

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Тюріна Євгенія Олександрівна

УДК 681.5:665.66

ДИСЕРТАЦІЯ
МОДЕЛЮВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ АДСОРБЦІЙНИМ ОЧИЩЕННЯМ
ОЛИВ ТА МАСТИЛ

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Є. О. Тюріна

Науковий керівник Ярощук Людмила Дем'янівна, к. т. н., доцент

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Тюріна Є. О. Моделювання та керування адсорбційним очищенням олив та мастил. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2024.

Дисертація спрямована на створення таких систем керування процесами неперервного адсорбційного очищення відпрацьованих олив та мастил, які дозволять забезпечити високу якість очищення та принципи ресурсозбереження при переробці різної за властивостями сировини.

У дисертації проаналізовано технологію очищення відпрацьованих індустриальних олив і мастил, яка складається з етапів підготовки сировини, адсорбції забруднювальних речовин із сировини та регенерації адсорбенту. Технологія передбачає процес адсорбційного очищення в адсорбері неперервної дії з протитечійною подачею сировини й адсорбенту, а також повернення адсорбенту в технологічний процес після регенерації.

Встановлено, що особливостями технології є нестабільність властивостей сировини, як суміші корисних та забруднювальних речовин з різним і, як правило, точно не визначеним складом, що характерно для транспортних і виробничих відходів.

Виконано аналіз властивостей забруднених речовин і адсорбенту, вимог до якості очищеної продукції та особливості адсорбера, що дозволив сформулювати головні задачі систем керування очищенням. Аналіз існуючих систем та способів керування показав, що, в умовах відсутності технічних засобів автоматизації для вимірювання концентрацій забруднювальних речовин, якість продукції забезпечують стабілізацією тисків і температури в адсорбері.

Визначено, що на перебіг технологічних процесів очисних виробництв впливає перехід від одного типу відходів до іншого, у зв'язку з чим визнано доцільним реалізовувати різні алгоритми керування адсорбційним очищенням при сталій сировині й при переході до іншої сировини.

Створено систему керування процесом очищення при зміні сировини. Оскільки функціонування технологічної системи виробництва оцінюють за декількома критеріями, то для усвідомлення переліку задач керування, які дозволять врахувати ці критерії, була виконана систематизація задач керування адсорбційним очищенням. На основі створеного переліку для кожної задачі були визначені методи, якими вона може бути розв'язана, та типи моделей, які при цьому можуть бути використані. Систематизація подана у виді семантичної мережі, що дозволяє краще обґрунтувати та спростити створення систем керування процесом адсорбції.

Керування при зміні сировини базується на типових рішеннях автоматизації адсорбера, а саме керування тиском та температурою в адсорбері (режимні параметри) впливом на витрату адсорбенту й охолоджувальної води відповідно. Проблема підтримання якості очищення в режимі зміни сировини полягає в тому, що для нової сировини невідомі необхідні режимні параметри. Для її розв'язання запропоновано спосіб керування, який передбачає в складі програмного забезпечення систем керування підтримувати базу даних, яка міститиме записи з основними характеристиками сировин, які раніше очищували в адсорбері, і відповідними для них режимними параметрами. Запропоновано на початку надходження нової сировини знаходити для неї в цій базі сировини-аналоги, після чого, застосувавши статистичні методи до знайдених варіантів режимних параметрів, знаходити узагальнені значення необхідних тиску та температури. Описано алгоритм пошуку, який передбачає повні та часткові збіги, а також їх відсутність. Алгоритм передбачає присутність особи, яка приймає остаточні рішення стосовно умов пошуку та вибору режимних параметрів. Запропоновано використовувати різні види статистичних оцінок і моделей для

визначення актуальних тиску і температури залежно від кількості записів у базі даних. Наведено приклад пошуку засобами *MS Access*. Створено систему керування для режиму зміни сировини.

Обґрунтовано тип та створено відповідну математичну модель процесу адсорбції, призначеної для використання в системі керування в режимі сталої сировини. Розглянуто особливості моделювання як системи нано- і мікропроцесів. Описано процес адсорбції також як об'єкт технології і керування як макросистема і виконано аналіз основних видів моделей таких об'єктів. Враховуючи суттєву багатопараметричність адсорбції як об'єкта моделювання, запропоновано в умовах нестационарності властивостей сировини, адсорбенту й адсорбера описувати канали керування і збурення як аперіодичні ланки другого порядку із транспортним запізнюванням. На основі аналізу експериментальних даних було визначено, що коефіцієнти передач цих функцій є нелінійними функціями від тиску і температури в адсорбері. Опрацювання експериментальних даних дозволило визначити типи цих нелінійностей.

У системі керування передбачено адаптування моделей при зміні властивостей речовин та адсорбера, наведено схеми застосування адаптивних моделей в системі керування. Виконана реалізація моделі у системі *Simulink + MATLAB*.

Описано систему керування адсорбером у режимі сталої сировини. Для обґрунтування вибору системи керування виконано аналіз джерел нестационарності та їх типів. У режимі сталої сировини запропоновано розглядати властивості сировини та адсорбера, як такі, що не мають причин для тренду математичного сподівання, а тренд по дисперсії можливий. У той же час властивості адсорбера можуть мати помітний тренд математичного сподівання у зв'язку з налипанням на елементи конструкцій часток сировини та адсорбенту. Описано систему керування, в якій передбачено адаптування математичних моделей обох каналів керування, а на основі нових моделей виконувати розрахунок нових параметрів пропорційно-інтегральних

регуляторів. У режимі сталої сировини передбачено виконувати корегування завдань регуляторам контурів керування шляхом уведення результатів вимірювання якості готової продукції. Оскільки до появи нової продукції на виході адсорбера ці сигнали від'єднані, то завданнями регуляторів були режимні параметри, визначені на основі алгоритму пошуку аналогів нової сировини. Корегування завдань за показниками якості дозволяє перейти від відносно потрібних до дійсно потрібних умов очищення сировини, що заповнює адсорбер. Корегування реалізоване на основі використання нечітких множин для опису показників якості та значень тиску і температури, а також системи правил *fuzzy logic*.

Цей фрагмент алгоритму керування дозволяє сформувати новий запис у базі даних із властивостями нової сировини і найкращими для неї умовами очищення. Таким чином наповнюється база даних, що дає можливість з часом покращувати систему керування в режимі зміни сировини.

Створено інтегровану систему керування адсорбційним очищенням олив і мастил. Об'єднання стосується систем керування двох зазначених раніше режимів змінної та сталої сировини, які відповідають нормальному функціонуванню виробництва. Іншою складовою інтегрованої системи є експертна система, яка призначена для пошуку причин аварійного функціонування виробництва. Для експертної системи розроблена база знань з фактами аварій та правилами продукції. Наведено результат роботи цієї системи.

Оскільки інтегрована система керування використовує емпіричні знання фахівців у різному їх виді, проведено аналіз типів цих знань та визначено способи їх отримання. Виконана систематизація такої інформації дозволяє організувати підбір і підготовку необхідних експертів для супроводу роботи інтегрованої системи керування.

Удосконалено систему керування процесом адсорбції, в якій на відміну від усталених, враховано можливість суттєвих змін властивостей нової забрудненої сировини, для чого передбачено автоматизований пошук у базі

даних речовин-аналогів нової сировини, статистичні дослідження знайдених у базі варіантів тиску та температури в адсорбері для аналогів, а також прийняття рішень щодо початкових значень цих режимних параметрів.

Удосконалено систему адаптивного керування процесом адсорбції, в якій на відміну від відомих, що базуються на поточній ідентифікації моделей динаміки процесу та на наступному визначенні параметрів налаштування регуляторів тиску та температури в адсорбері, уведено корегування початкових значень цих режимних параметрів за концентраціями ароматичних вуглеводнів, сірки і смол в очищеному продукті, що дозволяє дотримуватися вимог до якості очищення продукції та занести в базу даних значення відповідних властивостей нової сировини і потрібні для її переробки тиск та температуру.

Дістала подальшого розвитку система адаптивного керування тиском і температурою в адсорбері з корегуванням початкових значень цих режимних параметрів за концентраціями ароматичних вуглеводнів, сірки і смол у продукції, в якій на відміну від усталених способів, значення корегувальних сигналів визначають на основі нечітких множин і нечіткої логіки, що дозволяє підвищити якість продукції в умовах відсутності обґрунтованих математичних залежностей за допомогою досвіду фахівців.

Запропоновано інтегровану систему керування адсорбційним очищенням шляхом поєднання системи керування процесом при суттєвій зміні властивостей нової забрудненої сировини з системою керування процесом при сталих властивостях забрудненої сировини, яке передбачає чергування етапів визначення режимних параметрів адсорбції за сировинами-аналогами та за показниками якості очищеного продукту, причому режимні параметри другого етапу запам'ятовуються в базі даних сировин-аналогів першого етапу, це поєднання дозволяє забезпечити якість продукції і ресурсозбереження за рахунок підвищення рівня відповідності між режимними параметрами та поточним властивостям забрудненої сировини.

Дістало подальшого розвитку математичне моделювання адсорбційного очищення, що полягає у структурній ідентифікації моделі динаміки процесу адсорбції, призначеної для адаптивної системи керування, а також у статистичних залежностях між властивостями сировини та відповідними режимними параметрами, які об'єднані у базі даних сировин-аналогів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в систематизації задач керуванням адсорбційним очищенням; отриманні моделей адсорбції, призначених для систем керування адсорбційним очищенням ВОРМ; визначенні початкових режимних параметрів адсорбції для нової за властивостями сировини; створенні адаптивної системи керування очищенням; застосуванні нечіткої автоматичної системи керування очищенням, бази знань для діагностувальної експертної системи та інших застосувань експертних знань.

Одержані результати використані в навчальному процесі.

Ключові слова: технологічний об'єкт, нестаціонарність, математична модель, імітаційна модель, моделювання, ідентифікація, керування, алгоритм керування, система керування, адаптивне керування, нечітка логіка, нечітка система керування, інтелектуальна система керування, *Fuzzy Logic*, автоматизований технологічний комплекс.

ABSTRACT

Tiurina Y. O. Modelling and Control of Oils and Greases Adsorptive Purification. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy on the specialty 151 “Automation and computer-integrated technologies” – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” MES of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation aims to create such control systems for continuous adsorptive purification of wasted oils and greases (WOG), which would provide a high purification quality and resource conservation principles when processing raw materials with different characteristics.

The dissertation analyzes technologies of wasted oils and greases adsorption purification, that consists of the stages of a feedstock preparation, pollutants adsorption from the raw materials and adsorbent regeneration. Technology involves adsorption purification process in the adsorber of continuous operation with countercurrent supply of raw materials and adsorbent, as well as returning the adsorbent to the technological process after regeneration.

It is established, that the peculiarity of the technology is the instability of raw materials properties, as compound of useful and contaminated substances with various and, generally, imprecise composition, which is typical for transport and industrial waste.

Had been performed analysis of contaminated substances properties and adsorbent, refined products quality requirements and adsorber feature, which made it possible to formulate the major tasks for the purification control systems. Analysis of the existing systems and control methods has shown, that in the absence of technical means of automation for measuring pollutants concentrations, product quality is ensured by pressure and temperature stabilization in the adsorber.

It was determined that the processes flow in purificatory productions is affected by the transition from one type of waste to another, due to which it is

considered expedient to implement different algorithms for adsorption purification control with stable raw materials and when switching to other raw materials.

Has been created control system of purification process on variable raw materials. Since the functioning of the technological production system is evaluated according to several criteria, in order to understand the list of control tasks, that would allow these criteria to be taken into account, a systematization of purification adsorption control tasks was carried out. Based on the created list, each task has been determined with methods by which it can be solved, and types of models, that can be used. The systematization is presented in the form of a semantic network, which allows to substantiate better and simplify the creation of adsorption process control systems.

Raw materials change control is based on typical adsorber automation solutions, namely control of pressure and temperature in the adsorber (mode parameters) with the effect on the consumption of adsorbent and cooling water, respectively. The problem of maintaining the quality of purification in the mode of variable raw materials is that the required mode parameters are unknown for new raw material. To solve it, proposed a control method, which involves maintaining a database as part of the control system software, that would contain records with the main characteristics of the raw materials that were previously purified in the adsorber, and their corresponding mode parameters. Suggested, that at the beginning of the arrival of new raw material, the analogues of raw materials should be found in this database, then, with applying statistical methods to the mode parameters result, find the generalized values of the required pressure and temperature. A search algorithm is described, which assumes complete and partial matches, as well as their absence. The algorithm assumes the presence of a person who makes final decisions regarding search conditions and selection of mode parameters. It is proposed to use different types of statistical estimates and models to determine the current pressure and temperature depending on the number of records in the database. An example of searching by means of MS Access is given. A control system for the raw material variable mode has been created.

The type is substantiated and a corresponding mathematical model of the adsorption process is created, intended for use in the control system in the mode of stable raw materials. Features of modeling as a system of nano- and microprocesses are considered. The process of adsorption is also described as an object of technology and control as a macrosystem, and an analysis of the main types of models of such objects is performed. Taking into account the significant multi-parameter nature of adsorption as an object of modeling, it is proposed to describe the control and disturbance channels as aperiodic links of the second order with a transport delay in the conditions of non-stationarity of the properties of the raw material, adsorbent and adsorber. Based on the analysis of experimental data, it was determined that the transfer coefficients of these functions are non-linear functions of pressure and temperature in the adsorber. Processing of experimental data made it possible to determine the types of these nonlinearities.

The control system provides models adaptation when the properties of substances and the adsorber change, and the schemes for applying adaptive models in the control system are given. The model has been implemented in Simulink + MATLAB system.

The adsorber control system in the mode of stable raw materials is described. To substantiate the choice of the control system, an analysis of the sources of non-stationarity and their types was performed. In the stable raw materials mode, it is proposed to consider the properties of raw materials and adsorber as those that do not have reasons for the trend of mathematical expectation, and the trend in dispersion is possible. At the same time, the properties of the adsorber may have a noticeable trend of mathematical expectation due to sticking of raw materials particles and adsorbent to the structural elements. The control system is described, which provides mathematical models adaptation of both control channels, and the calculation of new parameters of proportional-integral regulators based on the new models. It is intended to adjust the regulators tasks of the control circuits, in the mode of stable raw materials, by entering the results of finished products quality measuring. Since before the appearance of new products at the adsorber output, these

signals were disconnected, the tasks of the regulators were the mode parameters determined on the basis of the algorithm for finding analogues of new raw materials. Adjusting tasks according to quality indicators allows to move from relatively necessary to actually necessary conditions for purifying the raw materials that fill the adsorber. Regulation is implemented on the fuzzy sets basis to describe quality indicators, pressure and temperature values, as well as a system of fuzzy logic rules.

This fragment of the control algorithm allows to insert a new entry in the database with the properties of the new raw material and its most suitable purification conditions. The database is filled in a way, which makes it possible to improve the control system in the mode of variable raw materials over time.

An integrated control system for adsorptive purification of oils and greases has been created. The combination refers to the control systems of the two previously mentioned modes of variable and stable raw materials, which correspond to the normal functioning of production. Another component of the integrated system is the expert system, which is designed to find the causes of emergency operation of production. A knowledge base with facts of accidents and product rules has been developed for the expert system. Provided the result of this system.

Since the integrated control system uses the empirical knowledge of specialists in various forms, an analysis of the types of this knowledge was carried out and methods of obtaining it were determined. The completed systematization of such information allows organizing the selection and training of the necessary experts to support the operation of the integrated control system.

Has been improved the adsorption process control system, in which, unlike the established ones, the possibility of significant changes in the properties of new contaminated raw materials is taken into account, such as automated search in the database of substances-analogs of new raw materials, statistical studies of pressure and temperature variants in the adsorber for analogs found in the database, as well as making decisions about the initial values of these mode parameters.

Has been improved the adaptive control system of the adsorption process, where, in contrast to the known ones, that are based on the current identification of

process dynamics models and on the subsequent determination of the pressure and temperature regulators settings in the adsorber, has been introduced the adjustment of the initial values of these mode parameters according to the concentrations of aromatic hydrocarbons, sulfur and resins in the purified product, which allows to comply with the requirements for the quality of product purification and update database with an entry that includes values of the relevant properties of the new raw material, pressure and temperature required for its processing.

Received further development of adaptive control system of pressure and temperature in the adsorber with the correction of the initial values of these mode parameters according to the concentrations of aromatic hydrocarbons, sulfur, and resins in the product, unlike established methods, its values of the correction signals are determined on the basis of fuzzy sets and fuzzy logic, which allows to improve product quality in the absence of substantiated mathematical dependencies with the help of specialists experience.

An integrated adsorption purification control system is proposed, by combining a process control system with a significant change of new contaminated raw materials properties with a process control system, where properties are stable, which involves alternating stages of determining the mode parameters of adsorption according to analog raw materials and quality indicators of the purified product, the mode parameters of the second stage are stored in the database of the raw materials analogues of the first stage, this combination allows to ensure the quality of products and resource conservation by increasing the level of correspondence between the mode parameters and the current properties of the contaminated raw materials.

Has been further developed mathematical modeling of adsorption purification, which lies in the structural identification of the adsorption process dynamics model intended for the adaptive control system, as well as in the statistical dependencies between the properties of raw materials and the corresponding mode parameters, which are combined in the database of raw materials analogues.

The practical significance of the obtained results is the systematization of problems of adsorption purification control; obtaining adsorption models intended

for WOG adsorptive purification control systems; determination of the initial mode parameters of adsorption for new raw materials according to their properties; creation of an adaptive purification control system; applying fuzzy automatic purification control system, knowledge base for diagnostic expert system and other applications of expert knowledge.

The obtained results are used in the educational process.

Keywords: technological object, non-stationarity, mathematical model, simulation model, modeling, identification, control, control algorithm, control system, adaptive control, fuzzy logic, fuzzy control system, intelligent control system, Fuzzy Logic, automated technological complex.

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

- 1) Ярощук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2020). Вербальне моделювання мікропроцесів неперервної адсорбційної регенерації олив та мастил. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, (2), 78–88. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2020.208058> (особистий внесок: дослідження рушійних сил адсорбції на рівні нано- та мікрочастинок, обґрунтування доцільності моделювання адсорбції як об’єкта з кореляційним чи стохастичним типом зв’язків).
- 2) Ярощук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2021). Ієрархія задач керування неперервним процесом адсорбційного відновлення мастильних матеріалів. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, (2), 49 – 62. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.239200> (особистий внесок: формулювання економічної, технологічної й екологічної задач керування адсорбційним очищенням; визначення джерел появи цих задач; дослідження властивостей джерел, створення системи відповідності між задачею, методом її розв’язання та типом моделі об’єкта керування).
- 3) Liudmyla Yaroshchuk, Yevheniia Tiurina, "Simulation of the Industrial Oil Adsorption Purification Process for Automation Tasks", *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2022, Article ID 2738654, 13 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2738654> (**Scopus Q2, Web of Science**) (особистий внесок: ідентифікація залежностей кількості вилучених забруднювальних речовин від тиску та температури адсорбції для різних систем «адсорбент-сировина» на основі експериментальних даних; структурно-параметрична схема адаптивної моделі; Simulink-модель каналу керування).

- 4) Ярощук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2022). Моделювання та керування адсорбційним очищенням олив та мастил у режимі зміни сировини. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (3), 56 – 68. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265361> (особистий внесок: база даних властивостей забруднених сировин та відповідних тисків і температур в адсорбері; визначення попередніх умов очищення (режимних параметрів) нової сировини на основі статистичного оцінювання даних бази для різних її потужностей).
- 5) Ярощук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2023). Керування адсорбційним відновленням відпрацьованих олив і мастил в умовах нестаціонарностей. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (3), 63 – 73. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2023.288251> (особистий внесок: визначення джерел та типів нестаціонарності процесів в адсорбері; адаптивна система керування тиском в адсорбері на основі поточної ідентифікації моделі каналу керування; інтегрована система керування адсорбером, яка поєднує системи керування в режимі сталої і змінної сировини).
- 6) Ярощук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2023). Експертні знання в системах автоматизації адсорбційного очищення олив і мастил. *Енергетика і автоматика*, 0(4), 116 – 131. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya4\(68\).2023.116](http://dx.doi.org/10.31548/energiya4(68).2023.116) (особистий внесок: визначення задач керування адсорбційним очищенням, які потребують експертних знань; визначення типів таких знань і способів їх отримання).

Список публікацій здобувача, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

- 1) Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Ідентифікація динаміки процесу адсорбції при очищенні олив та мастил. Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної Internet-конференції; Київ 20 листопада 2019. К.: НУХТ, 2019. С. 91 – 92 (*особистий внесок: концепція, дослідження стосовно вибору моделі каналу керування*).
- 2) Тюріна Є. О. Розвиток моделювання в сучасних технологіях екологічної безпеки (адсорбційне очищення). Філософія і науково-технічна творчість у хронотопі технічного університету: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. К.: Ліра-К, 2020. С. 376 – 380 (*одноосібна праця*).
- 3) Tiurina Y. O., Yaroshchuk L. D. Knowledge formalization for the expert system in oil regeneration process control. Інформаційні технології і автоматизація – 2020 : Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2020», (Одеса, 22 – 23 жовтня 2020 р.). Одеська нац. акад. харч. технологій. Одеса: ОНАХТ, 2020. С. 142 – 145 (*особистий внесок: концепція, аналіз технологічної системи для визначення аварійних ситуацій*).
- 4) Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Задачі керування адсорбційним очищенням нафтових олив. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2021: Матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студ. (АКІТ – 2021), м. Київ, 21–22 квітня 2021 р. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. С. 46 – 47 (*особистий внесок: аналіз властивостей матеріальних потоків та їх зв'язків із задачами керування*).

- 5) Тюріна Є. О., Ярощук Л. Д. Структурна ідентифікація процесу адсорбції як об'єкта керування. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2021. К: НУХТ, 2021. С. 147 (*особистий внесок: концепція, визначення структури імітаційної моделі динаміки*).
- 6) Тюріна Є. О., Ярощук Л. Д. Інформаційне забезпечення імітаційного моделювання адсорбційного очищення олив і мастил. Інформаційні технології і автоматизація – 2022: Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2022», (Одеса, 20 – 21 жовтня 2022 р.). Одеська нац. акад. харч. технологій. Одеса: ОНАХТ, 2022. С. 48 – 50 (*особистий внесок: концепція, дослідження джерел інформації, принципи підготовки експериментів*).
- 7) Тюріна Є. О., Ярощук Л. Д. Джерела нестаціонарностей в адсорбційному очищенні відпрацьованих олив. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2023: Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ – 2023). м. Київ, 19 квітня 2023 р. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. С. 11 – 12 (*особистий внесок: дослідження джерел нестаціонарності в технологічній системі, аналіз часових трендів*).
- 8) Тюріна Є. О., Ярощук Л. Д. Особливості алгоритмічного забезпечення системи керування очищенням олив і мастил. Матеріали X Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 24 листопада 2023. К: НУХТ, 2023. С. 57 (*особистий внесок: концепція, створення структури алгоритмічного забезпечення системи керування з розширенням функцій типових систем*).

**Список публікацій здобувача, які додатково відображають наукові
результати дисертації**

- 1) Тюріна Є. О., Ярощук Л. Д. Науковий твір «Врахування показників сталого розвитку при автоматизації процесів відновлення ресурсів». № 93930, 13.11.2019 (*особистий внесок: алгоритм керування очищенням в контексті сталого розвитку, структура бази даних документів сталого розвитку*).
- 2) Ярощук Л. Д., Тюріна Є. О. Формалізація знань для експертної системи при керуванні процесом регенерації мастил. На шляху до Індустрії 4.0: інформаційні технології, моделювання, штучний інтелект, автоматизація: монографія / за заг. ред. С. В. Котлика. Одеса: Астропринт, 2021. С. 459 – 469 (*особистий внесок: концепція, база знань експертної системи*).
- 3) Тюріна Є. О., Ярощук Л. Д. Науковий твір «Спосіб визначення режимних параметрів при адсорбційному очищенні різних партій відпрацьованих олив та мастил». № 120987, 02.08.2023 (*особистий внесок: формування початкових умов пошуку сировин-аналогів, спосіб розширення меж пошуку за концентраціями забруднювальних речовин*).

