, і Є. О. Тюріна, "Врахування стратегії сталого розвитку при автоматизації очищення олив та мастил адсорбентами", *XIETP*, вип. 1, с. 126-134, 2019. doi: 10.20535/2617-9741.1.2019.171211.

[16] Л. Р. Ладієва, *Оптимізація технологічних процесів:* навч. посіб. Київ, Україна: Політехніка, 2004.

[17] A. Zhulinskyi, L. Ladieva, and A. Burban, "An optimization of static operating modes of the installation of contact membrane distillation", *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 10, no. 9, pp. 439-446, 2017. doi: 10.12988/ces.2017.7332.

[18] В. А. Шевченко, "Оптимизация управления электростанцией из условия минимума расхода топлива и с учетом метеоусловий", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, вип. 4, с. 46-55, 2018.

[19] И. Г. Анисимов и др., *Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение:* справочник, под ред. В. М. Школьникова. Москва, Россия: Техинформ, 1999.

[20] Д. С. Жалкін, та С. Г. Жалкін, *Хімотологія дизельних палив. Альтернативні види палива*. Харків, Україна: УкрДУЗТ, 2016.

[21] Л. П. Казакова, и С. Э. Крейн, *Физико-химические основы производства нефтяных масел*. Москва, Россия: Химия, 1978.

[22] L. R. Rudnick, Ed., *Synthetics, Mineral Oils, and Bio-Based Lubricants: Chemistry and*

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

Technology, 3rd ed. Boca Raron: CRC Press, 2020.

[23] C. Stan, C. Andreescu, and M. Toma, "Some aspects of the regeneration of used motor oil", *Procedia Manufacturing*, vol. 22, pp. 709-713, 2018. doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.102.

[24] Л. Д. Ярощук, та Є. О. Тюріна, "Вербальне моделювання мікропроцесів неперервної адсорбційної регенерації олив та мастил", *XIETP*, вип. 2, с. 78-88, 2020. doi: 10.20535/2617-9741.2.2020.208058.

[25] А. Н. Плановский, В. М. Рамм, и С. З. Каган, *Процессы и аппараты химической технологии.* 4-е изд. Москва, Россия: Химия, 1967.

References

[1] M. I. Kulyk, "Utilization of used motor oils: ecological and economic aspect", *Liudyna ta dovkillia. Problemy neoekolohii*, iss. 1-2, pp. 122-128, 2015 [in Ukrainian].

[2] M. R. Petryk et al., *Mathematical modeling of heat transfer and adsorption of carbohydrates in nanoproductive cellular catalysts of the systems of neutralization of welded gases*, Kyiv, Ukraine: Nats. akad. nauk Ukrainy, In-t kibernetyky im. V. M. Hlushkova, 2017 [in Ukrainian].

[3] N. V. Usheva et al., *Mathematical modeling of chemical and technological processes*. Tomsk, Russia: Tomskyi polytekhn. un-t, 2014 [in Russian].

[4] M. D. Myshlyavceva, "Mathematical modeling of complex adsorption systems on the surface of solids: The transfer matrix method", Ph.D. thesis, OmSTU, Omsk, Russia, 2013 [in Russian].

[5] L. T. Fajzullina, and E. Yu. Tumanova, "Mathematical modeling of gas flow hydrodynamics in a porous filled layer", in *V All-Rus. Stud. Sci. and Techn. Conf. Intensification of Heat and Mass Transfer Processes, Industrial Safety and Ecology*, Kazan National Research Technological University, May 23-25, 2018, pp. 276-280 [in Russian].

[6] L. T. Fajzullina, and E. Yu. Tumanova, "Mathematical modeling of the adsorption process with various methods of adsorbent packing", in *V All-Rus. Stud. Sci. and Techn. Conf. Intensification of Heat and Mass Transfer Processes, Industrial Safety and Ecology*, Kazan National Research Technological University, May 23-25, 2018, pp. 280-283 [in Russian].

[7] E. I. Akulinin et al., "Problems of analysis, optimization and control in the separation of gas mixtures", *Vestnik VGUIT*, vol. 80, iss. 2, pp. 93-100, 2018 [in Russian]. doi: 10.20914/2310-1202-2018-2-93-100.

[8] E. I. Akulinin, D. S. Dvoreckij, and S. I. Dvoreckij, "Dynamics of cyclic adsorption processes of air enrichment with oxygen: Modeling and optimization", *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, vol. 19, iss. 17, pp. 108-114, 2016 [in Russian].

[9] V. G. Matvejkin, A. A. Ishin, S. A. Skvorcov, and S. I. Dvoreckij, "Automation of the process of adsorption separation of gas mixtures and hydrogen production", *Vestnik TGTU*, vol. 23, iss. 4, pp. 548-556, 2017 [in Russian]. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556.

[10] V. G. Matvejkin et al., "Optimization and control of the cyclic process of adsorption air enrichment with oxygen", *Vestnik TGTU*, vol. 24, iss. 4, pp. 556-568, 2018 [in Russian]. doi: 10.17277/vestnik.2018.04.pp.556-568.

[11] S. A. Skvortsov, and A. A. Ishin. "The design of extreme adaptive control system for adsorptive hydrogen-production process", *Vestnik VGU. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii*, iss. 4, pp. 84-90, 2016 [in Russian].