ЗМІСТ

СКРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	22
ВСТУП.....	23
1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ АДСОРБЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ РЕЧОВИН ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	30
1.1 Технологічна система неперервного адсорбційного очищення олив і мастил.....	30
1.1.1 Опис технологічної системи неперервного очищення	31
1.1.2 Властивості забруднених речовин та адсорбенту	36
1.1.3 Показники якості очищеної оливи або мастила	45
1.2 Аналіз існуючих систем автоматизації адсорбційних процесів.....	47
Висновки до розділу 1	57
2 КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОЧИЩЕННЯ В РЕЖИМІ ЗМІНИ СИРОВИНИ	58
2.1 Систематизація задач керування адсорбційним очищенням та їхніх зв'язків з методами керування та математичними моделями	58
2.2 Система керування адсорбційним очищенням у режимі зміни сировини.....	66
2.2.1 Визначення початкових режимних параметрів процесу адсорбції.....	67
2.2.2 Статистичне оцінювання та моделювання режимних параметрів	73
2.3 Система керування в режимі зміни сировини.....	80
Висновки до розділу 2	82
3 МОДЕЛЮВАННЯ АДСОРБЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У РЕЖИМІ СТАЛОЇ СИРОВИНИ	83
3.1 Постановка задач моделювання.....	83
3.2 Моделювання адсорбційного очищення як системи нано- і мікропроцесів.....	84
3.3 Математичне моделювання процесу адсорбції для задач керування ..	85

3.3.1 Опис процесів адсорбції ВОМ як об'єктів моделювання і керування	85
3.3.2 Аналіз моделювання адсорбційних процесів як технологічних об'єктів керування	89
3.3.3 Визначення форм нелінійностей моделей каналів передавання сигналів	98
3.4 Схеми застосування адаптивних моделей в системі керування.....	105
3.5 Імітаційне моделювання процесу адсорбції.....	106
Висновки до розділу 3	112
4 КЕРУВАННЯ АДСОРБЕРОМ У РЕЖИМІ СТАЛОЇ СИРОВИНИ	114
4.1 Дослідження типів нестационарності процесу	115
4.2 Вибір типу системи адаптивного керування	120
4.3 Система адаптивного керування адсорбером.....	122
4.3.1 Корегування параметрів моделі адсорбції та регуляторів	122
4.3.2 Схеми систем адаптивного керування адсорбером	124
4.3.3 Визначення умов очищення нової сировини для внесення в базу даних.....	126
Висновки до розділу 4	138
5 ІНТЕГРОВАНЕ КЕРУВАННЯ АДСОРБЦІЙНИМ ОЧИЩЕННЯМ	139
5.1 Синтез систем керування в режимах змінної та сталої сировини.....	139
5.2 Експертна система для запобігання аварійних ситуацій при очищенні олив і мастил	143
5.3 Формування системи знань для підготовки експертів та експертиз при автоматизації адсорбційного очищення	152
Висновки до розділу 5	160
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	162
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	165
ДОДАТКИ	174
ДОДАТОК А	174
ДОДАТОК Б.....	180

ДОДАТОК В	187
ДОДАТОК Г	191

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АдАСК – адаптивна автоматична система керування;

АІС – автоматизована інформаційна система;

АМ – адсорбційний метод;

АСК – автоматична система керування;

БД – база даних;

ВОМ – відпрацьована олива або мастило

ЕС – експертна система;

ІМ – імітаційна модель;

ЛЗ – лінгвістична змінна;

НчЗ – нечітка змінна;

ОПР – особа, яка приймає рішення;

ППС – попередня партія сировини;

ПРП – початковий режимний параметр;

ТЗА – технічні засоби автоматизації;

ТОК – технологічний об’єкт керування;

ТС – технологічна система;

АН – ароматичні вуглеводні;

S – сірчисті з’єднання;

r – смоли.

ВСТУП

Нафтові оливи та мастила є суттєвим ресурсом, необхідним для використання в різноманітних сферах діяльності людей. Розвиток промисловості та збільшення кількості транспортних засобів призводить до зростання відпрацьованих індустріальних і транспортних олив та мастил (ВОМ). Ці речовини є складними речовинами, виробництво яких вимагає суттєвих капіталовкладень. Збільшення обсягів споживання таких матеріалів вимагає створення очисних комплексів по їх відновленню для часткового повернення у виробничий цикл. Неперервні схеми адсорбції наразі є найбільш ефективними способами очищення. Такі виробництва можуть переробляти забруднену сировину від різних постачальників з різними властивостями. Однак, неможливість вимірювати в реальному часі суттєвий масив властивостей спричиняє появу невизначеності при керуванні очищенням, яка підсилюється проявами нестаціонарності як з боку якості адсорбенту, так і з боку параметрів обладнання. Вказані причини вимагають використання більш складного математичного забезпечення систем керування, оскільки кожний набір властивостей вимагає корегування режимних параметрів в адсорбері та налаштувань регуляторів.

Актуальність. Відпрацьовані мастильні матеріали обов'язково треба вилучати з механізмів та утилізувати. Неперероблені, вони створюють екологічну загрозу біосфері. Регенерація, зокрема очищення від забруднювальних речовин, дає можливість повернути мастильні матеріали у сферу їхнього призначення, заощадивши суттєві кошти на їх виготовлення. Переробка дозволяє значною мірою відновити ці складні й цінні речовини та повернути їх споживачам.

Одним із перспективних методів утилізації, який дозволить запровадити неперервну технологію очищення великих обсягів відходів, є адсорбційне очищення, при якому адсорбент та сировина неперервно рухаються в адсорбері протитечією.

Однак такий спосіб потребує неперервної регенерації адсорбенту, а дотримання заданої якості очищення рафінату (продукту) значно ускладнюється відсутністю часу на підготовку технологічних умов до надходження іншого типу сировини.

Більшість досліджень світової, зокрема української науки наразі стосується адсорбційного очищення речовин медичного призначення (наприклад, крові) з обсягами, суттєво меншими у порівнянні з відпрацьованими оливами та мастилами. Установи Національної академії наук України (НАНУ), такі як Інститут сорбції та проблем ендоекології НАНУ, Інституту хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАНУ, Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А. І. Думанського НАНУ, деякі вищі навчальні заклади та інші організації України виконують також великі обсяги науково-практичних робіт у напрямках створення адсорбентів та очищення рідин, але очищенню індустриальних і транспортних мастильних матеріалів, особливо керуванню такими процесами, присвячено недостатньо уваги.

Тема дослідження дисертаційної роботи актуальна, оскільки передбачає створення такої системи керування неперервним адсорбційним очищенням відпрацьованих олив і мастил, яка дозволить підвищити ефективність очищення шляхом дотримання вимог до якості продукту та принципів ресурсозбереження за умов специфічної нестабільності властивостей сировини та нестаціонарності властивостей адсорбенту й адсорбера.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до плану наукових досліджень за темою «Створення комп'ютерно-інтегрованих систем керування технологічних процесів та виробництв переробних галузей промисловості України для забезпечення ресурсо- та енергозберігаючих режимів їх функціонування» – державний реєстраційний номер 0116U001765.

Мета роботи і завдання дослідження. Мета роботи – підвищення ефективності виробництв по очищенню відпрацьованих олив і мастил від забруднювальних речовин шляхом створення системи керування процесом неперервного адсорбційного очищення, яка базується на дотриманні вимог до показників якості продукції та на принципах ресурсозбереження.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі дослідження:

- 1) визначити задачі керування адсорбційним очищенням олив і мастил з урахуванням особливостей процесу;
- 2) створити системи керування процесом очищення в режимі зміни сировини;
- 3) створити математичні моделі технологічного об'єкта для застосування в системі керування очищенням у режимі сталої сировини;
- 4) створити системи керування очищенням у режимі сталої сировини;
- 5) створити інтегровану систему керування адсорбером поєднанням систем керування в режимі сталої та змінної сировини.

Об'єкт дослідження – процес неперервної адсорбції у протитечійному адсорбері виробничої системи очищення відпрацьованих олив та мастил.

Предмет дослідження – моделі та системи керування процесом адсорбційного очищення, які дозволяють підтримувати задані показники якості очищення та принципи ресурсозбереження.

Методи дослідження. У роботі використовувалися методи системного аналізу, проєктування баз даних, аналітичного моделювання, експериментально-статистичні методи ідентифікації властивостей об'єктів, теорії автоматичного керування, зокрема методи адаптивного та нечіткого керування, методи формування та використання експертних знань.

Наукова новизна одержаних результатів.

- 1) Удосконалено систему керування процесом адсорбції, в якій на відміну від усталених, враховано можливість суттєвих змін властивостей нової забрудненої сировини, для чого передбачено автоматизований пошук у базі даних речовин-аналогів нової сировини, статистичні дослідження знайдених у

базі варіантів тиску та температури в адсорбері для аналогів, а також прийняття рішень щодо початкових значень цих режимних параметрів.

2) Удосконалено систему адаптивного керування процесом адсорбції, в якій на відміну від відомих, що базуються на поточній ідентифікації моделей динаміки процесу та на наступному визначенні параметрів налаштування регуляторів тиску та температури в адсорбері, уведено корегування початкових значень цих режимних параметрів за концентраціями ароматичних вуглеводнів, сірки та смол в очищеному продукті, що дозволяє дотримуватися вимог до якості очищення продукції та занести в базу даних значення відповідних властивостей нової сировини і потрібні для її переробки тиск та температуру.

3) Дістала подальшого розвитку система адаптивного керування тиском і температурою в адсорбері з корегуванням початкових значень цих режимних параметрів за концентраціями ароматичних вуглеводнів, сірки і смол, в якій на відміну від усталених способів, значення корегувальних сигналів визначають на основі нечітких множин і нечіткої логіки, що дозволяє підвищити якість продукції в умовах відсутності обґрунтованих математичних залежностей за допомогою досвіду фахівців.

4) Запропоновано інтегровану систему керування адсорбційним очищенням шляхом поєднання системи керування процесом при суттєвій зміні властивостей нової забрудненої сировини з системою керування процесом при сталих властивостях забрудненої сировини, яке передбачає чергування етапів визначення режимних параметрів адсорбції за сировинами-аналогами та за показниками якості очищеного продукту, причому режимні параметри другого етапу запам'ятовуються в базі даних сировин-аналогів першого етапу, це поєднання дозволяє забезпечити якість продукції і ресурсозбереження за рахунок підвищення рівня відповідності між режимними параметрами та поточним властивостям забрудненої сировини.

5) Дістало подальшого розвитку математичне моделювання адсорбційного очищення, що полягає у структурній ідентифікації моделі

динаміки процесу адсорбції, призначеної для адаптивної системи керування, а також у статистичних залежностях між властивостями сировини та відповідними режимними параметрами, які об'єднані в базі даних сировин-аналогів.

Практичне значення отриманих результатів. Практично цінними є такі результати досліджень:

- проведена систематизація задач керуванням адсорбційним очищенням дозволяє скоротити тривалість і підвищити ретельність виконання етапів аналізу технології як об'єкта автоматичного керування, задач керування та вибору математичного забезпечення системи керування адсорбційним відновленням властивостей олив і мастил при проєктуванні або модернізації систем автоматизації;

- отримання моделей адсорбції, призначених для систем керування адсорбційним очищенням ВОР, може бути використано для аналогічних процесів, враховуючи складність експериментальних робіт в умовах виробництва та неефективність проведення досліджень у лабораторних умовах;

- визначення початкових режимних параметрів адсорбції для нової за властивостями сировини дозволяють підвищити ефективність роботи систем керування виробництв з регенерації відходів за рахунок скорочення часу та підвищення точності визначення необхідних умов переробки різноманітної забрудненої сировини;

- створена адаптивна система керування підвищить ефективність очищення за рахунок більш оперативного визначення потрібних керувальних впливів з урахуванням невизначеностей стану технологічної системи;

- застосування нечіткої автоматичної системи керування, бази знань для діагностувальної експертної системи та інших застосувань експертних знань дозволяють розв'язувати задачі підвищення якості продукції та безпеки виробництва;

– запропонована система заходів, яка підвищить ефективність використання знань, забезпечить більшу ефективність автоматизації виробництва з очищення ВОР та буде корисна для інших виробництв.

Особистий внесок здобувача.

Дисертаційна робота є результатом самостійних досліджень здобувача. Вона самостійно сформувала завдання і мету дослідження, наукові результати, виконала теоретичну і практичну частини дисертації. З опублікованих наукових праць, які написані у співавторстві, використано лише результати розробок здобувача. Особистий внесок автора конкретизовано у списку публікацій.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, викладених у дисертації, було висвітлено на таких конференціях.

1. Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами (м. Київ 2019, 2021, 2023).
2. Інформаційні технології і автоматизація (м. Одеса 2020, 2022).
3. Філософія і науково-технічна творчість у хронотопі технічного університету (м. Київ 2020).
4. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (м. Київ, 2021, 2023).

Публікації. За результатами досліджень було опубліковано 17 наукових робіт, з яких 5 статей у фахових українських виданнях; 1 стаття в іноземному виданні, що входить до першого-третього квартилів (Q1-Q3) відповідно до класифікації SC Imago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports наукометричної бази Scopus і Web of Science; 2 авторських свідоцтва на твір; 1 розділ у колективній монографії; 7 матеріалів тез міжнародних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, переліку джерел посилань (67) та 4 додатків. Повний обсяг дисертації складає 192 сторінки, з них основний зміст роботи викладено на 142

сторінках друкованого тексту, в тому числі 78 рисунків, 3 таблиць та 56 формул.

1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ АДСОРБЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ РЕЧОВИН ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

При відновленні відпрацьованих олив або мастил речовин застосовують різні технологічні методи [1], які пов'язані з фізичними (відстоювання, фільтрація, сепарація), фізико-хімічними (коагуляція, адсорбційне очищення, термовакuumне висушування, селективне розчинення) та хімічними (кислотне, лужне оброблення, гідроочищення) процесами. Показником ефективності наведених методів є склад очищеної оливи або мастила, зокрема, вміст у них забруднювачів [2].

Перспективним є метод адсорбційного очищення [3], який реалізують у двох варіантах – періодичне та неперервне. Другий варіант дозволяє очищувати більші обсяги речовин, але має достатньо складну технологічну систему та більш наукоємний.

1.1 Технологічна система неперервного адсорбційного очищення олив і мастил

Метод неперервного адсорбційного очищення застосовують для відпрацьованих олив і мастил. Його використання дозволяє знизити виробничі втрати, які визначаються кількістю випалюваних з адсорбенту смол, з отриманням нового продукту – високоароматизованого рафінату, що містить невелику кількість парафінових і нафтових вуглеводнів і може бути використаний як сировина для нафтохімічної промисловості (зокрема пластифікатор, наповнювач для синтетичного каучуку та гумотехнічних виробів) [4], [5].

При очищенні забруднених олив або мастил використовують синтетичні адсорбенти, які є дефіцитними і мають високу вартість, що робить їх застосування економічно вигідним тільки за умови багаторазового використання після відновлення. Необхідність відновлення адсорбентів

ускладнює використання їх для регенерації олив, оскільки потрібні додаткове обладнання та значні витрати робочої сили. Технологія неперервного адсорбційного очищення передбачає замкнений цикл виробництва – від очищення забруднених олив або мастил до регенерації адсорбенту.

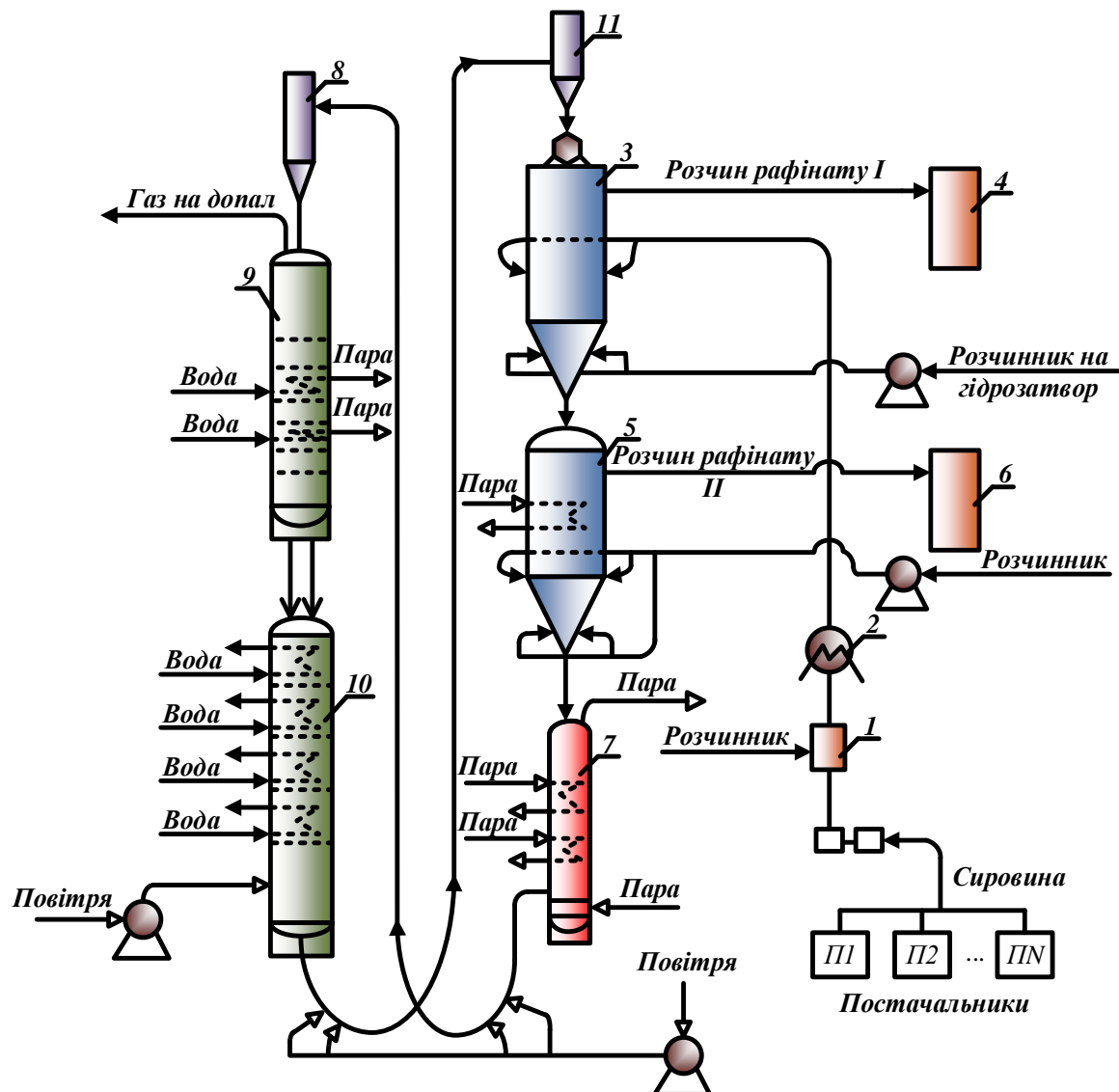
1.1.1 Опис технологічної системи неперервного очищення

Розглянемо технологічний процес адсорбційного очищення олив та мастил [4], схема якого зображена на рисунку 1.1, як об'єкт автоматизації.

Сировину – забруднену оливу або мастило, – яка може бути отримана від різних постачальників (П1, П2, ..., ПN), насосом направляють у діафрагмовий змішувач 1, де його змішують з необхідною кількістю розчинника для пониження в'язкості, що підвищить ступінь поглинання адсорбентом забруднювачів. Розчин охолоджують у холодильнику 2 до 40 °С і направляють в адсорбер 3, по перетину якого розташований розподільний пристрій для рівномірного розподілу сировини в апараті. У верхню частину адсорбера 3 неперервно подають адсорбент, рівномірний розподіл якого по перетину апарату забезпечують спеціальним розподільним пристроєм – «павуком». Потік адсорбенту, що рухається вниз, неперервно контактує з потоком розчину сировини, яку піднімають вгору, при цьому відбувається процес вилучення з останньої небажаних компонентів (важких ароматичних вуглеводнів, смол, сірчистих з'єднань). У верхній частині адсорбера 3 (вище рівня адсорбенту) знаходиться відстійна зона, де розчин рафінату відстоюють від частинок адсорбенту. Відстояний розчин через фільтри подають у резервуар 4.

Адсорбент, насичений ароматичними вуглеводнями і смолами, виходить з адсорбера 3 через штуцер у конічній частині апарата у вигляді суспензії. Для запобігання віднесення сировини з суспензією в нижню конічну частину адсорбера подають розчинник у кількості 1 об'єм розчинника на 1 об'єм адсорбенту. Рівномірний вихід суспензії з адсорбера 3 забезпечують

вирівнювальним пристроєм у вигляді зворотного конуса, встановленого у конічному днищі; зміщуючи цей конус, можна змінювати ширину кільцевої щілини на виході суспензії. Суспензія з адсорбера 3 самопливом направляється в десорбер 5, де при температурі 90 – 95 °С ароматичні вуглеводні, що знаходяться у порах адсорбенту, десорбують нагрітим розчинником. Для підтримання температури десорбції в десорбері 5 розташовані чотири змійовика, які обігрівають паром.



1 – діафрагмовий змішувач; 2 – холодильник; 3 – адсорбер; 4, 6 – резервуари;
5 – десорбер; 7 – сушарка; 8, 11 – бункери; 9 – регенератор; 10 –
чотириступеневий холодильник

Рисунок 1.1 – Технологічна схема процесу неперервного очищення олив та
мастил адсорбентами [4]

Розчин ароматичних вуглеводнів (рафінат II), що виходить з верху десорбера 5, через фільтри направляють у резервуар 6. Адсорбент, що містить смоли і розчинник, промивають підігрітим розчинником у конічній частині десорбера 6.

Суспензію з десорбера 6 направляють у східчасто-протиструменеву сушарку 7 з киплячим шаром, де адсорбент висушують при температурі 150 °С. Кипіння створюють паром під тиском 1 МПа. Тепло для сушіння передають паром під тиском 1,8 МПа через обігрівальні змійовики.

З сушарки 7 адсорбент подають пневмотранспортом у бункер 8 і звідти в регенератор 9, в якому випалюють смоли за допомогою гарячого повітря. Корпус регенератора оснащено змійовиками для його охолодження водою. Димові гази – суміш повітря з продуктами згоряння олив/мастил та смол – і пару використовують в інших ланках технологічного процесу. Регенований адсорбент з температурою 650 °С направляють у нижче розташований чотириступеневий холодильник 10, де його охолоджують у киплячому шарі. Охолоджений адсорбент подають пневмотранспортом в апарат 11 і звідти знову в адсорбер 3.

Як адсорбент використовують крихту (фракція 0,25 – 0,5 мм) синтетичного алюмосилікатного каталізатора. Застосування такого адсорбенту дозволяє здійснити очищення нафтопродуктів і забезпечити повне відновлення активності циркулюючого каталізатора при регенерації його повітрям [4].

Відпрацьовані оливи та мастила – 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. [6]. При цьому близько 75 % ВОМ не проходять потрібної обробки, що призводить до критичного забруднення навколишнього середовища.

Продуктивність неперервного АМ достатньо велика, тому забруднені матеріали можуть надходити з різних джерел (від різних постачальників), отже мати суттєво різні властивості.

Виконаємо аналіз технологічної системи адсорбційного очищення забруднених олив та мастил як об'єкта автоматизації, для цього виділимо в ній три складові – етапи підготовки сировини, адсорбції та відновлення адсорбенту. Структурну схему ТС наведено на рисунку 1.2.