[12] L. V. Ivanova, I. I. Korneev, and V. N. Yuzbashev, *Oil and gas processing technology*. Moscow, Russia: Khimiia, 1966 [in Russian].

[13] N. V. Keltsev, *Adsorption technology basics*, Moscow, Russia: Khimiia, 1984 [in Russian].

[14] L. D. Yaroshchuk, *Intelligent control systems: Expert systems – the basics of design and application in automation systems:* a guide for students of specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies". Kyiv, Ukraine: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2019 [in Ukrainian].

[15] L. D. Yaroshchuk, and Ye. O. Tiurina, "Accounting of sustainable development strategy at the automation of oil and grease purification with adsorbents", *KhIETR*, iss. 1, pp. 126-134, 2019 [in Ukrainian]. doi: https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171211.

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

[16] L. R. Ladieva, *Optimization of technological processes:* textbook. Kyiv, Ukraine: Politekhnika, 2004 [in Ukrainian].

[17] A. Zhulinskyi, L. Ladieva, and A. Burban, "An optimization of static operating modes of the installation of contact membrane distillation", *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 10, no. 9, pp. 439-446, 2017. doi: 10.12988/ces.2017.7332.

[18] V. A. Shevchenko, "Optimization of power plant control of minimum fuel consumption taking into account weather conditions", *Visnyk ChDTU*, iss. 4, pp. 46-55, 2018 [in Russian].

[19] I. G. Anisimov et al., *Fuels, lubricants, technical fluids. Assortment and application*, in V. M. Shkolnikov (Ed.). Moscow, Russia: Tekhinform, 1999 [in Russian].

[20] D. S. Zhalkin, and S. H. Zhalkin, *Chemotology of diesel fuels. Alternative fuels.* Kharkiv, Ukraine: UkrDUZT, 2016 [in Ukrainian].

[21] L. P. Kazakova, and S. E. Krein, *Physicochemical fundamentals of petroleum oils production.* Moscow, Russia: Khimiia, 1978 [in Russian].

[22] L. R. Rudnick, Ed., *Synthetics, Mineral Oils, and Bio-Based Lubricants: Chemistry and Technology*, 3rd ed. Boca Raron: CRC Press, 2020.

[23] C. Stan, C. Andreescu, and M. Toma, "Some aspects of the regeneration of used motor oil", *Procedia Manufacturing*, vol. 22, pp. 709-713, 2018. doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.102.

[24] L. D. Yaroshchuk, and Ye. O. Tiurina, "Verbal modeling of microprocesses of continuous oil and grease adsorption", *KhIETR*, iss. 2, pp. 78-88, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.20535/2617-9741.2.2020.208058.

[25] A. N. Planovskii, V. M. Ramm, and S. Z. Kagan. *Processes and Apparatuses of Chemical Technology.* 4th ed. Moscow, Russia: Khimiia, 1967 [in Russian].

L. D. Yaroshchuk, *Ph. D., Associate Professor,*
e-mail: vicleon@i.ua
Ye. O. Tiurina, *Ph. D. student*
e-mail: eugenia.turina@gmail.com
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Peremohy ave., 37, academic building 19, Kyiv, 03056, Ukraine

HIERARCHY OF CONTROL TASKS FOR CONTINUOUS PROCESS OF ADSORPTION REGENERATION OF LUBRICANTS

The development of society is accompanied by a constant increase in the volume of waste oils and lubricants. The modern approach of economic bodies to these substances has not become systematic, their growth and utilization are not under proper control.

In order to contain environmental hazards and conserve these complex material resources, industrial-scale waste disposal technology is perspective. Continuous adsorption purification can become such a technology, so it is important to create appropriate automation systems that ensure its efficiency.

The current direction of the research is to determine the set of tasks for control of adsorption purification processes on an industrial scale, their relationships and priorities.

The purpose of recycling technology and modern requirements for industrial production allowed authors to form the following strategic (general production) tasks of the control system: ensuring the economic efficiency of production; compliance with product quality requirements; fulfillment of environmental requirements to production. Depending on the economic or environmental conditions external to production, the priority of tasks can be adjusted on the basis of expert methods. In general, this type of task can be solved using conditional optimisation methods. An example of an optimal control task based on an economic criterion is presented.

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200

The analysis of chemical-technological system of continuous adsorption purification has shown that the next level of the hierarchy of tasks are technological (tactical) tasks due to the requirements for the properties of regenerated oils and lubricants, as well as the properties of contaminated raw materials, adsorbent and the state of the adsorber, as the main technological apparatus.

Each technological task was detailed, this made it possible to formulate control tasks close to typical control tasks taking into account the peculiarities of technology.

The final stage of the study of the hierarchy of tasks was to determine a list of mathematical methods that can be applied to control systems for adsorption purification of oils and lubricants.

The use of various schemes simplifies the understanding of problems and the logic of the authors' reasoning, contributes to a systematic approach to the automation of adsorption purification. The obtained results allow stakeholders to justify their choice of tasks and mathematical support.

Keywords: *utilization, purification, regeneration, oil, lubricant, adsorption, control tasks.*

Стаття надійшла 02.06.2021
Прийнято 15.06.2021

© Л. Д. Ярощук, Є. О. Тюріна, 2021
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200