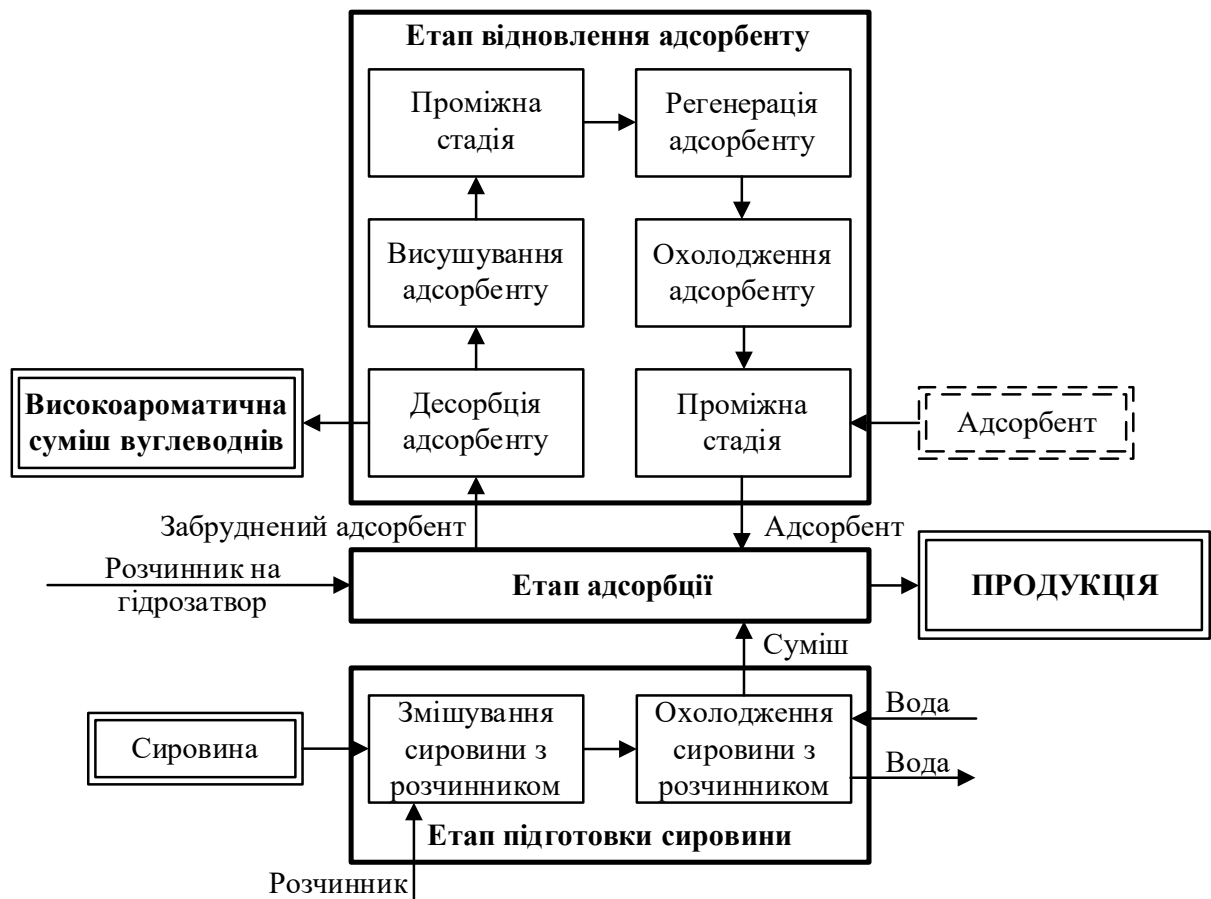


Рисунок 1.2 – Структурна схема технологічної системи адсорбційного очищення з виділеними його етапами та головними матеріальними потоками

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 ТС

адсорбент і сировину подають протитечією. Процес адсорбції визначимо як технологічний об'єкт керування.

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).

Розглянемо більш детально технологічне оформлення очищення у протиточному адсорбері неперервної дії (рисунок 1.3).

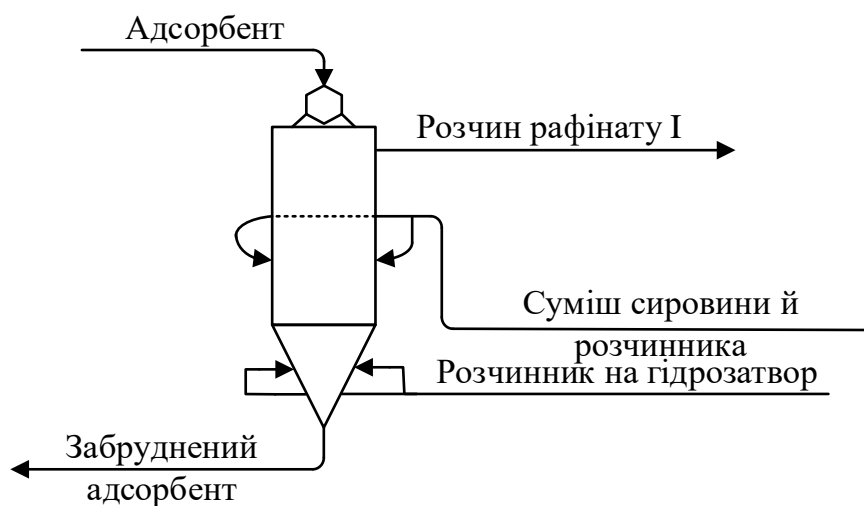


Рисунок 1.3 – Технологічна схема адсорбера

У верхню частину апарату подають адсорбент, протитечією якому направляють охолоджену суміш сировини й розчинника. Внаслідок цього забезпечують її неперервний контакт з потоком адсорбенту й вилучення із сировини небажаних компонентів (важких ароматичних вуглеводнів, смол, сірчистих з'єднань). Очищений продукт направляють у верхню частину адсорбера, де знаходиться відстійна зона, а забруднений адсорбент подають на відновлення і повернення в технологічну ланку. При цьому необхідно враховувати, що після першого «прогону» – циклу адсорбції – змінюються фізико-хімічні властивості адсорбенту.

Сировиною, що надходить в апарат, є забруднена олива або мастило, з якої попередньо вилучають присадки – так зване базове мастило (далі – ВОМ). Воно містить у собі групи ізопарафінових, нафтенно-парафінових, нафтенно-ароматичних й ароматичних вуглеводнів з різним ступенем циклічності, а також гетероорганічні з'єднання, до яких відносять кисне-, сірчато- й азотовмісні. Залежно від того, які групи переважають у складі мастил, виділяють декілька їх різновидів: парафінові, нафтенові, ароматичні та змішані. Для виробництва мастильних матеріалів поширеним є використання парафінових мастил, які володіють необхідними в'язкісно-температурними характеристиками [1]. Так, бажаними компонентами в мастилі є ізопарафіни, нафтенно-парафінові, моно- та біциклічні ароматичні вуглеводні з довгими боковими ланками. До компонентів забруднювачів відносять поліциклічні ароматичні вуглеводні, смоли та сірчисті з'єднання. При цьому вуглеводні є неполярними або слабо полярними речовинами, а смоли та сірчисті з'єднання – полярними.

1.1.2 Властивості забруднених речовин та адсорбенту

Одним з показників, за якими визначають експлуатаційні властивості олив або мастил, є стабільність. Вона буває фізичною й хімічною та характеризує стійкість мастильних матеріалів відповідно до фізичних та хімічних процесів, що ведуть до зміни їх складу і властивостей [5].

У [7] розглядають оливи та мастила як наносистеми, в яких присутні різні за хімічним складом і будовою наноструктури. Автори вказують на тісний зв'язок експлуатаційних характеристик мастильних матеріалів з властивостями наночастинок в цих системах.

З огляду на це, адсорбцію доцільно розглядати в наносередовищі, в якому поглинальні властивості адсорбенту пов'язані з розмірами наночастинок та структурою каркасу, який вони утворюють.

При створенні вербальної моделі спробуємо уявити взаємодії частинок при контактах адсорбенту – алюмосилікатного каталізатора – з одного боку та адсорбтиву й адсорбату – з іншого.

Враховуючи особливості забруднювачів, адсорбцію виконують на полярних адсорбентах [8], [9], молекули яких складаються, в основному, з оксидів кремнію та алюмінію.

Структура гранул (елементарних комірок) алюмосилікатного каталізатора передбачає наявність у них великих і малих адсорбційних порожнин. Можливість проникання адсорбату в зазначені порожнини визначають за розмірами вхідних вікон, які, у свою чергу, залежать від розташування кисневих кілець та числа атомів кисню в них. Кожна велика порожнина має чотири входи, які створені 12-членними кисневими кільцями; вхідні вікна малих порожнин створені 6-членними кисневими кільцями. Таким чином, великі порожнини, в основному, заповнюються адсорбатом, а малі – водою [8], [10].

Наведемо в таблиці 1.1 геометричні характеристики гранули (елементарної комірки) адсорбенту.

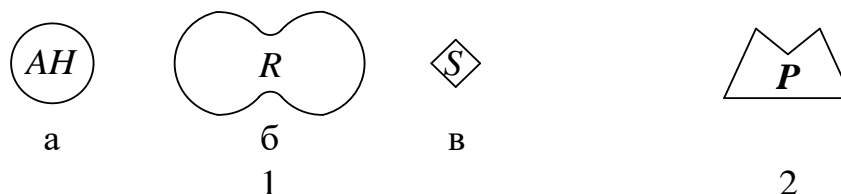
Таблиця 1.1 – Геометричні характеристики гранул адсорбенту

	Діаметр вхідного вікна, нм	Діаметр порожнини, нм	Об'єм порожнини, нм ³	Загальний об'єм, нм ³
Мала порожнина	0,4	0,66	0,15	—
Велика порожнина	0,9	1,162	0,822	—
Гранула	—	—	—	7,776

Спочатку відбувається адсорбція смол через їх високу полярність, що обумовлена несиметричністю будови молекул і наявністю в них конденсованих ароматичних кілець та гетероатомів сірки, кисню й азоту. Далі відбувається адсорбція молекул сірки й ароматичних вуглеводнів. Останні

заповнюють адсорбент через вплив електростатичного поля, внаслідок якого в їх молекулах виникає індукування дипольного моменту [9], [10].

Для спрощеної візуалізації описаних процесів запропоновано використати наступні схематичні позначення компонентів забруднювачів та ВОМ (рисунок 1.4).



1 – компоненти забруднювачів: а – молекула ароматичних вуглеводнів (*Aromatic Hydrocarbons*); б – молекула смол (*Resin*); в – молекула сірчистих з'єднань (*Sulfur*); 2 – парафіни (*Paraffins*)

Рисунок 1.4 – Схематичне позначення компонентів забруднених ВОМ

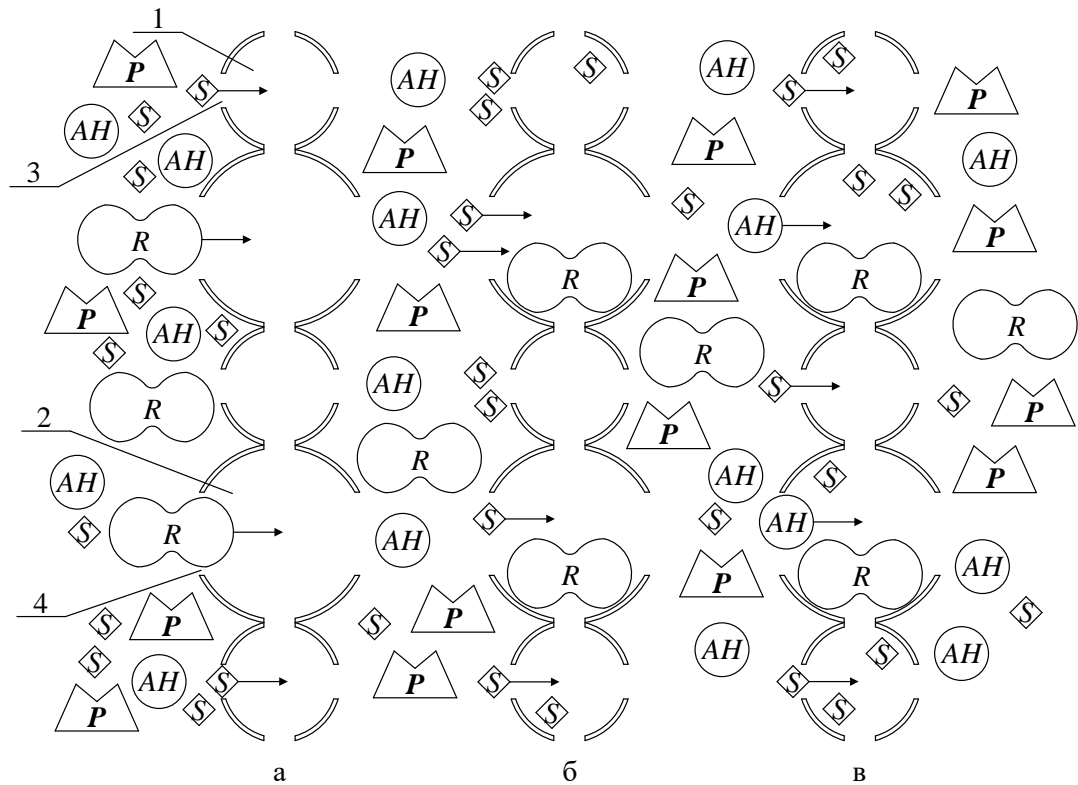
На рисунку 1.5 наведено процес розділу багатокомпонентної суміші – очищення ВОМ від ароматичних вуглеводнів (рисунок 1.5.а), сірчистих з'єднань (рисунок 1.5.б) та смол (рисунок 1.5.в).

У малих 1 та великих 2 порожнинах поглинання відбувається через вхідні вікна 3 і 4 відповідно. При цьому, згідно з вищенаведеним, у вхідні вікна 3 потрапляють лише молекули сірки, а за рахунок великих розмірів вхідних вікон 4, в них можлива адсорбція ароматичних вуглеводнів, смол та сірчистих з'єднань.

На рисунку 1.6 зображено можливі варіанти взаємодії частинок різних компонентів суміші з частинками адсорбенту для створення уяви про характер їх розділення.

Для того, щоб адсорбент поглинув частинку забруднювача, необхідно, щоб її критичний діаметр був меншим за діаметр вхідного вікна гранули адсорбенту. Розмір молекул забруднювачів залежить від їх структури, зокрема, критичний діаметр смол та діаметр вхідних вікон великих порожнин

майже однакові. У такому випадку адсорбування відбувається з великою енергією активації й молекула повинна мати достатній запас енергії [8], [10].



1 – мала порожнина; 2 – велика порожнина; 3 – вхідне вікно малої порожнини; 4 – вхідне вікно великої порожнини; а – адсорбція смол; б – адсорбція сірки; в – адсорбція ароматичних вуглеводнів

Рисунок 1.5 – Загальна схема адсорбції оливи або мастила

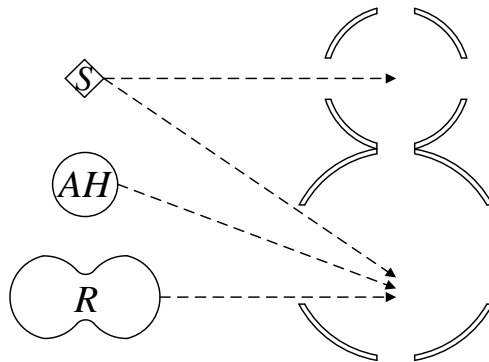
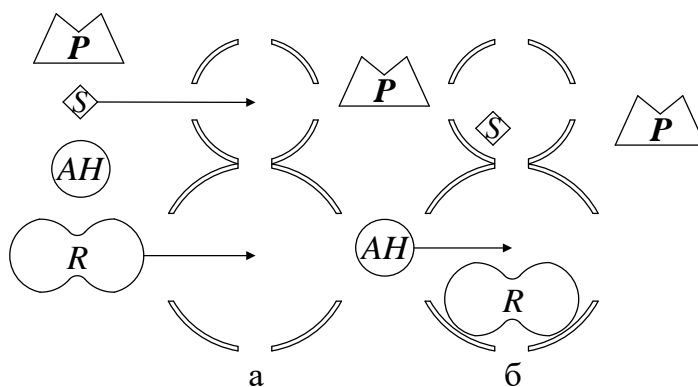


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення адсорбції забруднювачів з BOM залежно від розмірів вхідних вікон

Як видно з рисунка 1.6, поглинальна здатність адсорбенту істотно залежить від розмірів вхідних вікон порожнин. Так, малі порожнини доступні лише для молекул сірчистих з'єднань, у той час як великі порожнини можуть вміщувати в собі всі наведені компоненти забруднювачів. При цьому одночасно у вхідне вікно малої порожнини може потрапити одна молекула сірчистих з'єднань. Для вікон великих порожнини існує декілька варіантів одночасного потрапляння забруднювачів у них: одна молекула смол, одна молекула ароматичних вуглеводнів, одна або дві молекули сірчистих з'єднань. При багатоконпонентній сировині та різноманітні геометричних характеристик гранул адсорбенту можна вважати, що впродовж часу взаємодії цих двох потоків в апараті виникає занадто багато способів заповнення гранул.

Наведемо на рисунку 1.7 принцип заповнення гранули адсорбенту забруднювачами. Наведений приклад розвитку процесу адсорбції, зокрема, може відбуватися таким чином. У малу і велику порожнини одночасно потрапляють, відповідно, молекули сірчистих з'єднань та смол (рисунок 1.7.а). У подальшому процесі очищення, відповідно до розмірів вхідних вікон, бере участь велика порожнина, в яку послідовно потрапляють молекули сірки та ароматичних вуглеводнів (рисунок 1.7.б).

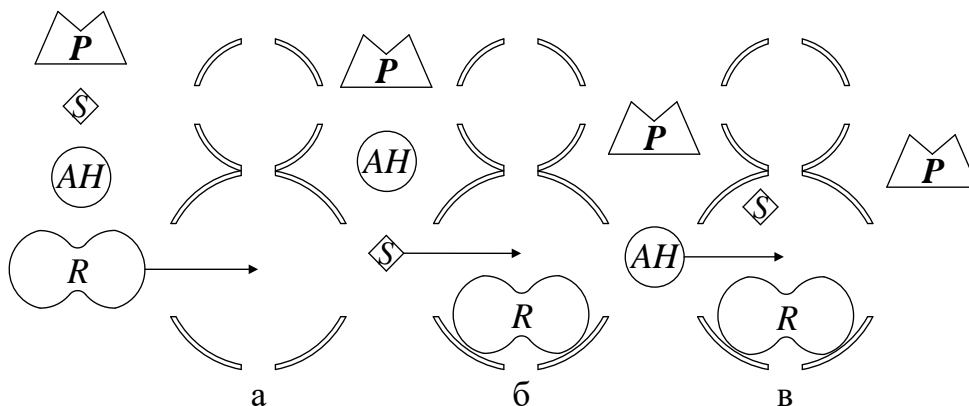


а – вилучення молекул смол та сірки; б – вилучення молекули ароматичних вуглеводнів після етапу а)

Рисунок 1.7 – Загальний принцип заповнення гранули адсорбенту

Наведемо окремо на рисунку 1.8 порядок заповнення великої порожнини гранули адсорбенту.

У великій порожнині поглинання молекул забруднювачів відбувається в такому порядку: смоли (рисунок 1.8.а) → сірчисті з'єднання (рисунок 1.8.б) → ароматичні вуглеводні (рисунок 1.8.в) [8], [9].



а – вилучення молекули смол; б – вилучення молекули сірки; в – вилучення молекули ароматичних вуглеводнів

Рисунок 1.8 – Порядок заповнення великої порожнини гранули адсорбенту

Парафіни, які є основою мастильних матеріалів, не потрапляють всередину адсорбенту через властивість вибіркової адсорбції, яку характеризують сили притягання між молекулою та поверхнею адсорбенту. Зазначені сили, у свою чергу, залежать від теплоти адсорбції, яка у випадку парафінів є найменшою, тому ступінь поглинання таких компонентів буде також дуже низьким порівняно із забруднювачами.

При описі сил, які впливають на перебіг процесів адсорбції, використовують різні їх класифікації. Розглянемо їх детально.

Адсорбція буває фізичною та хімічною (хемосорбція). Остання має місце у випадку хімічної схожості адсорбату та адсорбенту і передбачає їх хімічну взаємодію. При очищенні мастильних матеріалів відбувається фізична адсорбція, яка полягає у збільшенні концентрації речовини на поверхні адсорбенту за рахунок ван-дер-ваальсових (міжмолекулярних) сил [10]. У такому випадку, молекула адсорбату потрапляє на поверхню адсорбенту, який

затримує цю молекулу своїм силовим полем протягом деякого часу, після чого відбувається процес десорбції. Сили Ван-дер-Ваальса діють на відстанях, що значно перевищують розміри адсорбованих молекул, тому на поверхні адсорбенту зазвичай утримують кілька шарів молекул адсорбату [8], [10].

Покривання адсорбатом поверхні адсорбенту частково врівноважує поверхневі сили і внаслідок цього знижує поверхневий натяг. Разом з цим відбувається спад ентропії системи за рахунок зменшення ступеня свободи адсорбованих молекул. Це призводить до зменшення ентальпії системи, що рівнозначно виділенню тепла, тобто процеси адсорбції екзотермічні [8], [10].

Міжмолекулярні сили у процесах адсорбції мають електричну природу й залежать від відстані між молекулами. Розрізняють сили взаємного тяжіння, до яких відносять електростатичні та дисперсійні U_d , а також сили відштовхування між заповненими електронними оболонками атомів молекул. У свою чергу, серед електростатичних сил виділяють орієнтаційні U_o та індукційні U_i . Повний потенціал U ван-дер-ваальсових сил [10] визначають за формулою (1.1):

$$U = U_o + U_i + U_d. \quad (1.1)$$

Орієнтаційні сили мають місце при адсорбції на поверхні полярних молекул, що несуть постійні електростатичні заряди (іони, диполі), індукційні викликані поляризацією нейтральної молекули під дією постійного диполя. Наведення диполя – індукування молекул за рахунок наявності властивості поляризованості. Постійний диполь може індукувати дипольний розподіл зарядів у неполярній молекулі, яка стає полярною. В результаті молекули притягують одна одну, але не так сильно, як дві полярні молекули.

Індукційні сили, на відміну від орієнтаційних, обумовлені поляризацією зсунення й не залежать від температури [8], [10], [11].

Дисперсійні сили характеризують електричну взаємодію між миттєвими диполями, змінними за величиною і напрямком, яка виникає внаслідок руху електронів в атомах, незалежно від наявності в них постійного дипольного

моменту. Оскільки під час взаємодії двох молекул, які зближуються, зменшується повна енергія системи, такі сили є силами тяжіння [8], [10].

Фізична адсорбція, не вимагає енергії активації, отже, її швидкість залежить тільки від числа зіткнень молекул з поверхнею адсорбенту [11].

Одночасно із силами тяжіння у процесах адсорбції діють сили міжмолекулярного відштовхування, тобто відштовхування електронних оболонок молекул на дуже малих відстанях, що перешкоджає їх злиттю [8].

Причинами адсорбції, близької до фізичної, вважають також утворення водневих зв'язків, які, зокрема, виникають при адсорбції на адсорбентах з поверхневими гідроксильними групами. При утворенні водневого зв'язку енергія взаємодії адсорбтиву з адсорбентом досить велика, і тому теплота, що виділяється при такій адсорбції, зазвичай значно більше теплоти адсорбції речовин, подібних за геометричною формою і розміром молекул, які не утворюють водневих зв'язків [8].

У процесах адсорбції на полярних адсорбентах в основному діють орієнтаційні та індукційні сили. Полярні сили (сили притягання між полярними молекулами) переважають над дисперсійними, тому адсорбованість компонентів на адсорбентах такого типу зростає зі збільшенням дипольного моменту їх молекул. Адсорбція неполярних речовин, до яких належать вуглеводні, викликає утворення в їх молекулах індукованого диполя [9], [10], в результаті відбувається притягання неполярних молекул ароматичних вуглеводнів до полярних молекул адсорбенту, а отже, їх поглинання.

На перебіг адсорбційних процесів впливають властивості забрудненої ВОР, адсорбенту та розчинника. При цьому розчинник необхідний для зниження в'язкості сировини, створення необхідного гідравлічного режиму рухливих потоків і для покращення дифузії у шпарини адсорбенту речовин, які адсорбують [8], [9].

Як зазначено у п. 1.1.1, при очищенні ВОР використовують синтетичні адсорбенти, зокрема, крихту (фракція 0,25-0,5 мм) синтетичного

алюмосилікатного каталізатора [4], властивості якого змінюються з кожним циклом використання (цикл – перебіг процесів від етапу адсорбції до відновлення адсорбенту).

До властивостей адсорбенту належать [12]: *фізико-хімічні*: хімічний склад, вологоємність, водостійкість, механічна міцність; *структура*: каркасна структура, об'єм шпарин; *додані* (тобто ті, що набуті після регенерації): хімічний склад, каркасна структура, об'єм шпарин, вологоємність, водостійкість, механічна міцність, концентрації ароматичних вуглеводнів, сірки та смол.

Фізико-хімічні властивості забрудненої ВОР, її характеристики наведено на рисунку 1.9 [1]: компонентний склад (елементний, груповий та структурно-груповий), в'язкість, розмір молекул, вміст механічних домішок і води, концентрації ароматичних вуглеводнів, сірки та смол.



Рисунок 1.9 – Схема структурних компонентів сировини

Основні фізико-хімічні властивості розчинника після адсорбції: фракційний склад, температура кипіння.

Оскільки суміш, яку адсорбують, є багатокомпонентною, то основними є структурні особливості речовин, які беруть участь у зазначеному процесі. Останнє, у свою чергу, свідчить про вибірковість адсорбції.

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 володіють необхідними в'язкісно-температурними характеристиками [1]. 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 слабо полярними речовинами, а смоли та сірчисті з'єднання – полярними [12].

За конструкцією адсорбери неперервної дії розподілені по висоті за зонами (секціями) [3], [13]. 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 поглинають адсорбентом у нижній частині колони, 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.

1.1.3 Показники якості очищеної оливи або мастила

Фізико-хімічні властивості очищеної ВОМ: компонентний склад (елементний, груповий та структурно-груповий), індекс в'язкості, розмір молекул, вміст механічних домішок і води, концентрації ароматичних вуглеводнів, сірки та смол, температури застигання, спалаху, помутніння,

протизношувальні, мийно-диспергувальні та протиокислювальні властивості, корозійна активність, змащувальна здатність, щільність.

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, так і забруднювачі.

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

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) [1].

Для кожного з типів мастил залежно від призначення важливі декілька характеристик. Цю проблему відображає рисунок 1.10.

Наведені показники є загальними, а номенклатура оливних і мастильних матеріалів є дуже широкою, тому для оцінки якості конкретного типу речовин, які направляють на очищення, застосовують визначену нормативними документами комбінацію наведених факторів; окремо вони не характеризують повністю якість продукції.

Наприклад, для дизпалива ДЕСТи і регламенти виділяють такі основні характеристики – основні експлуатаційні показники дизельних палив [1], [14]: цетанове число, цетановий індекс, фракційний склад, в'язкість, щільність, температурні властивості (температури помутніння, застигання, спалаху, точка заупорки), коксованість палива, масова частка сірки, змащувальна здатність,

вміст води і твердих суспендованих частинок, вуглецевий нагар, вогнетривкі шлаки, сублімація.

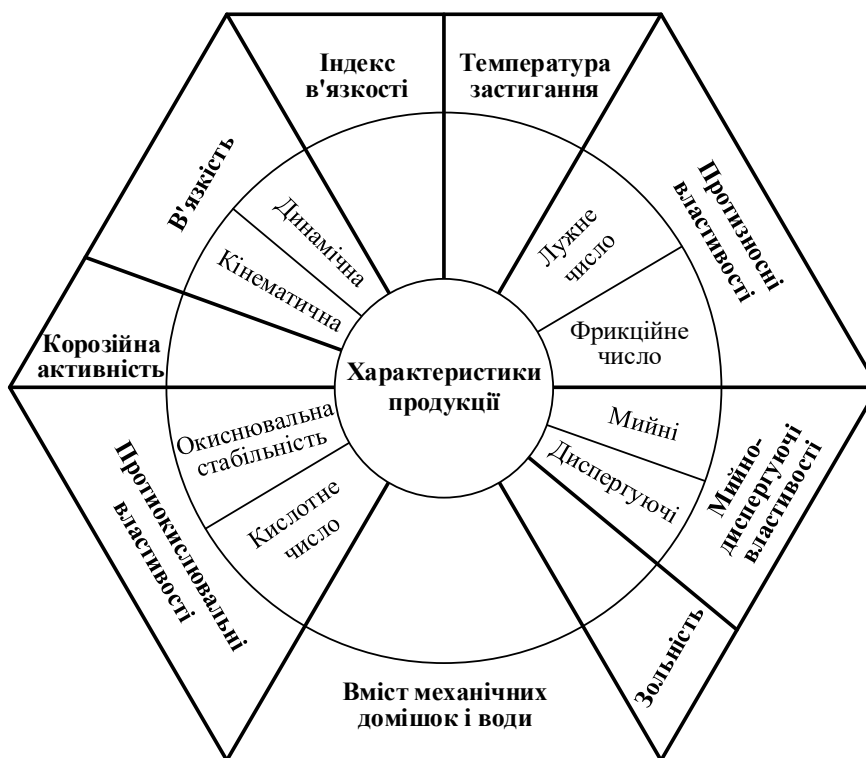


Рисунок 1.10 – Схема основних характеристик продукції

На якість продукції впливає безліч факторів [9], [15], [16], зокрема властивості забрудненої оливи, адсорбенту, розчинника, конструкційні властивості апарату, тиск у ньому тощо [12].

1.2 Аналіз існуючих систем автоматизації адсорбційних процесів

Процеси очищення широко застосовують у різних галузях промисловості. Метод адсорбції в наш час є одним з найбільш перспективних завдяки ефективності та можливості суттєвого зменшення навантаження, спричиненого викидами у вигляді відпрацьованих оливних і мастильних матеріалів, на довкілля. Зростання інтересу до цього методу знайшло відображення в кількості та різноманітті публікацій.

У праці [17] автори запропонували дискретну систему керування адсорбційним процесом очищення водню від забруднювачів зі створенням

аналітичних та імітаційних моделей. У [18] досліджено керування адсорбційним процесом зневоднення етанолу (біоетанолу) з використанням нейромережевого регулятора на основі прогнозувальних моделей. У [19] автори запропонували оптимальну прогнозувальну систему керування вилученням з повітря азоту N_2 . У [20] автори запропонували робастну систему керування періодичним адсорбційним процесом, яка передбачає забезпечення потрібного ступеня чистоти, визначеного як відношення молярної витрати цільового компонента (O_2) до молярної витрати газової суміші (N_2, O_2).

У наведених працях описані системи керування концентрацією одного компоненту або суміші, тобто вони не враховують багатоконпонентну адсорбцію. Таким чином, постає питання моделювання процесів очищення з урахуванням декількох компонентів, які необхідно вилучити. Також у цих працях не досліджені питання керування адсорбційними процесами, їх розглядають, в основному, з позиції узагальнених властивостей суміші компонентів (витрата, температура, концентрація певної речовини в іншій тощо), що дозволяє вирішувати задачі керування при малій кількості різноманітних забруднювачів, чи хоча б стабільних складах сировини, яку треба очистити. При регенерації відпрацьованих ВОМ має місце багатоконпонентна 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.

Математичне моделювання достатньо детально розглянуто в науковій літературі як при описі особливостей перебігу адсорбційних явищ [8] – [10], [13], так і при створенні застосувань для прогнозування результатів та керування процесом [21] – [23]. Обидва ці напрямки безумовно пов'язані метою найкращого відтворення поведінки процесу, а відрізняються в основному за критерієм можливості використання у виробничих умовах.

У працях [3], [13] автори розглянули основні теоретичні положення адсорбційних процесів та їх моделювання на макрорівні. У [8] – [10], запропоновано моделювання адсорбції з урахуванням структури адсорбентів та сил, що діють під час перебігу зазначеного процесу.

У [21] автори дослідили рівноважні стани та кінетику адсорбції для різних типів адсорбентів з використанням класичної теорії адсорбційних процесів, в результаті чого запропонували прогнозувальну модель, яка, при порівнянні з експериментальними даними, виявилася ефективною у випадку однокомпонентної адсорбції.

Так, у [22] 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.

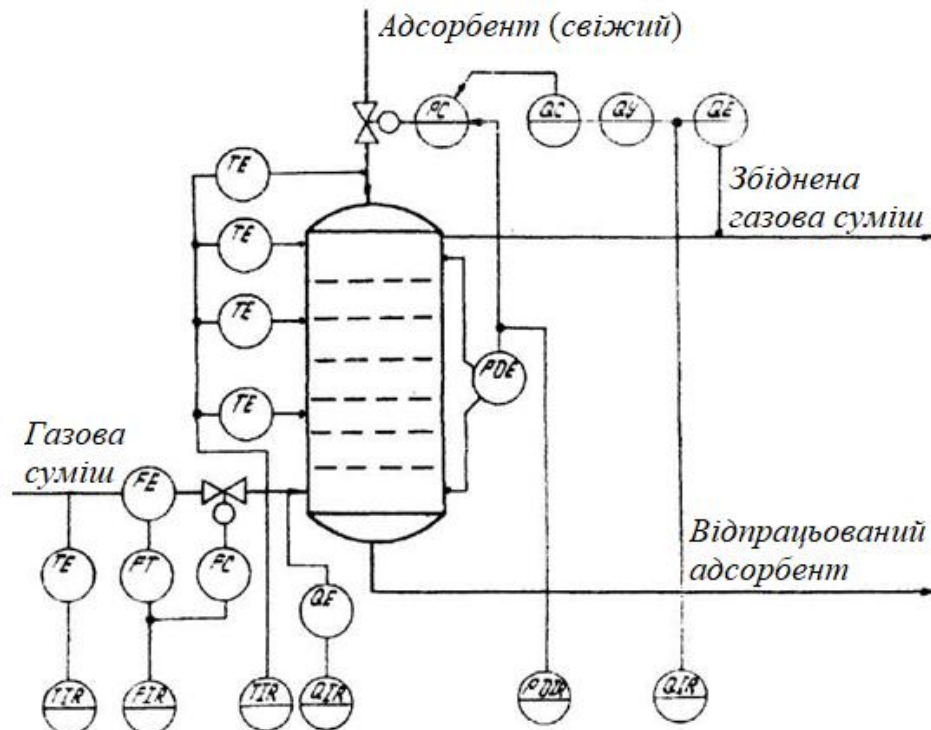
Таким чином, наведені дослідження не враховують багатоконпонентність сировини та продукції й не розглядають способи узгодження властивостей продукції.

При регенерації відпрацьованих ВОМ має місце багатоконпонентна 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.

У праці [22] розглянуто моделювання однокомпонентної адсорбції вуглеводневих сполук при різних умовах перебігу процесу – нелінійна адсорбція, адсорбція в багатоскладовому середовищі.

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.

Розглянемо протічній апарат неперервної дії 1 (рисунок 1.11) з киплячим (псевдозрідженим) шаром дрібнозернистого адсорбенту на тарілках 2 як об'єкт керування [2]. На верхню тарілку такого апарату подають адсорбент за допомогою дозатора 3. Під дією сили тяжіння адсорбент провалюється з тарілки на тарілку і виводиться у нижній частині адсорбера; газ направляють від низу до верху і виводять з верхньої частини апарату.



1 – адсорбційна колона; 2 – тарілки; 3 – дозатор

Рисунок 1.11 – Схема автоматизації процесу адсорбції [2]

Показник ефективності – концентрація компонента, який вилучають зі збідненої газової суміші. Мета керування – досягнення заданого значення зазначеної концентрації. Основний контур керування включає регулятор концентрації компонента, що адсорбують, у відпрацьованих газах, а керувальний вплив здійснюють зміною витрати адсорбенту (корегуванням роботи дозатора 3). Для усунення збурення по каналу витрати газової суміші, останню стабілізують.

Контролю підлягають витрата газової суміші, початкова і кінцева концентрації компонента, що адсорбують, температури газової суміші й

адсорбенту, температури по висоті адсорбера, тиску у верхній і нижній частинах колони, перепад тиску між ними. Сигналізації підлягають концентрація компонента, що адсорбують, у відпрацьованих газах і тиск у колоні; при різкому зростанні останнього повинен спрацювати пристрій захисту.

Регулювання гідравлічного опору колони. Одним з важливих параметрів процесу адсорбції у псевдозрідженому шарі є перепад тисків у верхній і нижній частинах колони. При постійній витраті газової суміші цей параметр визначають масою адсорбенту на тарілках, тому керувальний вплив при стабілізації перепаду тиску здійснюють корегуванням роботи дозувального пристрою. При використанні такої схеми зазвичай немає потреби у регулюванні кінцевої концентрації компонента, що адсорбують. Можна використовувати двоконтурну систему, основним параметром якої буде кінцева концентрація, а допоміжним – перепад тисків.

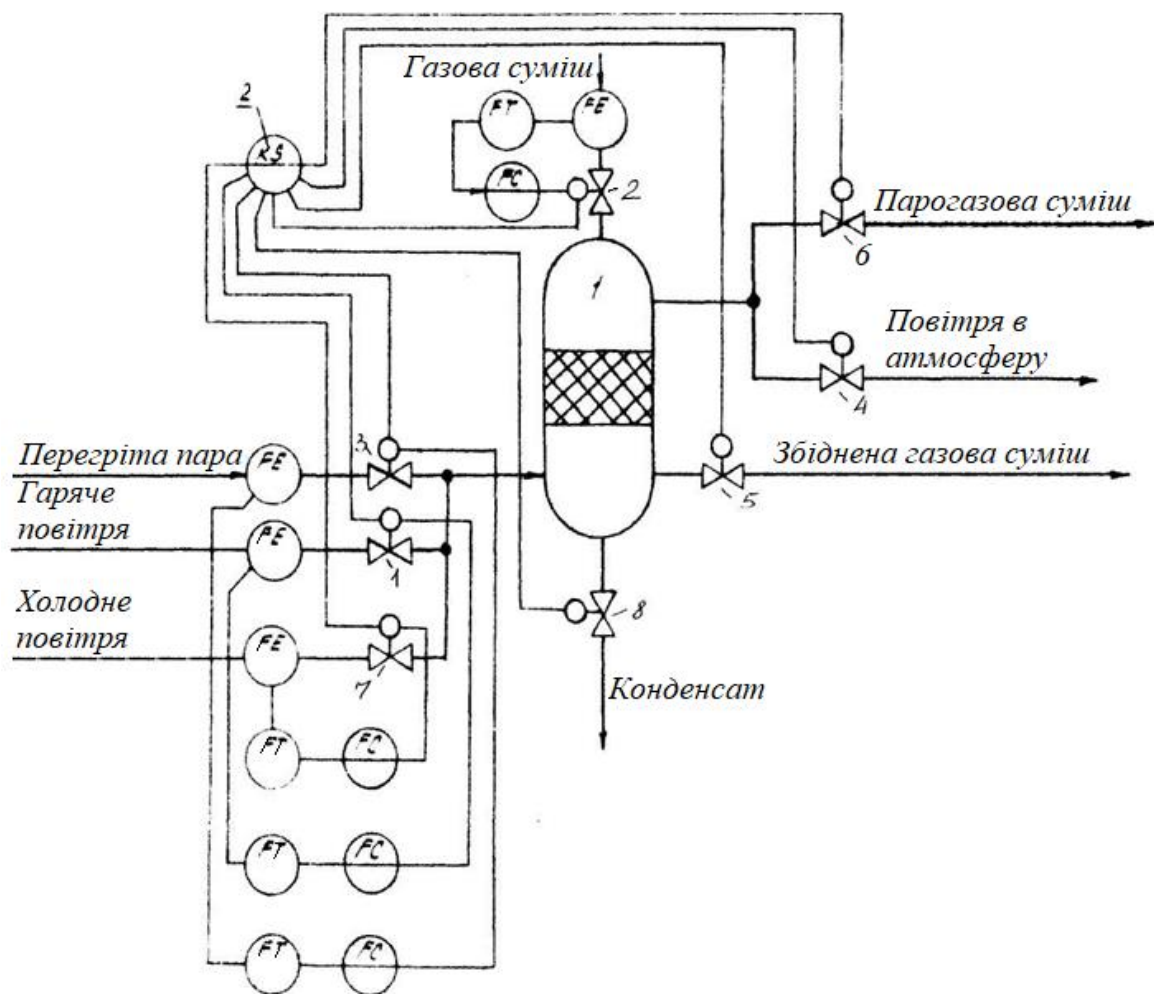
Перепад тиску по всій колоні визначають кількістю адсорбенту, що надходить на верхню тарілку, тобто перепадом тиску на ній. У зв'язку з цим можна йти шляхом стабілізації цього параметра, так як він значно менш інерційний, ніж перепад по всій колоні.

Регулювання апаратів з провальними тарілками змінного перерізу. Якщо конструкція тарілок дозволяє змінювати їх прохідний переріз, виникає ще один канал керувального впливу. Зазвичай поперечний переріз тарілок підтримують на такому значенні, щоб перепад тиску на окремих тарілках був постійним.

Роботу тарілок такої конструкції можна налаштовувати й на дискретний режим, коли порцію адсорбенту одноразово подають на верхню тарілку і залишають там протягом заданого часу; потім прохідний переріз тарілки відкривають, і адсорбент провалюється на наступну тарілку і т. д. Для керування такими тарілками встановлюють програмний пристрій, який відповідно до жорсткої часової програми відкриває і закриває прохідні перерізи тарілок. Також цей пристрій при скиданні адсорбенту з верхньої

тарілки подає сигнал дозатору на початок завантаження її свіжим адсорбентом. Завантаження відбувається до того моменту, коли перепад тиску на верхній тарілці досягає заданого значення.

Адсорбери з нерухомим шаром адсорбенту (рисунок 1.12) належать до апаратів періодичної дії. Для керування ними встановлюють програмний пристрій, який за жорсткою часовою програмою здійснює такі операції: відкриває клапани подавання газової суміші 1, 2 і закриває клапани подавання перегрітої пари 3, 6 (операція адсорбції); закриває клапани 1, 2, 4, 5, 7, 8 (операція десорбції); відкриває клапани 4, 7 і закриває клапани 1–4, 6, 8 (операції висушування адсорбенту), відкриває клапан 8 (операція зливу конденсату).



1-8 – клапани

Рисунок 1.12 – Регулювання адсорберів з нерухомим шаром адсорбенту [2]

У випадку автоматизації адсорбції горючих процесів, колони адсорбції і десорбції горючих продуктів повинні бути забезпечені засобами проти самозаймання поглинача, контролю за місцями самозаймання та пристроями для їх гасіння [2].

У [24] запропоновано спосіб автоматичного керування процесом адсорбційного очищення стічних вод, який включає вимірювання концентрації компоненту, який адсорбують, у воді на вході та на виході з адсорбера, витрати сорбенту та регулювання концентрації компоненту, який адсорбують, у воді після першого ступеня очищення до досягнення мінімального значення питомої витрати сорбенту зміною витрати сорбенту у першу ступінь очищення.

Критерієм оптимальності процесу є питома витрата сорбенту, тобто загальна кількість витраченого активованого вугілля на одиницю вагової кількості забруднювача (адсорбата), що надходить на очищення з вихідної води, яку оброблюють:

$$\eta = (m/QC_0) \rightarrow \min, \quad (1.12)$$

де η – критерій оптимальності; m – загальна витрата активованого вугілля (сорбенту); Q – витрата води, яку оброблюють; C_0 – концентрація сорбата у вихідній воді.

Позначивши через m_1 та m_2 витрати сорбенту на першій та другій ступенях очищення відповідно, отримаємо загальну витрату сорбенту m :

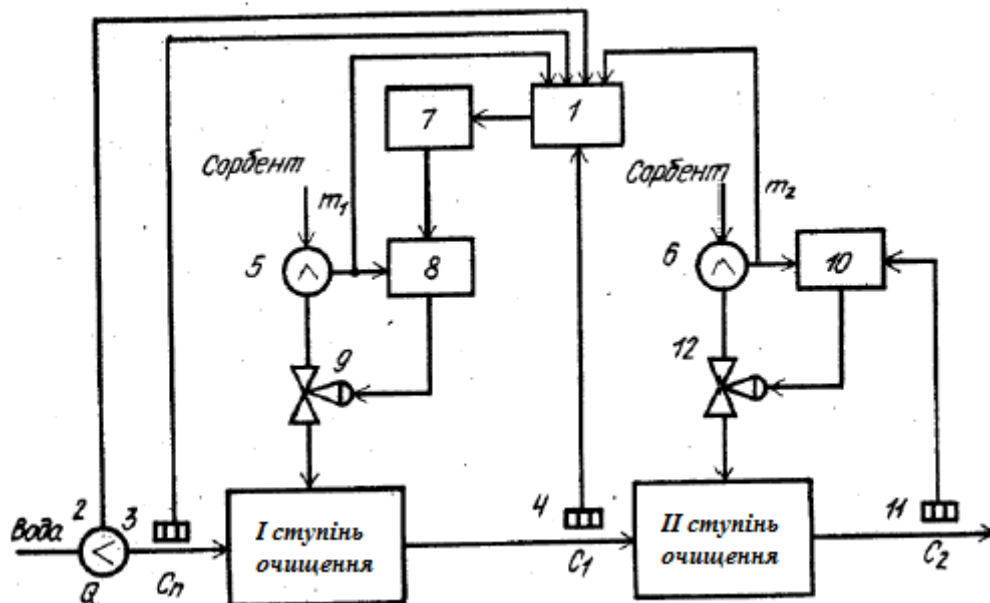
$$m = m_1 + m_2. \quad (1.13)$$

На рисунку 1.13 наведено блок-схему пристрою, що реалізує зазначений спосіб автоматичного керування процесами очищення.

Спосіб здійснюють таким чином [24].

На вхід обчислювального блоку 1 від витратомірів 2, 5, 6 і вимірювачів концентрації 3 і 4 подають сигнали, які пропорційні параметрам Q , C_0 , C_1 , m_1 , m_2 . Обчислювальний блок 1 виконує операції, зазначені у формулах (1.12) і (1.13), і на його виході утворюється неперервний сигнал, пропорційний критерію оптимальності η . Цей сигнал подають в екстремальний регулятор 7,

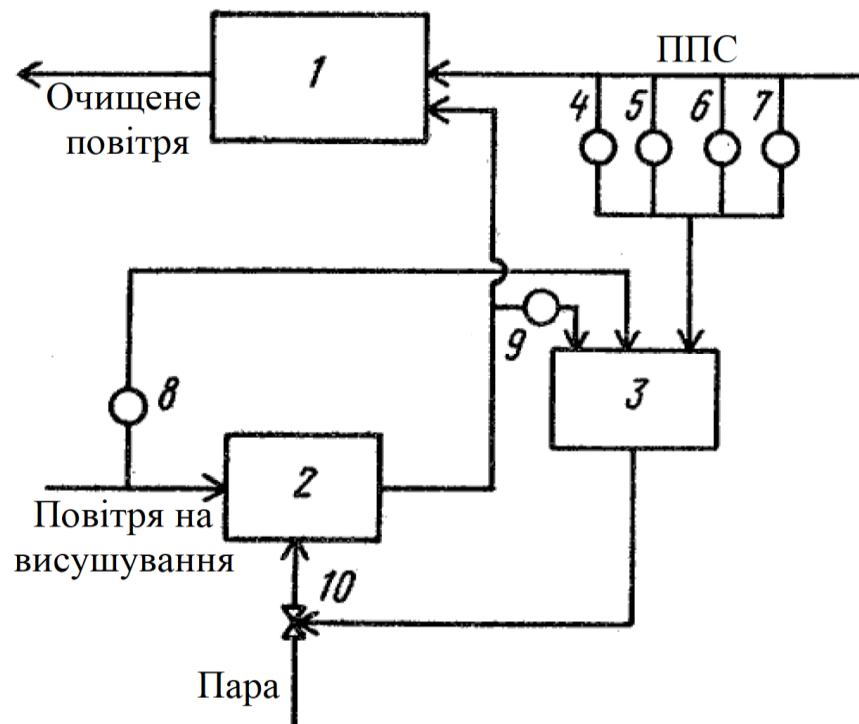
який здійснює пошук мінімального значення критерію оптимальності. Вихідна величина екстремального регулятора впливає на задатчик регулятора витрати сорбенту на першу ступінь очищення, який за допомогою виконавчого механізму змінює подачу сорбенту на першу ступінь очищення. Задану ступінь очищення забезпечує регулятор витрати сорбенту, який від вимірювача концентрації отримує сигнал, пропорційний концентрації речовини, яку адсорбують (сорбата), на виході установки C_0 , і в залежності від його величини за допомогою виконавчого механізму змінює подачу активованого вугілля на другу ступінь очищення.



1 – обчислювальний блок; 2 – витратомір оброблюваної води; 3 – вимірювач концентрації сорбата на вході установки; 4 – вимірювач концентрації сорбата після першої ступені; 5 – витратомір сорбенту на першу ступінь очищення; 6 – витратомір сорбенту на другу ступінь очищення; 7 – екстремальний регулятор; 8 – регулятор витрати сорбенту на першу ступінь очищення 9 – виконавчий механізм на першій ступені; 10 – регулятор витрати сорбенту на другій ступені; 11 – вимірювач концентрації сорбата після другої ступені; 12 – виконавчий механізм на другій ступені

Рисунок 1.13 – Блок-схема пристрою, який реалізує спосіб автоматичного керування процесами очищення [24]

У [25] запропоновано спосіб автоматичного керування процесами рекуперації органічних розчинників. Спосіб керування, схему реалізації якого зображено на рисунку 1.14, здійснюють таким чином.



1 – адсорбер; 2 – калорифер; 3 – обчислювальний блок; 4 – вимірювач концентрації розчинника, який рекуперують у ППС; 5 – вимірювач витрати ППС; 6 – вимірювач вологості ППС; 7-9 – вимірювачі температур ППС, повітря до калорифера 2 і температури повітря, яке висушують перед адсорбером 1 відповідно; 10 – клапан

Рисунок 1.14 – Блок-схема пристрою, який реалізує спосіб автоматичного керування циклічним адсорбційним процесом [25]

Поточні значення параметрів з вимірювачів 4-9 надходять в обчислювальний блок 3, в якому за заданим алгоритмом розраховують час для процесів адсорбції та десорбції, які є функціями від концентрації розчинника, вологості, температури і витрати пароповітряної суміші (ППС). Через різницю між часом адсорбції та десорбції визначають час, необхідний для процесу висушування адсорбенту й за відомими геометричними параметрами адсорбера 1 – середню швидкість потоку повітря, необхідну для висушування

всього адсорбційного шару за час перебігу процесу. За швидкістю руху повітря и сигналами від вимірювачів, визначають мінімальну температуру повітря на висушування в блоці 3, сигнал з якого надходить на клапан 11 регулювання витрати пари в калорифер 2. Підтримання мінімально необхідної температури для висушування адсорбенту дозволяє знизити енерговитрати та втрати продукції при поданні ППС на гарячий адсорбер.

Недоліками відомих способів керування процесом адсорбції є недостатній ступінь очищення олив та мастил, що характеризують декількома показниками якості, а також надмірні витрати адсорбенту на одиницю продукції через відсутність вимірювання в'язкості продукції, яка є однією з основних її властивостей, і корекції за її значенням температури в адсорбері. Важливість системи керування температурою в адсорбері обґрунтовують тим, що адсорбція ароматичних вуглеводнів та сполук сірки в оливах та мастилах відбувається при низькій температурі для збільшення кількості адсорбованої речовини. Зазначені вище недоліки відомих способів викликані також тим, що в них передбачено вимірювання та регулювання лише одного з показників якості продукції впливом на витрату адсорбенту, в той час як, згідно до вимог на таку продукцію, її якість визначають за декількома показниками, які не мають функціональних залежностей між собою, наприклад, в'язкість, кислотність, вміст механічних домішок і води, корозійна агресивність, зношуваність, температури застигання, спалаху, тощо, регулювання лише одного з них не забезпечує належний ступінь очищення продукції [26]. Крім того, відпрацьовані оливи або мастила містять шкідливі речовини, які здійснюють негативний вплив на оточуюче середовище, що вимагає створення систем керування, які будуть регулювати вміст цих речовин у повітрі робочої зони. Таким чином, зазначені недоліки знижують ефективність застосування відомих способів керування адсорбером при очищенні олив та мастил та не забезпечують виконання основних положень концепції сталого розвитку.

Отже, в літературних джерелах не запропоновано системно підійти до вибору способів керування промисловим неперервним адсорбційним

очищенням ВОР та до вибору математичних методів (зокрема, для моделювання), що можуть лягти в основу керування.

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз адсорбційного очищення олив та мастил як об'єкта керування дозволив обґрунтувати і сформулювати систему задач, які повинні бути враховані при автоматизації відповідного виробництва. Запропоновано розглядати керування адсорбційним очищенням ВОР у різних режимах експлуатації – сталої сировини й зміни сировини.

Метою дисертації є підвищення ефективності виробництв по очищенню відпрацьованих олив і мастил від забруднювальних речовин шляхом створення системи керування процесом неперервного адсорбційного очищення, яка базується на дотриманні вимог до показників якості продукції та на принципах ресурсозбереження.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі дослідження:

- 1) визначити задачі керування адсорбційним очищенням олив і мастил з урахуванням особливостей процесу;
- 2) створити систему керування процесом очищення в режимі зміни сировини;
- 3) створити математичні моделі технологічного об'єкта для застосування в системі керування очищенням у режимі сталої сировини;
- 4) створити систему керування очищенням у режимі сталої сировини;
- 5) створити інтегровану систему керування адсорбером поєднанням систем керування в режимі сталої та змінної сировини.

2 КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОЧИЩЕННЯ В РЕЖИМІ ЗМІНИ СИРОВИНИ

2.1 Систематизація задач керування адсорбційним очищенням та їхніх зв'язків з методами керування та математичними моделями

Створення алгоритмів керування та відповідних моделей для автоматизації очищення відпрацьованих оливних або мастильних матеріалів сприяє активному впровадженню великих очисних виробництв. На жаль, перспективні потужні виробництва ще не набули поширення і бракує досвіду використання математичного забезпечення цих систем. У п. 1.2 виконано аналіз існуючих типів систем керування процесами адсорбції та найбільш поширених підходів до моделювання цих процесів. Однак, враховуючи особливості сировини, є потреба більш системно підійти до створення математичного забезпечення систем автоматизації.

При автоматизації складних систем виникають проблеми врахування значної кількості факторів, які пов'язані між собою або навіть протирічають один одному. Такий стан внутрішніх процесів при очищенні вимагає детального аналізу та пошуку методів поєднання і врахування всіх технологічних особливостей адсорбційного відновлення відпрацьованих олив зі структуруванням інформації у вигляді конкретних, чітко визначених задач керування.

До стратегічних (загальновиробничих) задач системи керування відносять [27]:

- 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 по відношенню до виробництва інформації: попит на продукцію, ціни на сировину та енергоносії, екологічні обмеження, заробітна плата тощо. Ця інформація формує пріоритети вказаних

задач. Для визначення пріоритетів, зазвичай, використовують методи експертного оцінювання [28]. У [29] розглянуто взаємодію економічного та екологічного аспектів керування процесами в рамках положень сталого розвитку. Існує безліч показників, які використовують для забезпечення економічних вимог до виробництва.

У [29], [30] за такий показник використано критерій прямих питомих витрат K_{ads} (2.1), які безпосередньо пов'язані з технологічним процесом адсорбційного очищення:

$$K_{ads} = (a_1 K + a_2 F_{hs} + a_3 S) / G, \quad (2.1)$$

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 у формулі (2.2) узагальнений показник прямих питомих витрат $K_{g,opt}$ з урахуванням економічної та екологічної складових при керуванні адсорбером (без соціальної складової) [29] – [32]:

$$K_{g,opt} = K_{ad} / G, \quad (2.2)$$

де K_{ad} – показник, що враховує витрати на роботу адсорбера. За формулою (2.3)

$$K_{ad} = q_1 G_m P_m + q_2 G_a P_a + q_3 G_{sol} P_{sol} + q_4 Q_e P_e + q_5 A + q_6 F_{hs}, \quad (2.3)$$

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, $\text{грн}/\text{м}^3$; Q_e – кількість витраченої енергії, $\text{кВт}\cdot\text{с}$; P_e – тариф на витрачену електроенергію, $\text{грн}/(\text{кВт}\cdot\text{с})$, 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, $q_1 \dots q_6$ – вагові коефіцієнти (залежать від поточної пріоритетності задач керування).

Сформулюємо задачу оптимального керування адсорбером у нормальному режимі експлуатації (екологічні обмеження виділені напівжирним шрифтом) [29], [30], [33], наведену в системі (2.4):

$$K_{opt2}(U) = f(C_{FC}, C_S, C_{AH}, \Theta_a, G_a) \rightarrow \min; \quad (2.4)$$

$$b_{i,\min} \leq \mathbf{X}(C_{CN}, C_{FC}, C_{Visc}, \Theta_a, C_S, C_{AH}) \leq b_{i,\max}, \mathbf{X}(C_j) \leq b_{j,\max},$$

де $\mathbf{X}(C_{CN}, C_{FC}, C_{Visc}, \Theta_a, C_S, C_{AH})$ – вектор обмежень на властивості продукції; $\mathbf{X}(C_j)$ – 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 за формулою (2.5):

$$K_a = \sum_{i=1}^n q_i K_i, \quad (2.5)$$

де n – кількість властивостей продукції, які враховують; q_i – ваговий коефіцієнт, який характеризує ступінь важливості показника ($i = 1, 2, \dots, n$) 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; корегування математичного забезпечення в умовах нестаціонарності процесу очищення.

Схема ТС (рисунок 2.1) дозволяє визначити також технологічні (обумовлені технологією) джерела впливу на стан ТОК і обґрунтувати склад підзадач для І-ІІІ.

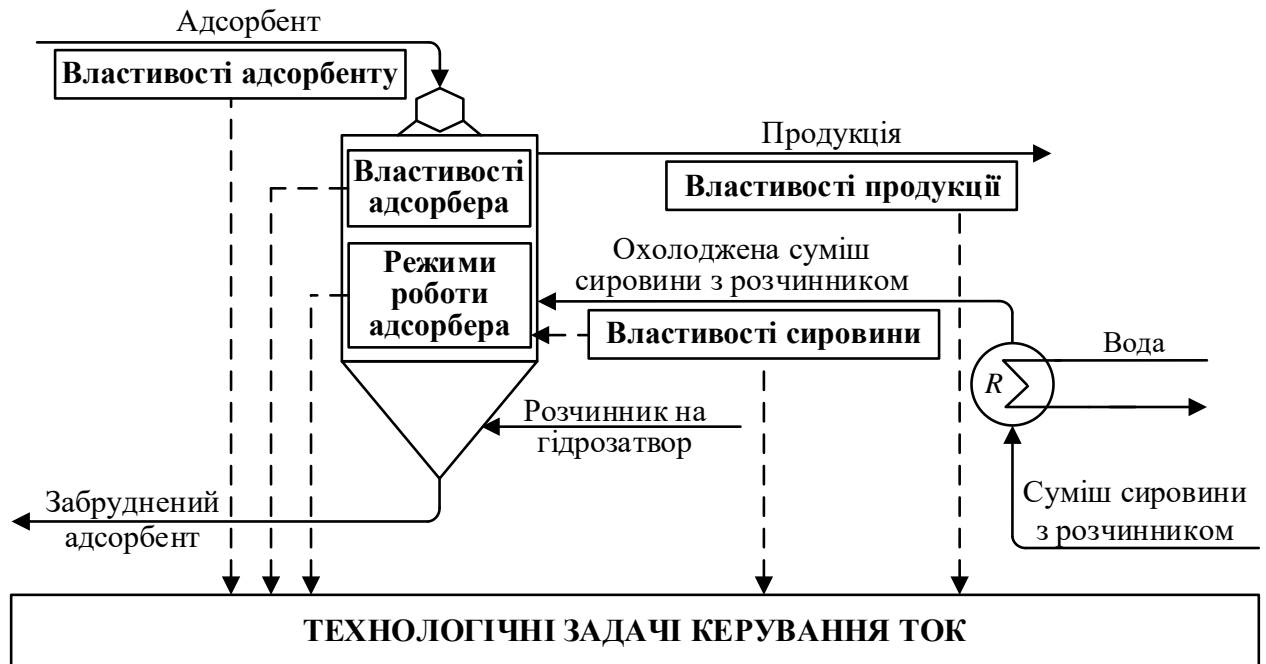


Рисунок 2.1 – Схема технологічної системи

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 2.1 подано схему прикладання технологічних джерел впливу при формуванні технологічних задач. За її допомогою дослідимо процес адсорбції як об’єкт керування.

Продукція. З п. 1.1.3 випливає, що до якості регенованої сировини висувають численні вимоги [1]. 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 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 за формулою (2.6)

$$Q_k(t) = F_1(\mathbf{X}_j(t + \Delta t)), \quad (2.6)$$

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

б) визначення залежностей між однією властивістю та іншими властивостями продукції за формулою (2.7)

$$Q_k(t) = F_2(\mathbf{Q}_j(t + \Delta t)), \quad (2.7)$$

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

Оскільки мова йде 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 вектору 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 (має місце при надходженні відпрацьованих матеріалів від одного джерела забруднення), режимні параметри системи керування забезпечують якість продукції.

Режим «**Зміна сировини**» – режим експлуатації, який починається при зміні типу сировини (наприклад, сировина від іншого постачальника). Зміна сировини може призвести, відповідно, до змін в умовах проведення адсорбції, які деякий час можуть бути невідомі. Таким чином режимні параметри в цьому випадку невідомі, керувальні впливи не відповідають властивостям матеріального потоку, якість продукції та економічна ефективність виробництва погіршуються. Цей режим певною мірою вимагає таких самих дій, що й режим «Пуск».

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

Адсорбент. Інформація про властивості адсорбенту надає 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 виді можна записати за формулою (2.8):

$$U(t + \Delta t) = \Phi[U(t), Q(t)], \quad (2.8)$$

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

Адсорбер. З п. 1.1 можна зробити висновок, що визначений нами ТОК має суттєво розподілені властивості. Є також підстави вважати його нестационарним із загалом повільною зміною властивостей, що можна подати у вигляді $\Psi(t)$ – функціонала залежностей властивостей від часу.

На рисунку 2.2 подано схему формування задач керування за кожним джерелом впливу.

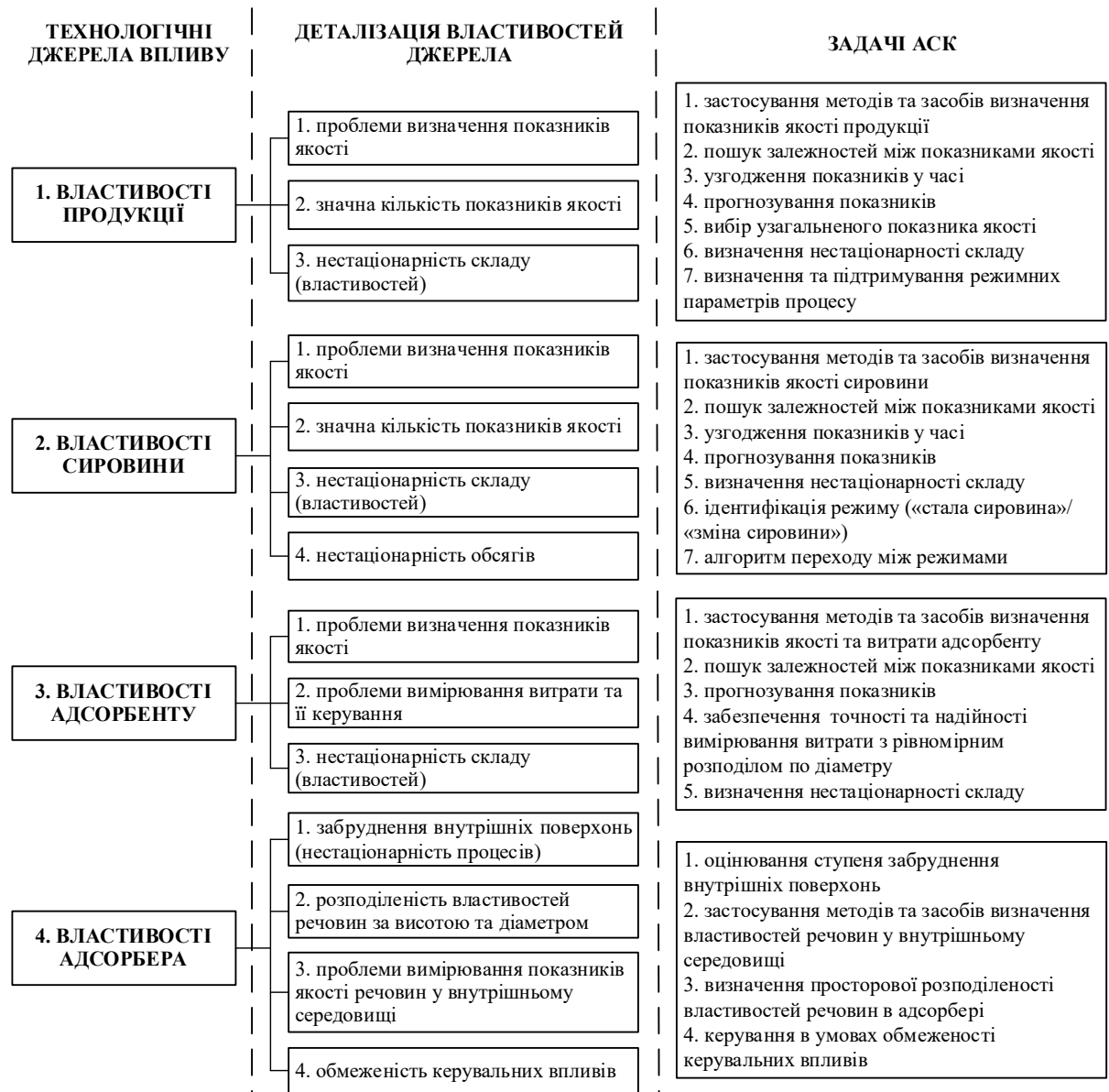


Рисунок 2.2 – Схема формування задач керування за кожним джерелом впливу

Ця схема дозволяє 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 точки зору впливу на задачі вищого рівня. На рисунку 2.3

наведено приклад схеми зв'язків між задачами керування, методами та моделями.

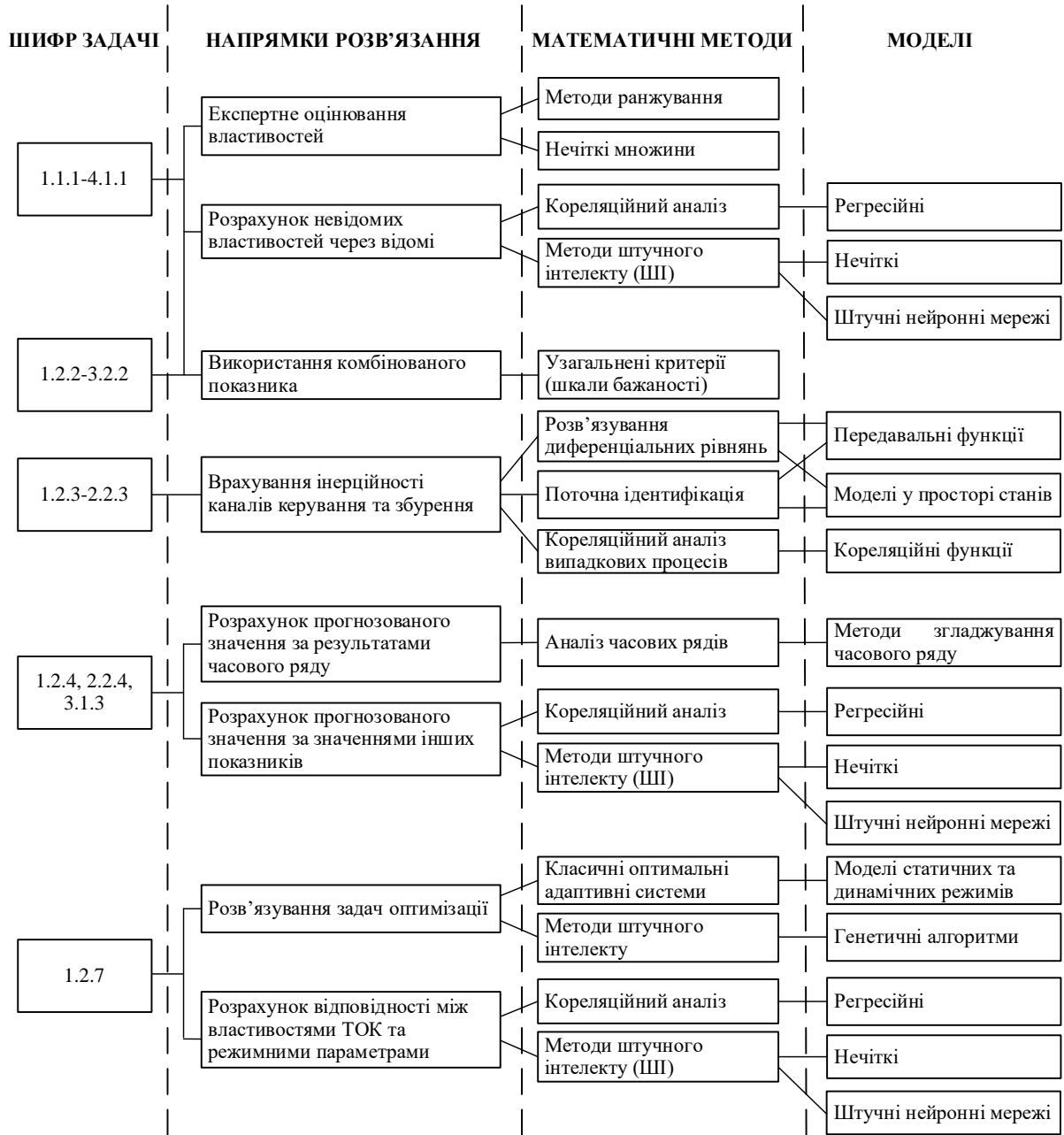


Рисунок 2.3 – Приклад схеми зв'язків між задачами керування, методами та моделями

Наведені схеми доцільно розглядати як семантичні мережі різних типів, які дозволяють формалізувати кроки проектувальника системи керування процесом адсорбції. За цими схемами можна виокремити різні підходи до

керування адсорбційним очищенням залежно від режиму роботи адсорбера, зокрема, режимів зміни сировини або сталої сировини.

2.2 Система керування адсорбційним очищенням у режимі зміни сировини

Спосіб керування стосується безпосередньо очищення оливи або мастила від ароматичних вуглеводнів, сірчистих з'єднань, смол та регенерації адсорбенту.

На рисунку 2.4 наведено фрагмент схеми автоматизації, на якій детально показані лише контури керування, необхідні для підтримки режимних параметрів адсорбційного процесу, решта – умовно. Ця схема базується на основі типових схем, показаних у п. 1.2. Автоматизація зазначеного процесу передбачає наявність систем керування тиском і температурою в адсорбері, а також контролю властивостей речовин на проміжних технологічних етапах і виході з адсорбера.

Для оцінювання якості очищених матеріалів (рафінату) використовують їх фізико-хімічні властивості, перелік яких змінюється залежно від виду і призначення (умов експлуатації) [1]. Як було відзначено у п. 1.1.3, до основних показників якості мастил залежно від призначення [34] належать: в'язкість, індекс в'язкості, температура застигання, протизносні, протіокислювальні, мийно-диспергуючі властивості, зольність, вміст механічних домішок і води, корозійна активність.

Партії сировини для очищення мають унікальні фізико-хімічні властивості, тобто вони можуть принципово відрізнятися одна від одної залежно від джерела їх отримання (фактично компонентного складу) [1], [27], [34].

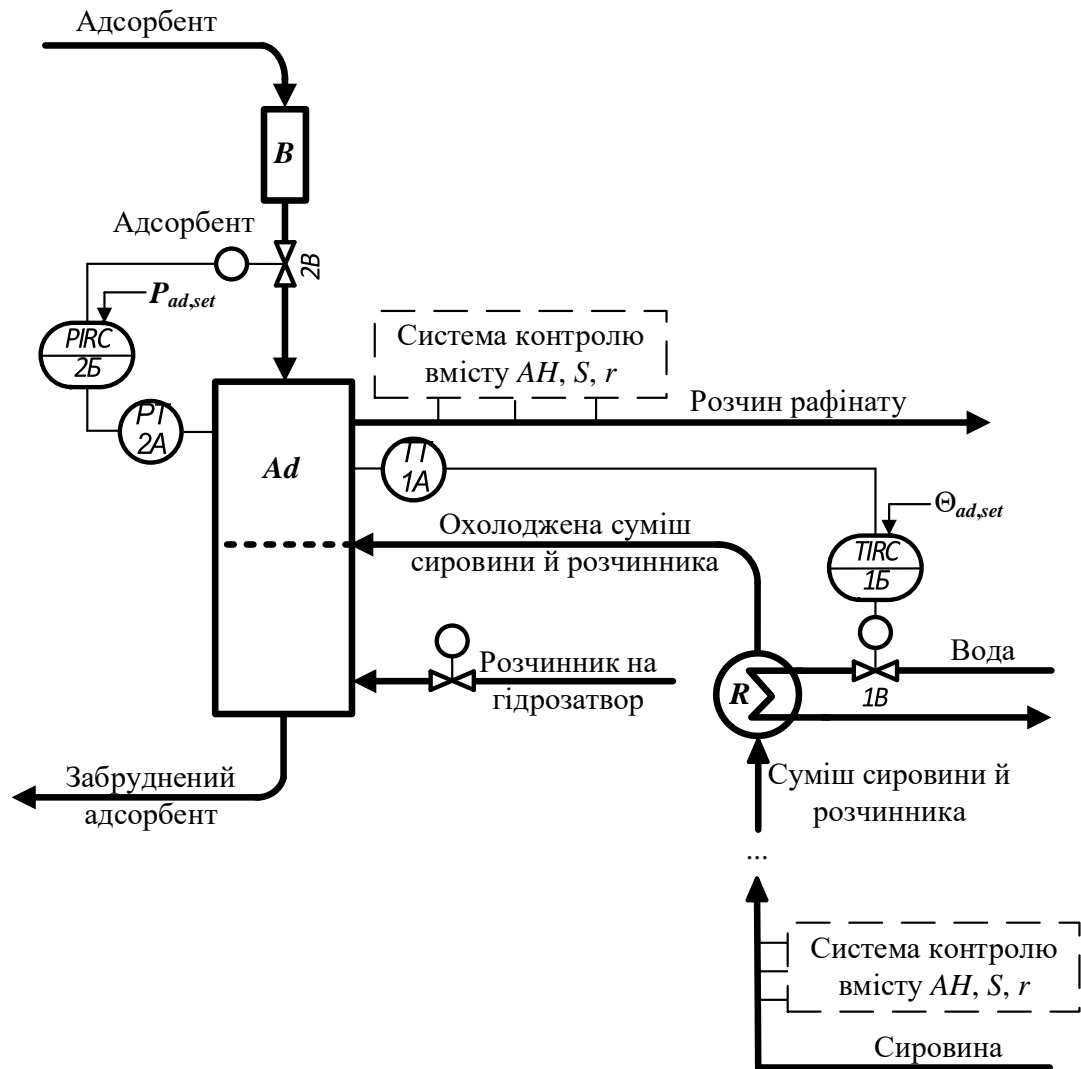


Рисунок 2.4 – Фрагмент схеми автоматизації етапу адсорбційного очищення оливи і мастил

2.2.1 Визначення початкових режимних параметрів процесу адсорбції

Однією з важливих проблем керування є суттєва кількість властивостей сировини, які необхідно враховувати в умовах обмежених керувальних впливів.

Згідно з рисунком 2.4 режимними параметрами [34] є температура та тиск в адсорбері (контури 1 і 2 відповідно). Їх значення – початкові режимні параметри – необхідно підтримувати при зміні сировини, покажемо їх як уставки регуляторам $P_{ad,set}$ і $\Theta_{ad,set}$.

Розглянемо основні задачі алгоритму визначення ПРП, на рисунку 2.5 наведемо його загальну схему.

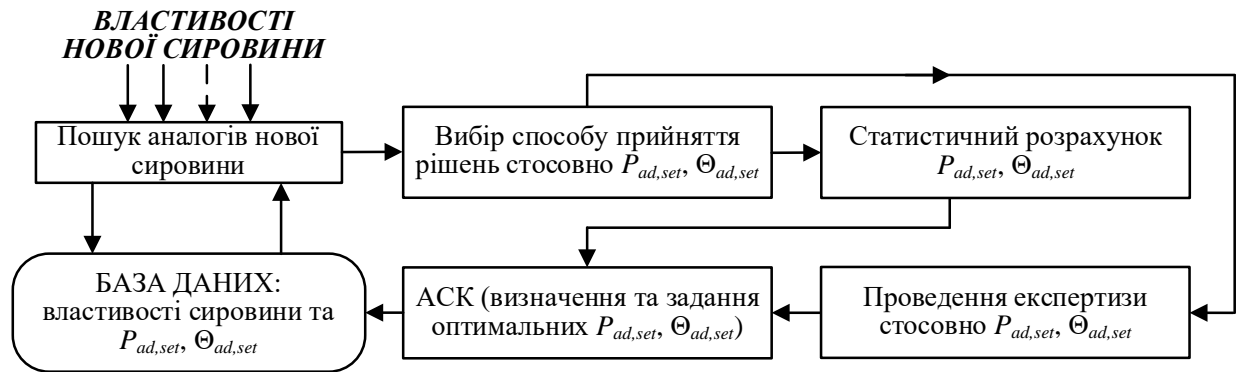


Рисунок 2.5 – Загальна схема алгоритму визначення ПРП

Системою автоматизації передбачено контроль вхідних (сировини) і вихідних (розчин рафінату І) концентрацій ароматичних вуглеводнів, сірки, смол.

В основі алгоритму керування на початку режиму «**Зміна сировини**» використано принцип «за аналогією» – пошук і застосування тих режимних параметрів, які забезпечували належне очищування попередніх партій сировини, подібних за властивостями до нової сировини.

Розглянемо детальніше складові названого вище алгоритму визначення ПРП.

Масиви властивостей сировини та режимних параметрів (база даних) – це значення властивостей ВОР і режимних параметрів, що колись очищувалась в адсорбері, та $P_{ad,set}$ і $\Theta_{ad,set}$, що були визнані доцільними для очищення. З цим блоком пов'язані питання створення, поповнення та збереження масиву(-ів) даних. Визначення структури цих (а також додаткових службових) даних не є тривіальною задачею. Її розв'язують, враховуючи особливості програмного засобу та алгоритму пошуку.

Пошук аналогів нової сировини полягає у перегляді минулих ситуацій адсорбційного очищення забруднених речовин і пошуку речовин, близьких до нової речовини за властивостями. Ця частина алгоритму, має наступні задачі:

- а) визначення переліку властивостей, за якими доцільно проводити пошук;
- б) визначення міри близькості між кожною властивістю нової та попередньої речовин;
- в) формулювання умов спрощення пошуку аналогів у разі відсутності аналога за початковими мірами близькості;
- г) формування масиву даних, який містить відібрані властивості для аналогів нової сировини та відповідні їм режимні параметри.

Пошук аналогів – поширена задача в інформаційних технологіях. Вона може бути розв’язана засобами алгоритмічних мов, керування баз даних, математичних процесорів. Схему алгоритму пошуку вибирають, виходячи з конкретної мети пошуку, властивостей даних, типу програм і технічних можливостей системи керування.

Запропонований алгоритм пошуку аналогів ґрунтується на таких положеннях:

- а) концентрації забруднювачів і режимні параметри – випадкові величини, тому поява абсолютно схожих концентрацій для трьох, двох, навіть одного забруднювача в різних партіях сировини малоімовірна;
- б) з огляду на п. а визнано доцільним пошук аналогів виконувати не по точкових значеннях параметрів, а по діапазону можливих значень кожної концентрації (далі – діапазон порівняння);
- в) у разі відсутності збігів концентрації певного забруднювача в новій сировині з його концентраціями у попередніх сировинах при одних межах діапазону порівняння, треба розширити межі діапазону;
- г) межі діапазонів порівняння концентрацій не можуть постійно збільшуватися, на них треба накласти обмеження;
- д) визначення початкових режимних параметрів при трьох забруднювачах (наш приклад) може відбуватися так:

– якщо були збіги за концентраціями всіх трьох забруднювачів, то розраховують середні значення режимних параметрів $P_{ad,set}$ і $\Theta_{ad,set}$, які вказані саме в цих записах;

– якщо були збіги за концентраціями тільки двох забруднювачів, то розширюють межі діапазону порівняння концентрації тільки третього забруднювача;

– якщо були збіги за концентраціями тільки одного забруднювача, то розширюють межі діапазонів порівняння концентрацій двох інших забруднювачів;

– якщо збіги мають місце не за всіма (трьома в нашому прикладі) забруднювачами, то роздруковують останній пошуковий запит і за його даними приймають рішення про спосіб визначення $P_{ad,set}$, $\Theta_{ad,set}$: 1) експертним висновком; 2) автоматичним пошуком з розширенням діапазонів порівняння.

Перелік ідентифікаторів алгоритму пошуку аналогів нової сировини наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Перелік ідентифікаторів алгоритму пошуку аналогів нової сировини

№	Позначення	Опис
1	AH	Ароматичні вуглеводні
2	S	Сірка
3	r	Смоли
4	C_{AH}	Концентрація ароматичних вуглеводнів у новій сировині
5	C_S	Концентрація сірки там же
6	C_r	Концентрація смол там же
7	$k_{AH,l}, k_{AH,h}$	Коефіцієнти для розрахунку початкових нижньої та верхньої меж діапазону порівняння при пошуку по AH
8	$k_{S,l}, k_{S,h}$	Те саме при пошуку по S
9	$k_{r,l}, k_{r,h}$	Те саме при пошуку по r
10	$C_{AH,min}, C_{AH,max}$	Гранично припустимі нижня та верхня межі діапазону порівняння по AH
11	$C_{S,min}, C_{S,max}$	Те саме при пошуку по S
12	$C_{r,min}, C_{r,max}$	Те саме при пошуку по r
13	$C_{AH,l}, C_{AH,h}$	Поточні нижня та верхня межі діапазону при пошуку по AH
14	$C_{S,l}, C_{S,h}$	Те саме при пошуку по S
15	$C_{r,l}, C_{r,h}$	Те саме при пошуку по r
16	$C_{AH,z}, C_{S,z}, C_{r,z}$	Значення концентрацій AH , S , r у z -ому полі запису БД
17	$k_{AH,cor}, k_{S,cor}, k_{r,cor}$	Коригувальні коефіцієнти меж діапазонів при пошуку по AH , S , r

Основним об'єктом БД, призначеним для пошуку аналогів, є таблиця *CONCORD* (від англ. – *Concordance*). Для пояснення алгоритму пошуку аналогів розглянемо спрощену її структуру (рисунок 2.6).

Властивості сировини							
	Запис	АН	S	R	Тиск	Температура	Група
+	1	21	15	7	10	100	
+	2	28	10	5	13	120	
+	3	19	17	4	7	150	
+	4	21	10	50	14	100	

Рисунок 2.6 – Спрощена структура таблиці *CONCORD*

Виконаємо формалізацію положень (пп. а, б, в).

Початкові верхні та нижні межі діапазонів порівняння ароматичних вуглеводнів, сірки, смол розраховують за формулами системи (2.9).

$$\begin{aligned}
 C_{AH,l} &= C_{AH}k_{AH,l}, \quad C_{AH,h} = C_{AH}k_{AH,h}, \\
 C_{S,l} &= C_Sk_{S,l}, \quad C_{S,h} = C_Sk_{S,h}, \\
 C_{r,l} &= C_rk_{r,l}, \quad C_{r,h} = C_rk_{r,h}.
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Порівняння нижньої та верхньої меж діапазонів порівняння концентрацій забруднювачів з гранично припустимими наведено у формулах (2.10) – (2.12) відповідно.

$$C_{AH,l} < C_{AH,min}; \quad C_{AH,h} > C_{AH,max}, \tag{2.10}$$

$$C_{S,l} < C_{S,min}; \quad C_{S,h} > C_{S,max}, \tag{2.11}$$

$$C_{r,l} < C_{r,min}; \quad C_{r,h} > C_{r,max}, \tag{2.12}$$

Перевірка, чи входять концентрації ароматичних вуглеводнів, сірки, смол таблиці БД у діапазони порівняння для j -го запису БД, має вигляд системи (2.13).

$$\begin{aligned}
 C_{AH,l} &< C_{AH,z} < C_{AH,h}, \\
 C_{S,l} &< C_{S,z} < C_{S,h}, \\
 C_{r,l} &< C_{r,z} < C_{r,h},
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

У загальному вигляді перевірка для z -го забруднювача в j -му записі БД наведена в (2.14):

$$C_{i,l} < C_{j,z} < C_{i,h}. \tag{2.14}$$

Розширення меж діапазонів порівняння ароматичних вуглеводнів, сірки, смол виконують за формулами (2.15) – (2.17) відповідно.

$$C_{AH,l} = C_{AH,l}(1 - k_{AH,cor}); C_{AH,h} = C_{AH,h}(1 + k_{AH,cor}), \quad (2.15)$$

$$C_{S,l} = C_{S,l}(1 - k_{S,cor}); C_{S,h} = C_{S,h}(1 + k_{S,cor}), \quad (2.16)$$

$$C_{r,l} = C_{r,l}(1 - k_{r,cor}); C_{r,h} = C_{r,h}(1 + k_{r,cor}), \quad (2.17)$$

Результат пошуку в записах БД концентрацій AH , S , r нової сировини, які відповідають діапазонам порівняння по AH , S , r у попередніх сировинах, подаємо у вигляді масиву **A**. Попадання концентрації певного забруднювача нової сировини в діапазон порівняння для попередніх сировин позначаємо «1», а протилежну подію позначаємо «0». У четвертому рядку наведено результат підсумовування ознак фактів попадання концентрацій усіх забруднювачів у діапазони порівняння. В таблиці 2.2 наведено приклад заповнення масиву **A**.

Таблиця 2.2 – Масив **A** – ознаки збігів C_{AH} , C_S , C_r у новій та попередніх сировинах

a_{ij} ($i = \overline{1,4}; j = \overline{1,m}$)	Номери записів БД ($j = \overline{1,m}$)						
	1	2	3	4	5	...	m
$a_{1j} = C_{AH}$	1	1	0	0	0	...	1
$a_{2j} = C_S$	1	0	1	0	0	...	1
$a_{3j} = C_r$	1	1	0	0	1	...	0
$a_{4j} = a_{1j} + a_{2j} + a_{3j}$	3	2	1	0	1	...	2

Схему алгоритму пошуку аналогів сировини та його опис наведено в додатку Б.

Статистичне визначення режимних параметрів розглянемо в окремому п. 2.2.2.

Прийняття рішення про значення режимних параметрів для нової сировини передбачає порівняння рекомендованих значень режимних параметрів, розрахованих на попередньому етапі алгоритму, з тими, що визначені іншим чином (додатково), зокрема на основі технологічного регламенту, емпіричних знань особи, що приймає рішення, рекомендацій експертної системи тощо.

Уведення цього етапу підвищить надійність системи керування.

Адаптування режимних параметрів до нової сировини виконують шляхом аналізу роботи системи керування адсорбцією при прийнятих (див. попередній етап алгоритму) режимних параметрах та їх корегуванням за допомогою показників якості продукції. Таким чином, для конкретної сировини знаходять найкращий вектор параметрів.

Деталізація цього етапу потребує таких досліджень:

- а) визначення показників якості керування для кожного контуру;
- б) визначення методу адаптування режимних параметрів.

Внесення адаптованих значень режимних параметрів у масив аналогів сировини та режимних параметрів (базу даних). У масив вносять нові дані – властивості нової сировини і відповідні їм режимні параметри.

Реалізацію останніх двох етапів розглянуто у п. 2.3.

2.2.2 Статистичне оцінювання та моделювання режимних параметрів

Статистичне визначення режимних параметрів за аналогами нової сировини передбачає відповідно визначення режимних параметрів для нової забрудненої сировини на основі параметрів, знайдених для її аналогів. Ця складова алгоритму передбачає розгляд таких питань:

- а) аналіз даних у БД як випадкових величин;
- б) вибір типів статистичних оцінок для визначення режимних параметрів очищення нової сировини;
- в) математичне моделювання зв'язків між властивостями сировини та режимними параметрами для різних потужностей БД.

Перелічені задачі можуть бути по-різному розв'язані в різні періоди функціонування виробничої системи. Оскільки ефективність системи автоматизації важлива в кожний з періодів, то запропоновано такі алгоритми статистичної обробки.

Відповідно до цієї схеми база даних буде наповнюватися фактами про сировину й режимні параметри поступово. Так, на *початку роботи виробництва* база даних порожня, потім у ній з'являються поодинокі записи, які стосуються тієї чи іншої сировини. До досягнення кількості значень N_1 вважатимемо вибірку нерепрезентативною, а надійність (інформативність) її статистичних результатів дуже низькою – довірчий інтервал оцінок буде досить широким, а гістограми складно буде інтерпретувати. Тому автори рекомендують для цього етапу зовсім просту модель зв'язків, яка складається з декількох точкових числових характеристик: наприклад, середніх арифметичних режимних параметрів (M_x) аналогів сировини (як незсунену, ефективну та обґрунтовану точкову оцінку математичного сподівання для законів розподілу ймовірностей випадкових величин) та мод (M_o). Позначимо таку систему окремих залежностей як *SysMod-1*.

З часом кількість записів БД, пов'язаних з певною сировиною від кожного постачальника, збільшуватиметься від N_1 до N_2 , формуючи хоч і *малі*, але для складних виробничих умов *умовно репрезентативні вибірки*. В таких ситуаціях автори рекомендують надавати особі, яка приймає рішення (ОПР), статистичні рекомендації у вигляді декількох характеристик положення режимних параметрів і показників якості сировини: моди (M_o), медіани, середні арифметичні (M_x), а також довірчі інтервали для математичних сподівань, виходячи з надійності таких оцінок. Враховуючи те, що стандартне відхилення параметрів невідоме, для визначення цих інтервалів використаємо критерій Стюдента за формулою (2.18):

$$P \left[\left| (M_x - \mu_x) / (S_x / \sqrt{N}) \right| < t_{tabl} \right] = P_{дов}, \quad (2.18)$$

де μ_x , M_x – математичне сподівання та його точкова оцінка відповідно; S_x – вибіркове стандартне відхилення; t_{tabl} – табличне значення критерію Стюдента; P , $P_{дов}$ – ймовірність події $\left| (M_x - \mu_x) / (S_x / \sqrt{N}) \right|$, довірча ймовірність відповідно.

Виходячи з (2.18), можна визначити довірчий інтервал для μ_x кожної властивості сировини й режимного параметра з використанням формули (2.19):

$$\left(M_x - t_{\text{tabl}} \frac{S_x}{\sqrt{N}}, M_x + t_{\text{tabl}} \frac{S_x}{\sqrt{N}} \right), \quad (2.19)$$

Враховуючи досвід залучення технологічного персоналу до керування виробничими процесами [35], [36], автори пропонують на етапі малої вибірки наводити для ОПР також гістограми для емпіричних законів розподілу ймовірностей випадкових величин. На рисунку 2.7 наведено зразки гістограм, які дають уяву про можливі їх види. Ці графічні моделі допоможуть ОПР краще зрозуміти семантичний зв'язок між властивостями сировини та умовами її очищення.

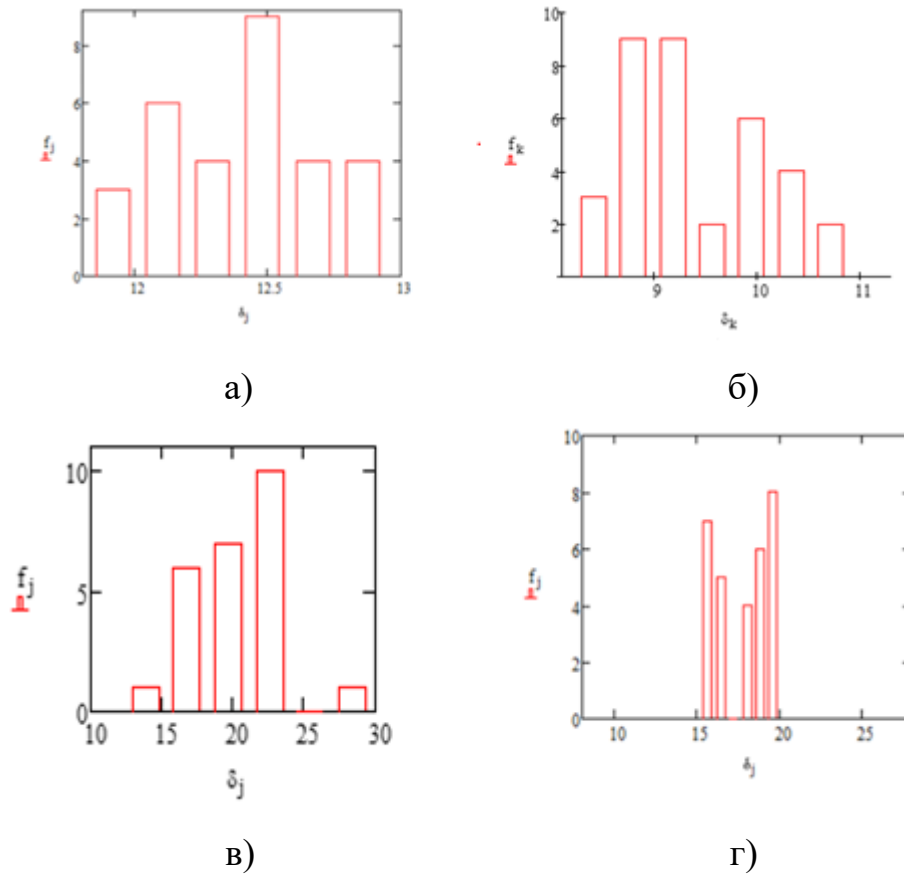
Загалом на етапі умовно репрезентативної вибірки пропонується такий спектр статистичних показників перебігу адсорбції як методів її моделювання: M_x , M_o , $M_x \pm t_{\text{tabl}} S_x / \sqrt{N}$, гістограми. Таку систему окремих залежностей позначимо як *SysMod-2*.

Велика кількість даних для кожного типу сировини, яка з'явиться при тривалій роботі виробництва, дозволяє досліджувати тісноту і форми зв'язків між параметрами та властивостями сировини.

Особливості моделювання адсорбційних процесів, пов'язаних з очищенням різного виду відходів, можна ілюструвати схемою на рисунку 2.8. Третій етап моделювання, згідно з задумом авторів, настає при суттєвому збільшенні обсягу вибірки ($N > N_2$) і дозволяє перевірити закони розподілу ймовірностей випадкових величин та застосувати кореляційний аналіз для отримання регресійних залежностей між властивостями сировини та режимними параметрами:

$$\mathbf{Y}_{rp} = F(\mathbf{X}_{mp}),$$

де \mathbf{Y}_{rp} – вектор режимних параметрів; \mathbf{X}_{mp} – матриця властивостей сировини; F – функціонал зв'язку.



а) значення вимірювань, зосереджені симетрично навколо середнього арифметичного; б) перевага значень, менших за середнє арифметичне; в) відсутність певних великих значень випадкової величини; г) відсутність певних значень, близьких до середнього арифметичного

Рисунок 2.7 – Приклади гістограм для відображення емпіричних законів розподілу випадкових величин у малих вибірках

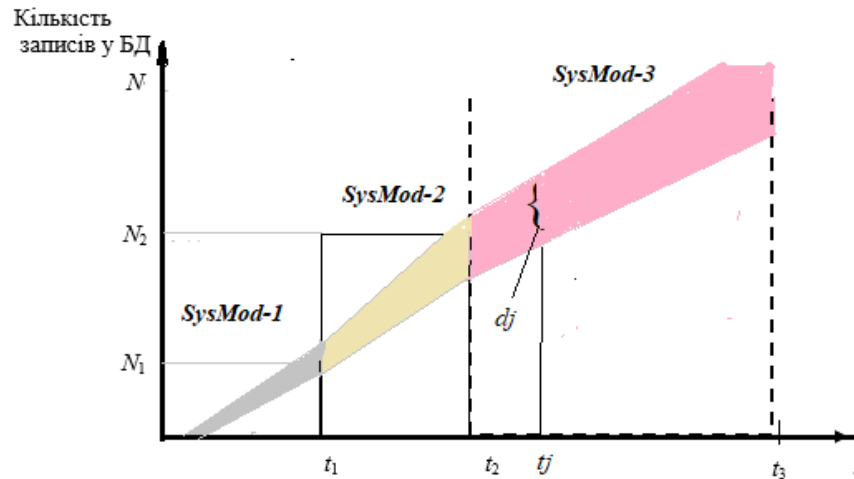
На третьому етапі моделювання спектр статистичних форм може бути наступним: M_x , $M_x \pm t_{\text{tabl}} S_x / \sqrt{N}$, гістограми, $Y_{rp} = F(X_{rmp})$ тощо. Позначимо такий перелік функцій *SysMod-3*.

Для виробництв, які будуть очищувати сировину з відносно сталими властивостями, третій етап настане за невеликий час t .

Отже, статистичне визначення режимних параметрів запропоновано виконувати комбіновано та еволюційно, тобто за такими принципами:

- опис властивостей речовин і процесу очищення виконують у декількох формах (видах моделей);
- зміну форм виконують при зростанні потужності бази даних.

У даному дослідженні мова йде про 3 періоди зміни форм статистичної інформації. Насправді, вибір числа періодів залежить від особливостей виробництва та потребує додаткових досліджень.



t – час функціонування виробництва; N_1, N_2 – граничні обсяги вибірок; d_j – інтервал кількості даних у вибірці на час t_j

Рисунок 2.8 – Схема формування моделі визначення режимних параметрів адсорбційного очищення при зміні властивостей сировини

Загальна структура алгоритму (додаток Б) дає розуміння необхідних операцій накопичення й обробки інформації та дозволяє вибрати програмні засоби для його реалізації.

Пошук аналогів можна виконати засобами алгоритмічних мов, систем керування базами даних, математичних процесорів.

На початку функціонування виробництва, коли БД невелика, ще не обґрунтований перелік необхідних розрахунків і немає складних обчислень, можна використати *MS Access* чи *MS Excel*, які містять стандартні засоби і скоротять час розробки.

На рисунку 2.9 наведені інформаційні об'єкти (рисунки 2.9.а – 2.9.в), схема даних (рисунок 2.9.г) і вікно перегляду зв'язаних таблиць БД (рисунок 2.9.д), створеної в *MS Access* (для $N < N_1$).

Властивості сировини					
Зв'язки					
ПОСТАЧАЛЬНИК					
СИРОВИНА					
Номер	Тип	Дата перед	Фірма	Опис сиров	
1	Моторне масло 1	01.08.2022	10	Опис1	
2	Олива 2	22.07.2022	10	Опис2	
3	Масило 1	21.07.2022	20	Опис3	
4	Масило 2	19.08.2022	30	Опис4	
5	Олива 3	10.08.2022	20	Опис5	
6	Масило 1	19.08.2022	20	Опис6	
7	Моторне масло 2	12.08.2022	10	Опис7	

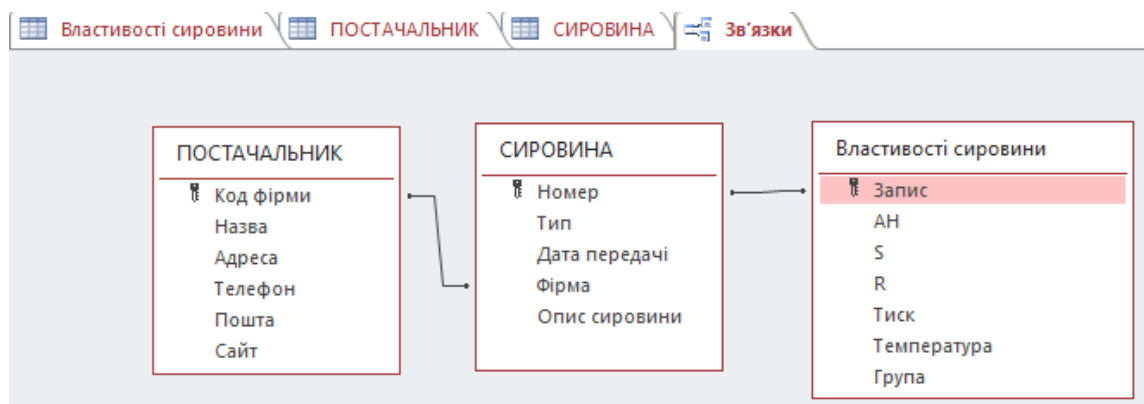
а)

Властивості сировини					
Зв'язки					
ПОСТАЧАЛЬНИК					
СИРОВИНА					
Код фірми	Назва	Адреса	Телефон	Пошта	
10	Ф1	Адреса1	Телефон1	aaa@111	
20	Ф2	Адреса2	Телефон2	bbb@111	
30	Ф3	Адреса3	Телефон3	ccc@111	

б)

Властивості сировини							
Запис	АН	S	R	Тиск	Температур	Група	
1	21	15	7	10	100		
2	28	10	5	13	120		
3	19	17	4	7	150		
4	21	10	50	14	100		

в)



г)

а) – в) – таблиці СИРОВИНА, ПОСТАЧАЛЬНИК, ВЛАСТИВОСТІ СИРОВИНИ відповідно; г) схема даних

Рисунок 2.9 – Об'єкти БД, реалізовані засобами *MS Access*

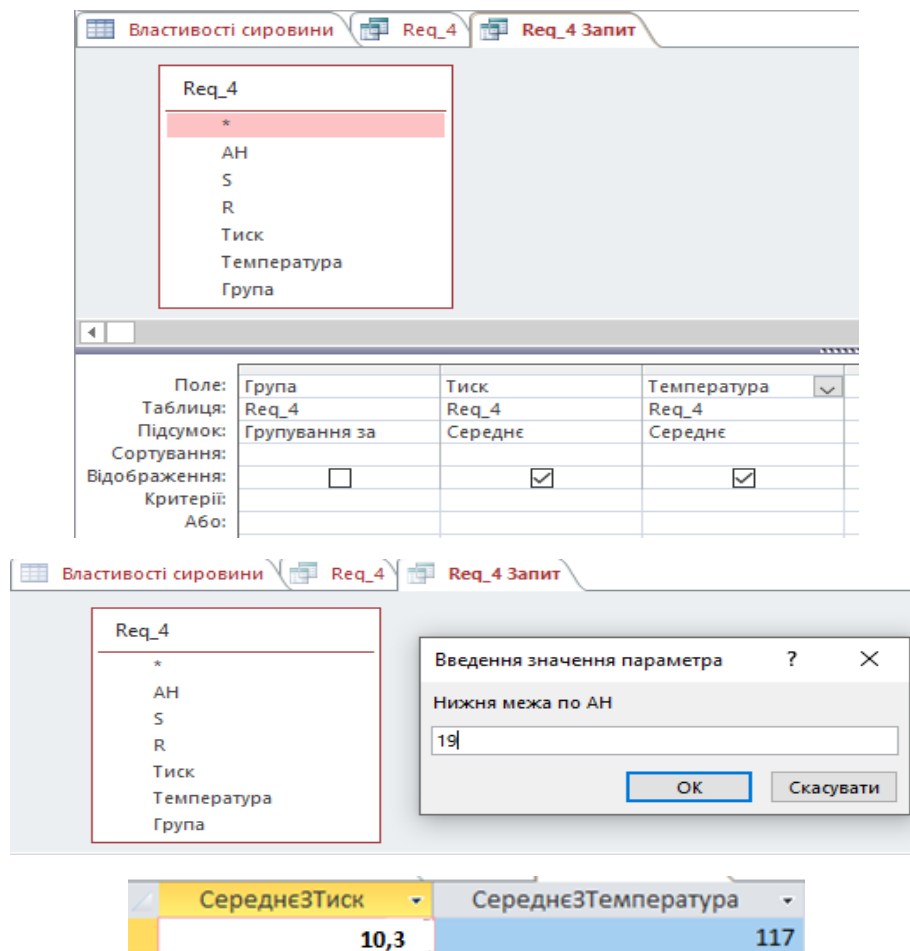


Рисунок 2.11 – Приклад реалізації запиту для виконання статистичної функції «середнє арифметичне» в *MS Access*

2.3 Система керування в режимі зміни сировини

При надходженні нової сировини треба дуже швидко з'ясувати актуальні для неї умови адсорбції, для чого застосовують описану у п. 2.2 процедуру пошуку аналогів сировини у БД. У цей же час в адсорбері знаходиться суміш старої та нової сировини у змінних пропорціях. У такій ситуації керування тиском та температурою з корекцією за властивостями рафінату недоцільне – рафінат стає сумішшю різних типів олив чи мастил. Тому на час до заповнення адсорбера виключно новою сировиною сигнали регуляторам, які корегують завдання, від'єднують.

Після заповнення адсорбера новою сировиною, корегування завдання регуляторам тиску та температури поновлюють, задовольняючи вимогам до

якості рафінату. Таким чином виконують адаптування режимних параметрів до нової сировини. Досягши такого результату, у БД, описану у п. 2.2 вносять запис із властивостями нової сировини і відповідними режимними параметрами (див. таблиці «Сировина» та «Властивості сировини» на рисунку 2.9).

На рисунку 2.12 зображено фрагмент схеми системи керування процесом очищення в режимі змінної сировини. Вона передбачає наявність автоматизованої інформаційної системи та пристроїв виконання математичних та логічних операцій, про які йшла мова у пп. 2.2 та 2.3.

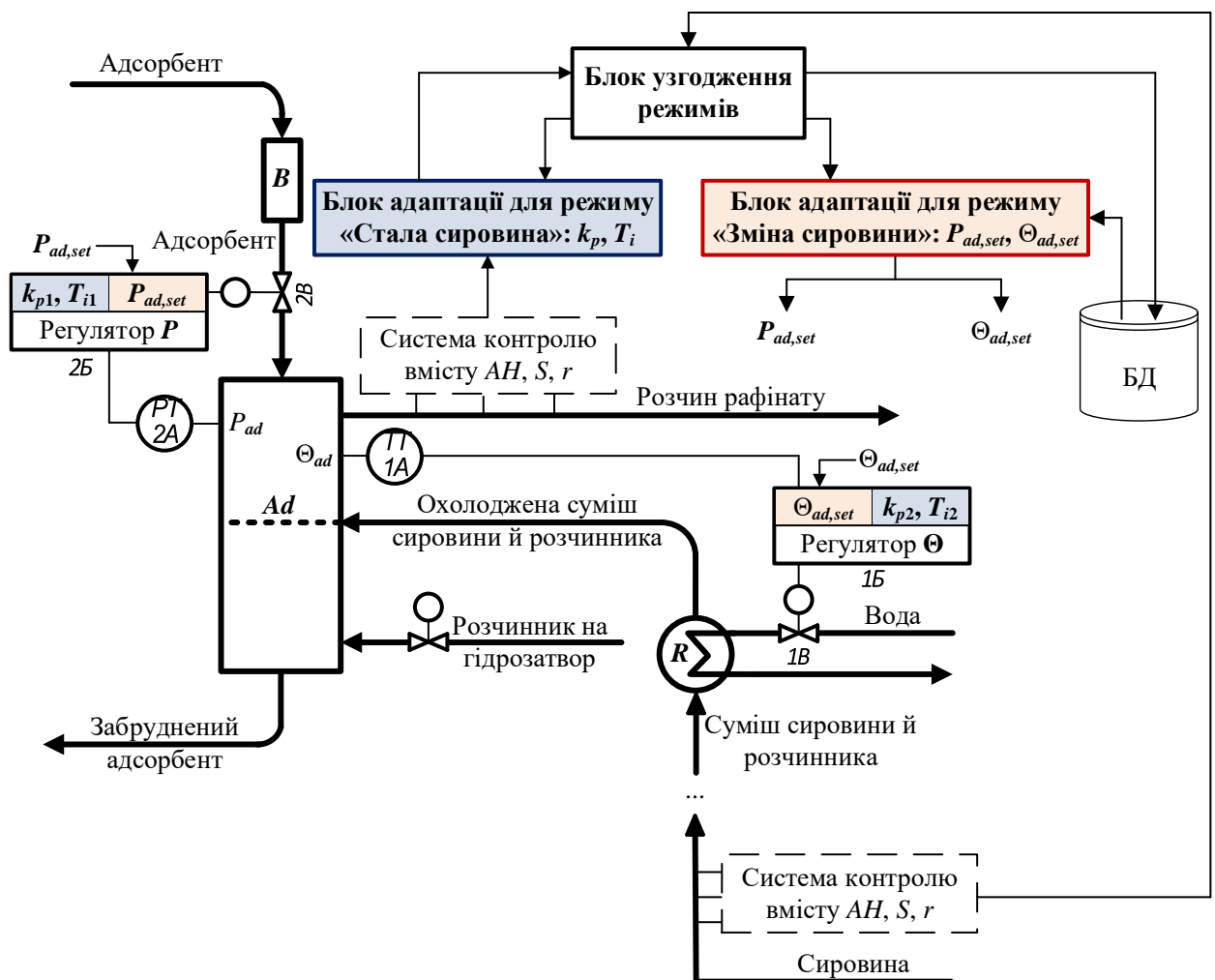


Рисунок 2.12 – Фрагмент схеми системи керування адсорбційним очищенням в режимі змінної сировини

Як впливає з процедури адаптування режимних параметрів до нової сировини, система керування в умовах змінної сировини може працювати в повному обсязі (з нарощуванням БД) тільки у взаємодії з системою в режимі сталої сировини.

За допомогою блока адаптації для режиму «Зміна сировини» виконуються усі етапи, описані у п. 2.2. Блок узгодження режимів виконує координацію виконання блоків адаптації обох режимів.

Висновки до розділу 2

У розділі 2 розглянуті питання створення системи керування процесами адсорбційного очищення відпрацьованих мастильних матеріалів в умовах надходження нової партії сировини, що суттєво відрізняється від попередньої за своїми властивостями.

У результаті дослідження отримані такі результати.

1) Обґрунтовані причини необхідності окремої системи керування для режиму «Зміна сировини» та розроблена структура БД, яка містить інформацію про властивості сировин та відповідні режимні параметри процесу адсорбції – тиск та температуру.

2) Розроблено алгоритм автоматизованого пошуку в БД сировин-аналогів нової сировини зі змінними умовами пошуку.

3) Запропоновано форми статистичної обробки записів БД для визначення ПРП.

4) Створено систему керування процесом адсорбції в режимі «Зміна сировина», в якій передбачено визначення та підтримання таких початкових значень режимних параметрів в адсорбері, які найбільш прийнятні для властивостей нової сировини.

3 МОДЕЛЮВАННЯ АДСОРБЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У РЕЖИМІ СТАЛОЇ СИРОВИНИ

3.1 Постановка задач моделювання

Масообмінні процеси, до яких належать, зокрема, адсорбційні в неперервно працюючих адсорберах, є складними технологічними об'єктами. При керуванні адсорбційним очищенням необхідно забезпечити виконання вимог до показників якості відновлених олив або мастил. Складність процесу обумовлена, зокрема, наявністю нестационарності властивостей речовин та їх невизначеністю в реальному часі безпосередньо на виробництві через відсутність відповідних ТЗА.

Підтримування якості продукції за умови раціонального витрачання ресурсів виробництва вимагає відслідковування властивостей ТОК, що вимагає створення відповідного інформаційного та математичного забезпечення, у тому числі моделей процесу в статичному та динамічному режимах.

Вибір моделей для задач керування вимагає визначення та забезпечення достатнього обсягу інформації для використання моделі в реальному часі та зручність її корегування в умовах нестационарності.

З огляду на вказані особливості процесів, що відбуваються у промислових адсорберах при неперервному очищенні індустриальних олив, а також суттєві складнощі при організації та проведенні експериментів у виробничих умовах, треба відзначити важливість і актуальність вибору типу математичних моделей для системи керування, зокрема в режимі сталої сировини. На основі цих моделей передбачено виконувати корегування параметрів регуляторів, а також дослідження алгоритмів керування.

3.2 Моделювання адсорбційного очищення як системи нано- і мікропроцесів

Розглянемо процес адсорбційного очищення ВОМ як об'єкт, в якому компоненти взаємодіють на рівнях нано- і мікросистем. Механізм цих процесів було розглянуто у п. 1.1.2. Наведемо на рисунку 3.1 схему відображення сил взаємодії між молекулами речовин у наносистемі мастил, яка демонструє взаємодії в адсорбері між адсорбентом і ВОМ при очищенні.



Рисунок 3.1 – Схема сил взаємодії між молекулами речовин у наносистемі оливи та мастил

Як видно з рисунку 3.1, у процесі діють сили Ван-дер-Ваальса та відштовхування. Оскільки очищення виконують на полярному адсорбенті, то в зазначеному процесі найбільш впливовими є електростатичні сили тяжіння – орієнтаційні та індукційні.

Під час перебігу адсорбційних процесів відбувається спад ентальпії системи (тобто виділення тепла), що призводить до зменшення ступеня адсорбції. Також за цим показником можна опосередковано визначити сили тяжіння: найбільша кількість тепла виділяється при адсорбуванні речовин, молекули яких містять подвійні зв'язки, а також атоми сірки, кисню й азоту,

найменша – при вилученні насичених з'єднань, до яких належать парафінові та нафтені вуглеводні [8], [9].

Розглянуті вище основи процесу адсорбції на нано- та мікрорівнях дозволяють створити уяву про нього, як про взаємодію двох потоків речовин: частинок адсорбенту та частинок сировини, причому кожний з цих потоків треба, у свою чергу, розглядати як сукупності декількох потоків речовин, елементи яких відрізняються за конфігураціями, розмірами та властивостями. Особливо це стосується сировини, яка складається як з речовин, притаманних олівам та мастилам, так і речовин-забруднювачів. Властивості сировини нестабільні за визначенням – сировина забруднена. Властивості адсорбенту також нестабільні, оскільки, з одного боку, порожнини насичуються забруднювачем по-різному, а з іншого – після кожного циклу регенерації ступінь відновлення властивостей частинок різний.

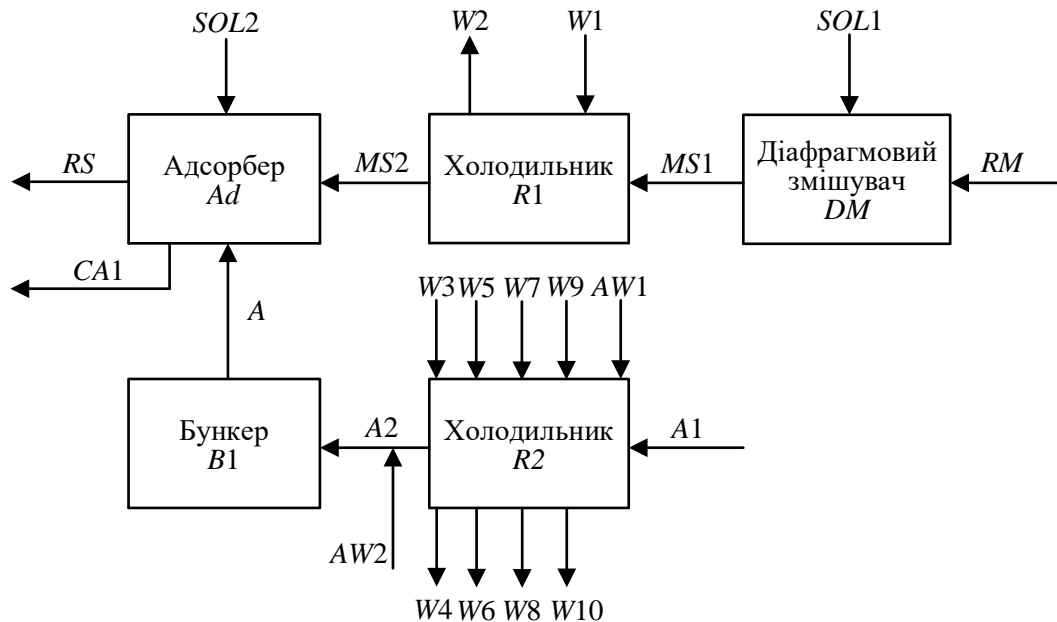
Елементи усіх речовин в адсорбері розташовані нерівномірно, що створює систему, розподілену за властивостями та рушійними силами процесів як за висотою, так і за діаметром апарату.

Наведений у цьому пункті та у п. 1.1.2 матеріал дозволяє отримати уяву про причинно-наслідкові основи процесів, які відбуваються в системі «адсорбент – забруднені ВОМ».

3.3 Математичне моделювання процесу адсорбції для задач керування

3.3.1 Опис процесів адсорбції ВОМ як об'єктів моделювання і керування

Зазначений технологічний процес відбувається в апаратах колонного типу. На рисунку 3.2 наведено схему зв'язків між апаратами та місця введення/виведення матеріальних потоків тієї частини ТС, яка містить адсорбер та інші найближчі до нього апарати.



RM – забруднена сировина; *SOL1* – розчинник на вході в діафрагмовий змішувач; *MS1* – суміш сировини й розчинника; *W1*, *W2* – вода на вході та виході з холодильника *R1* відповідно; *SOL2* – розчинник на гідрозатор; *MS2* – охолоджена суміш сировини й розчинника; *A1*, *A2* – регенований адсорбент гарячий та охолоджений відповідно; *W3*, *W5*, *W7*, *W9* – вода на вході у змішувачи холодильника *R2*; *W4*, *W6*, *W8*, *W10* – вода на виході зі змішувачів холодильника *R2*; *AW1* – повітря на створення киплячого шару у холодильнику *R2*; *AW2* – повітря для системи пневмотранспорту; *A* – адсорбент на вході в адсорбер (далі – адсорбент); *RS* – очищений продукт; *CA1* – забруднений адсорбент

Рисунок 3.2 – Схема ТС підготовки сировини, адсорбції та охолодження адсорбенту

Технологією передбачена стабілізація температур суміші сировини з розчинником та адсорбенту (два потоки) за допомогою води.

Кожний з наведених на рисунку 3.2 матеріальних потоків володіє декількома властивостями, які формують властивості очищеного продукту *RS1* на виході адсорбера. Для визначення типу моделі потрібен аналіз цих

властивостей, як інформаційних потоків. На рисунку 3.3 наведено технологічно-параметричну схему відновлення забруднених олив та мастил.

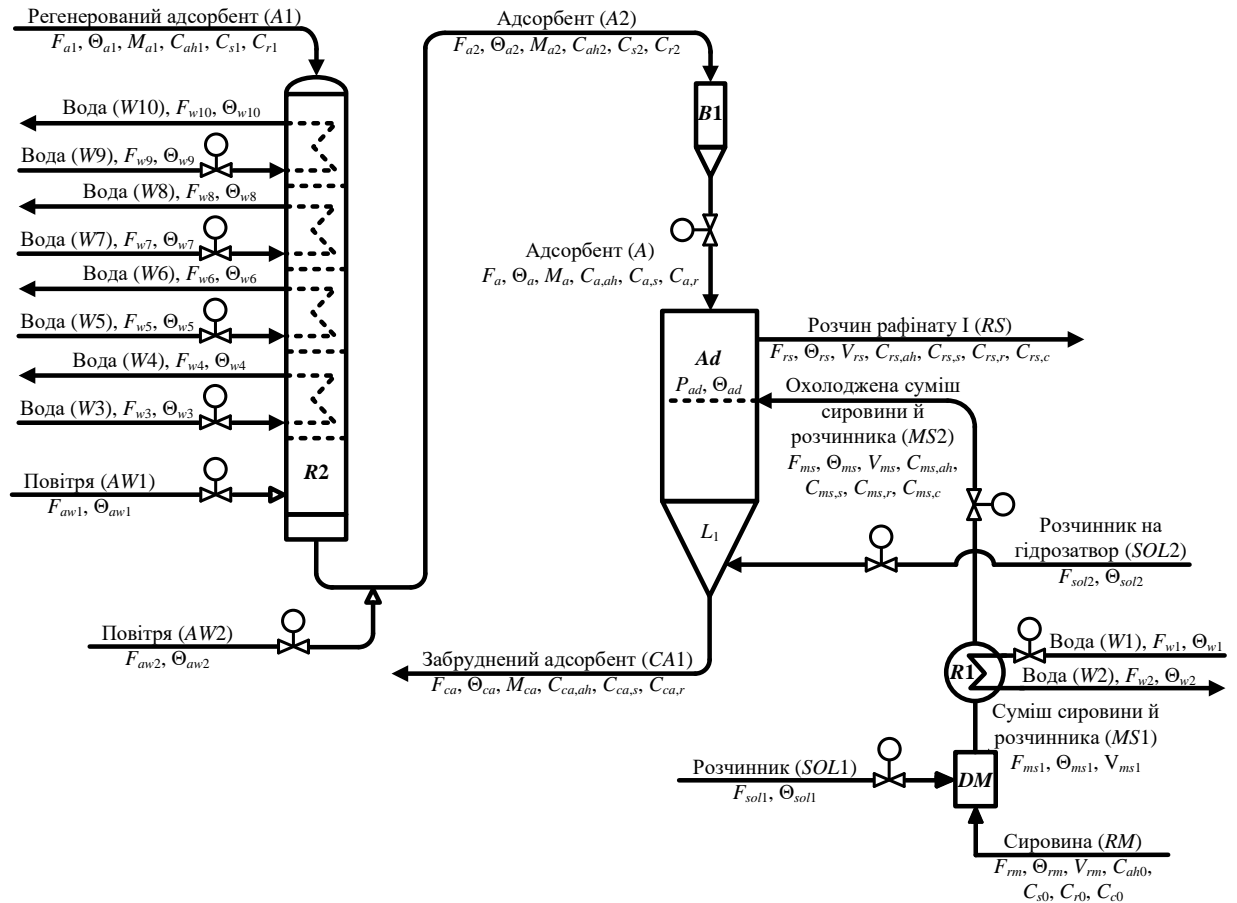


Рисунок 3.3 – Технологічно-параметрична схема процесів підготовки сировини, адсорбції та відновлення адсорбенту з позначенням інформаційних потоків

Розкриємо позначення властивостей матеріальних потоків, наведених на рисунку 3.3.

Сировина (RM): F_{rm} – витрата; Θ_{rm} – температура; V_{rm} – в'язкість, C_{ah0} – вміст ароматичних вуглеводнів; C_{s0} – вміст сірки; C_{r0} – вміст смол; C_{c0} – вміст інших домішок.

Розчинник (SOL1): F_{sol1} – витрата; Θ_{sol1} – температура.

Суміш сировини й розчинника (MS1): F_{ms1} – витрата; Θ_{ms1} – температура; V_{ms1} – в'язкість.

Вода (W1) на вході в холодильник R1: F_{w1} – витрата; Θ_{w1} – температура.

Вода (**W2**) на виході з холодильника **R1**: F_{w2} – витрата; Θ_{w2} – температура.

Розчинник на гідрозатвор (**SOL2**): F_{sol2} – витрата; Θ_{sol2} – температура.

Регенований адсорбент охолоджений (**A2**): F_{a2} – витрата; Θ_{a2} – температура; M_{a2} – вологовміст, C_{ah2} – вміст ароматичних вуглеводнів; C_{s2} – вміст сірки; C_{r2} – вміст смол.

Адсорбент (**A**): F_a – витрата; Θ_a – температура; M_a – вологовміст, $C_{a,ah}$ – вміст ароматичних вуглеводнів; $C_{a,s}$ – вміст сірки; $C_{a,r}$ – вміст смол.

Середовище адсорбера: P_{ad} – тиск в апараті (або перепад тиску між верхньою та нижньою частинами адсорбційної колони); Θ_{ad} – температура адсорбції; L_1 – рівень розчинника (**SOL2**) в гідрозатворі.

Розчин рафінату I (**RS**): F_{rs} – витрата; Θ_{rs} – температура; V_{rs} – в'язкість. $C_{rs,ah}$ – вміст ароматичних вуглеводнів; $C_{rs,s}$ – вміст сірки; $C_{rs,r}$ – вміст смол; $C_{rs,c}$ – вміст інших домішок.

Забруднений адсорбент (**CA1**): F_{ca} – витрата; Θ_{ca} – температура; M_{ca} – вологовміст, $C_{ca,ah}$ – вміст ароматичних вуглеводнів; $C_{ca,s}$ – вміст сірки; $C_{ca,r}$ – вміст смол.

Керувальними впливами [2], [37] АСК адсорбером є витрати адсорбенту (F_a), суміші сировини й розчинника (F_{ms2}), води (F_{w1} , F_{w3}) на етапах охолодження вхідних потоків та розчинника (F_{sol1}). Найбільш важливі *регульовані величини* – концентрації забруднювачів у продукції ($C_{rs,ah}$, $C_{rs,s}$, $C_{rs,r}$), тиск (P_{ad}) і температура адсорбції (Θ_{ad}), рівень (L_1); *контрольовані величини* – концентрації ароматичних вуглеводнів, сірки, смол у забрудненому адсорбенті ($C_{ca,ah}$, $C_{ca,s}$, $C_{ca,r}$). *Збурення*: концентрації забруднювачів – АН, сірки, смол – у сировині ($C_{ms,ah}$, $C_{ms,s}$, $C_{ms,r}$) та адсорбенті ($C_{a,ah}$, $C_{a,s}$, $C_{a,r}$), температури сировини (Θ_{ms}) й адсорбенту (Θ_a). Остаточна структура системи автоматизації залежить від багатьох чинників.

Рисунок 3.3 відображає той факт, що процеси підготовки і сама адсорбція є складними багатопараметричними об'єктами керування з дуже малою кількістю керувальних впливів.

Передбачено подати моделі основних каналів керування у виді передавальних функцій $W_1(s)$, $W_2(s)$, $W_3(s)$ для використання їх у системах керування для налаштування параметрів регуляторів (приклади – на рисунку 3.4).

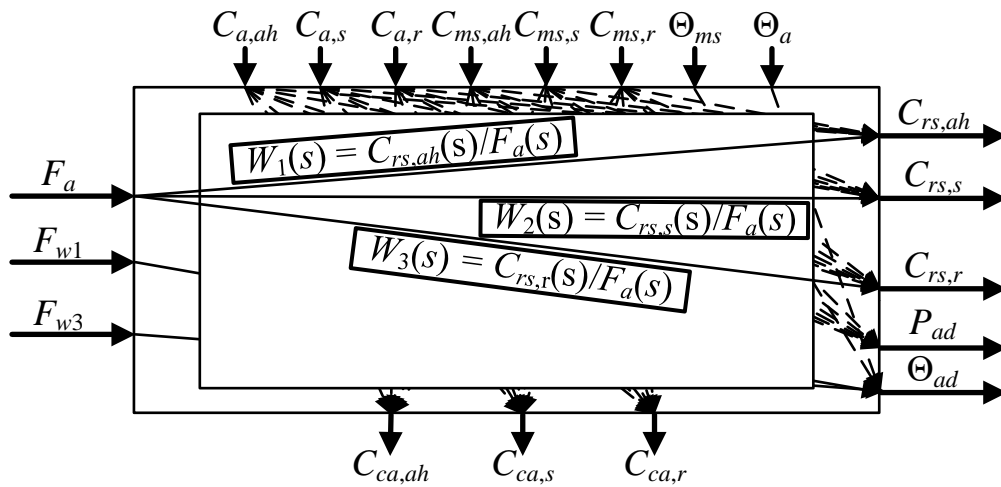


Рисунок 3.4 – Структурно-параметрична схема адсорбції

Суттєвий перелік факторів і збурень ускладнює моделювання і дає підґрунтя для рішення про створення спрощених моделей каналів керування, зручних для поточної ідентифікації. Для структурної ідентифікації запропоновано використати підтверджені експериментами математичні вирази.

Після наведеного аналізу ТОК концепція моделі така: при нанесенні однакових керувальних впливів і основних збурень на модель і на адсорбер, модель повинна бути адекватна об'єкту та задовольняти заданому показнику точності. Вимог до застосування конкретних математичних формалізмів до частин моделі чи до моделі в цілому немає.

3.3.2 Аналіз моделювання адсорбційних процесів як технологічних об'єктів керування

Сучасний підхід до моделювання адсорбційних процесів, призначеного для використання у практичних застосунках, не ґрунтується на нано- та

мікропроцесах. Кількісною характеристикою адсорбції є кількість молей адсорбованої речовини, що припадає на одиницю поверхні або одиницю маси адсорбенту [13]. Позначимо її $C_{e,a}$.

При достатньому часі зіткнення фаз і постійній температурі під дією адсорбційних сил гранула адсорбенту перестає активно поглинати забруднювачі й настає адсорбційна (статична) рівновага, при якій встановлюється певне рівноважне співвідношення між кількістю молекул адсорбтиву й адсорбату [6]. У загальному виді цю залежність позначають так [1], [13]:

$$C_{e,a} = f(C_{e,p}, T), \quad (3.1)$$

де $C_{e,a}$ – рівноважна концентрація адсорбату; $C_{e,p}$ – рівноважна концентрація адсорбтиву в об'ємній фазі; T – температура адсорбції.

Часто рівноважну залежність подають у вигляді функції $C_{e,a}$ від парціального тиску P адсорбтиву в об'ємній фазі [1]:

$$C_{e,a} = f(P, T). \quad (3.2)$$

При постійній температурі рівняння (3.1) і (3.2) мають вигляд:

$$C_{e,a} = f(C_{e,p}), \quad (3.3)$$

$$C_{e,a} = f(P). \quad (3.4)$$

Крива, що описує залежність (3.3) або (3.4) при досягненні рівноваги, називають ізотермою адсорбції.

Для опису рівноваги адсорбції поширеною є теорія об'ємного заповнення шпарин, в основі якої лежить потенціальна теорія адсорбції [1], [8]. На основі цієї теорії вводять поняття адсорбційного потенціалу A_p , який описує роботу, що здійснюють адсорбційні сили при переносі 1 моля адсорбтиву з рівноважної фази з тиском p на поверхню адсорбційної плівки, тиск на якій дорівнює тиску насиченої пари адсорбтиву p_s при температурі θ . У такому випадку адсорбційний потенціал визначають за формулою (3.5):

$$A_p = R\theta \ln(p_s/p). \quad (3.5)$$

Об'єм мікрошпарин V_{mp} , заповнених адсорбатом, розраховують через рівноважну концентрацію адсорбції $C_{e,a}$ за формулою (3.6):

$$V_{mp} = (C_{e,a} / M)V_m, \quad (3.6)$$

де M – молекулярна маса адсорбенту; V_m – молярний об'єм адсорбенту.

Для деяких мікропористих адсорбентів заповнені ділянки адсорбційних об'ємів мають вид розподілення Гаусса (3.7):

$$V_{mp} = V_o \exp(-A_p / E)^2, \quad (3.7)$$

де V_o – загальний об'єм мікрошпарин; E – параметр функції розподілу.

З урахуванням формул (3.5) – (3.7) і коефіцієнта афінності β_a (довідкова величина – відношення молярних об'ємів у рідкому стані), ізотерму адсорбції для мікропористих адсорбентів з однорідною шпаристою структурою розраховують за формулою (3.8):

$$C_{e,a} = V_o/V_m \exp[-B(\theta/\beta_a)^2 (\ln p_s / p)^2], \quad (3.8)$$

де $B = (2,303R/E)^2$ – константа, яка характеризує розмір шпарин адсорбента.

Моделюванню технологічних процесів присвячено багато уваги. Моделі виконують різними способами в залежності від складності ТОК, можливостей інформаційного забезпечення системи автоматизації та призначення моделі. У [22], [38] наведено математичні вирази для моделювання процесів адсорбції як наносистем та аналіз цих виразів з точки зору практичного застосування. Методи, що базуються на теорії тепло- та масообміну процесу адсорбції, наведено у [39] – [46]. З цих праць зрозуміло, що застосування аналітичних моделей можливе тільки при припущеннях стосовно властивостей речовин та спрощеннях стосовно поведінки цих речовин в апаратах. Приклад моделювання для однокомпонентного адсорбату (вуглеводневих сполук) наведено у [22]. Автори цієї праці дослідили масообмін з використанням каталітичних мікропористих адсорбентів. У праці [40] наведено математичні залежності для опису однокомпонентної адсорбції міді на різних адсорбентах. У [41] розглянуто різні аспекти аналітичного моделювання адсорбційних процесів у пошуках такої моделі, яка адекватно описує експериментальні дані.

У дослідженнях [47], [48] значну увагу приділено моделюванню саме структури частинок, які взаємодіють між собою, з урахуванням температурних режимів. При цьому отримані моделі не враховують різноманіття показників якості продукції. У низці праць [49], [50] процес описано з позиції поведінки адсорбенту та варіанти його розподілу на поверхні масообміну при однокомпонентному очищенні.

Розгляд багатокомпонентних сумішей зустрічається у небагатьох працях, зокрема в [9], [51], [52], які для опису тепло- та масообміну у гетерогенних системах використовують складні аналітичні залежності. У праці [53] описані дворівневі моделі адсорбції декількох компонентів на основі взаємодій міжчастинкового та внутрішньочастинкового просторів. Дослідження, проведені в [54], описують у цілому багатокомпонентну адсорбцію, але з позиції суміші компонентів, які необхідно вилучити, без урахування адсорбційних властивостей кожного окремо. У [55] автори розробили математичну модель динамічного режиму адсорбції включень на поверхню розділу фаз. Така модель, хоча й враховує фізико-хімічні властивості середовищ, які контактують між собою, але містить багато припущень, які можуть вносити суттєві похибки в модель залежно від властивостей адсорбенту й сировини.

Дослідимо можливості аналітичного моделювання процесів, які відбуваються в адсорбері при неперервному принципі роботи. Для цього розглянемо загальні закономірності переносу кількості енергії, маси та кількості руху між різними частинами технологічної системи [56]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta}{\partial t} = - \left(w_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} + w_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} + w_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + k_{\Theta} \nabla^2 \Theta + \frac{q_r}{\rho c_p}; \\ \frac{\partial c_i}{\partial t} = r_{iv} - \left(w_x \frac{\partial c_i}{\partial x} + w_y \frac{\partial c_i}{\partial y} + w_z \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + D_i \nabla^2 c; \\ \frac{\partial w_x}{\partial t} = - \left(w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) + v \nabla^2 w_x + \left(X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right), \end{cases} \quad (3.9)$$

де Θ – температура; t – час; x, y, z – позначення декартових координат; w_j – швидкість рідини за j -ю координатою; $k_\Theta \nabla^2 \Theta + \frac{q_r}{\rho c_p}$ – рівняння Фур'є, що

описує закономірність поширення теплоти в системі за рахунок теплопровідності, k_Θ – коефіцієнт температуропровідності;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}; \text{ наприклад, } \nabla^2 \Theta = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2};$$

q_r, ρ, c_p – потужність джерела теплоти, віднесена до одиниці об'єму, густина; теплоємність відповідно;

i, c_i, r_{iv}, D_i – номер компонента; концентрація, швидкість утворення, віднесена до одиниці об'єму, та коефіцієнт дифузії i -го компонента; v – об'єм; p – тиск; X – проекція масової сили на координату x .

Багатокомпонентна адсорбція у випадку ВОМ (n -компонентна) вимагатиме розгляду системи з $n-1$ рівнянь системи (3.9).

Для математичної формалізації адсорбції використовують також рівняння, що стосуються понять фазової рівноваги та кінетики адсорбції. Умови рівноваги – це рівняння, факторами яких є температура Θ та концентрація c речовини, яку поглинає адсорбент в урівноваженій рухливій фазі, а вихідною змінною є поглинальна здатність a (кількість речовини, яку поглинає одиниця маси чи об'єму адсорбенту):

$$a = f(c, \Theta_i). \quad (3.10)$$

Теорія адсорбції розглядає зовнішнє (до поверхні адсорбенту) та внутрішнє (у середині частинок адсорбенту) перенесення адсорбованої речовини. Кінетику зовнішньої адсорбції характеризує швидкість цього процесу. Її подають за допомогою наступного виразу

$$\frac{da}{dt} = \beta(c - c^*), \quad (3.11)$$

де β – коефіцієнт зовнішньої масовіддачі на одиницю об'єму адсорбенту; c, c^* – вміст адсорбованої речовини в об'ємі суміші та на поверхні відповідно.

Адсорбція в середині частинок – процес, найскладніший з точки зору моделювання. Рівняння, які можна застосувати для його опису, повинні

містити показники геометрії внутрішніх камер адсорбенту та фізико-хімічні властивості адсорбенту, адсорбату й адсорбтиву як наночастинок. Для багатокомпонентних сумішей теоретичні рівняння з такими показниками мають наразі занадто загальний вид [12].

Аналіз наведених математичних виразів показує, що навіть моделі типу (3.9) – (3.11) потребують значної кількості інформації і можуть бути адекватними ТОК тільки в разі виконання всіх припущень щодо фізико-хімічних властивостей та способів взаємного переміщення тих речовин, які вступають у взаємодію. Існуючі моделі молекулярної адсорбції можна розглядати тільки як можливі способи математичного опису поведінки речовин за певних умов. Тому застосування складних аналітичних моделей теж потребуватиме адаптації до виробничих умов при зміні властивостей ВОМ. Однак через громіздкість, багатопараметричність і відсутність необхідних ТЗА процес адаптації моделі буде дуже складним.

Описані у п. 3.2 способи моделювання процесів адсорбційного розділення компонентів ВОМ дозволяють враховувати різні аспекти перебігу таких процесів, зокрема, випадковий характер їх поведінки, який залежить від численних факторів, що стосуються властивостей адсорбенту, розчинника й забруднених олив або мастил. Це означає, що створення систем керування зазначеним процесом вимагатиме такого математичного забезпечення, яке повинно використовувати методи теорії ймовірностей, адаптації та штучного інтелекту. Тобто, використання моделі процесу на рівні нано- і навіть мікросистем в системах керування є нераціональним, оскільки такі моделі складні для обчислень і містять параметри, які неможливо вимірювати через відсутність відповідних ТЗА. Але й не всі моделі, що описують адсорбцію з точки зору загальних положень тепло- та масообміну, також прийнятні в системах керування з огляду на потрібний великий обсяг інформаційного забезпечення та складність корегування.

За основу аналітичного моделювання візьмемо спрощені матеріальні баланси по декількох забруднювальних речовинах і подамо їх у виді такої системи рівнянь [8], [9], [30]:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{ms}C_{ms,ah} - F_{rs}C_{rs,ah} - SK_{m,ah} \frac{C_{ms,ah} - C_m(C_{a,ah}) + C_{rs,ah} - C_m(C_{ca,ah})}{2} = \\ = V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{ms,ah} + C_{rs,ah}}{2} \right) + V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{a,ah} + C_{ca,ah}}{2} \right); \\ F_a C_{a,ah} - F_{ca} C_{ca,ah} + SK_{a,ah} \frac{C_a(C_{rs,ah}) - C_{a,ah} + C_a(C_{ms,ah}) - C_{ca,ah}}{2} = \\ = V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{a,ah} + C_{ca,ah}}{2} \right) + V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{ms,ah} + C_{rs,ah}}{2} \right); \\ F_{ms}C_{ms,s} - F_{rs}C_{rs,s} - SK_{m,s} \frac{C_{ms,s} - C_m(C_{a,s}) + C_{rs,s} - C_m(C_{ca,s})}{2} = \\ = V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{ms,s} + C_{rs,s}}{2} \right) + V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{a,s} + C_{ca,s}}{2} \right); \\ F_a C_{a,s} - F_{ca} C_{ca,s} + SK_{a,s} \frac{C_a(C_{rs,s}) - C_{a,s} + C_a(C_{ms,s}) - C_{ca,s}}{2} = \\ = V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{a,s} + C_{ca,s}}{2} \right) + V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{ms,s} + C_{rs,s}}{2} \right); \\ F_{ms}C_{ms,r} - F_{rs}C_{rs,r} - SK_{m,r} \frac{C_{ms,r} - C_m(C_{a,r}) + C_{rs,r} - C_m(C_{ca,r})}{2} = \\ = V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{ms,r} + C_{rs,r}}{2} \right) + V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{a,r} + C_{ca,r}}{2} \right); \\ F_a C_{a,r} - F_{ca} C_{ca,r} + SK_{a,r} \frac{C_a(C_{rs,r}) - C_{a,r} + C_a(C_{ms,r}) - C_{ca,r}}{2} = \\ = V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{a,r} + C_{ca,r}}{2} \right) + V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{C_{ms,r} + C_{rs,r}}{2} \right). \end{array} \right. \quad (3.12)$$

де $C_m(C_{a,i})$, $C_m(C_{ca,i})$, $C_a(C_{ms,i})$, $C_a(C_{rs,i})$ – рівноважні концентрації ароматичних вуглеводнів, сірчистих з'єднань та смол у суміші сировини й розчинника та адсорбенті відповідно, $i = ah, s, r$: ah – ароматичні вуглеводні, s – сірчисті з'єднання, r – смоли; $K_{m,i}$, $K_{a,i}$ – коефіцієнти масообміну, подані через мольні частки компонента, в суміші сировини й розчинника та адсорбенті; V_m , V_a – об'єм колони, зайнятий сумішшю сировини й розчинника та адсорбентом відповідно; ρ_m , ρ_a – густини суміші сировини й розчинника та адсорбенту відповідно.

Спрощення цієї системи полягає, зокрема, у таких припущеннях: адсорбер – об’єкт керування з зосередженими параметрами; коефіцієнти масообміну – сталі величини; рушійна сила перенесення забруднювальних речовин з адсорбату в адсорбент прямо пропорційна середньому значенню різниць рівноважних концентрацій цих речовин в адсорбаті та адсорбенті; акумуляція маси пропорційна середнім значенням концентрацій: $(C_{a,ah} + C_{ca,ah})/2$, $(C_{ms,ah} + C_{rs,ah})/2$, $(C_{a,s} + C_{ca,s})/2$, $(C_{ms,s} + C_{rs,s})/2$, $(C_{a,r} + C_{ca,r})/2$, $(C_{ms,r} + C_{rs,r})/2$.

Ці спрощення дозволять зменшити кількість невідомих параметрів, а тим самим і тривалість адаптації моделі у виробничих умовах.

Масу кожної з забруднювальних речовин, що перейшла з адсорбату в адсорбент за одиницю часу, в (3.12) подано однаковими за структурою виразами. Наведемо для прикладу вираз для ароматичних вуглеводнів

$$SK_{m,ah} \frac{C_{ms,ah} - C_m(C_{a,ah}) + C_{rs,ah} - C_m(C_{ca,ah})}{2}. \quad (3.13)$$

У випадку такої сировини як ВОР, вхідні властивості сировини зазвичай нестабільні, тому навіть (3.12) не можна забезпечити необхідною інформацією в реальному часі з потрібною точністю. Отже отримані таким способом моделі не можуть врахувати всіх особливостей процесу. При цьому їх ускладнення не є раціональним, оскільки може призвести до неможливості обчислень моделей і, відповідно, їх використання в системі керування.

Оскільки проведення експериментальних досліджень на об’єкті та отримання його опису за допомогою аналітичного моделювання є проблемою, запропоновано використання імітаційних моделей [57]. Такі моделі дозволяють імітувати об’єкт, проводити на ньому експерименти (симуляції) й адаптувати до змін, які відбуваються в адсорбері в режимі зміни сировини.

Існують праці, присвячені комп’ютерному моделюванню адсорбційних процесів у спеціалізованих математичних пакетах. Зокрема в [58] автори використовують середовище *Simulink MATLAB* для моделювання динамічного режиму процесу каталітичного крекінгу, а в [59] описано створення моделі

десорбції води з цеоліту у процесі адсорбційного видалення води з дихлорметану у програмному продукті *Aspen Adsorption*. У праці [60] розробили математичну модель для вирішення проблеми транспортування забруднювачів у ґрунтових водах на основі стаціонарного нестисливого двовимірного рівняння Нав'є-Стокса для потоку рідини та двовимірного рівняння конвекції-дифузії для забруднювача (використовували один тип забруднювальної речовини). Цю модель реалізували із застосуванням середовищ *FreeFem* та *MATLAB*. Оскільки адсорбційний процес багатокомпонентних сумішей є складним для опису його поведінки та адекватного відтворення в моделях, які надалі будуть використовуватися в системах керування, необхідно передбачити такий математичний апарат, який матиме функціонал для реагування на зміни властивостей сировини, адсорбенту й технологічних параметрів (таких як температура, тиск безпосередньо всередині установки), процесу в цілому.

Аналіз описаних вище досліджень показує, що застосування виключно аналітичних методів обмежено для розділення багатокомпонентних сумішей з нестабільним складом. Методи передбачають знання багатьох змінних, які характеризують властивості матеріальних потоків і стану технологічного обладнання, що неможливо в умовах виробництва. Складні комп'ютерні моделі ефективні при наукових дослідженнях для визначення форми зв'язків між змінними процесу адсорбції. Оскільки для задач керування потрібні моделі, яким достатньо буде тільки можливостей інформаційної підсистеми виробничої системи автоматизації, то корисними є праці з наведеними лабораторними дослідженнями та ідеями комп'ютерного моделювання.

Суттєвий перелік факторів і збурень у спрощеній моделі (3.12) ускладнює її практичне застосування в АСК. Тому, виходячи з результатів використання системи (3.12), запропоновано подати моделі основних каналів керування у виді аперіодичних ланок другого порядку (транспортне запізнювання додамо, виходячи з конкретних точок входів інформаційних

потоків і місць вимірювання вихідних сигналів), параметри яких будуть корегуватися в реальному часі. Вид передавальної функції наведено у (3.14).

$$W_n(s, t) = \frac{k_n(t)}{T_{2n}(t)s^2 + T_{1n}(t)s + 1} e^{-\tau_n s} \quad (3.14)$$

де n – номер каналу керування, $n = 1, 2, 3$; (ah, S, r) ; T_{1n}, T_{2n} – сталі часу адсорбера; s – символ перетворення Лапласа; t – час; k_n – коефіцієнт передачі; τ_n – час транспортного запізнювання об'єкта керування.

Оскільки зазначені раніше спрощення спотворюють справжні зв'язки між змінними процесів тепло- та масообміну в адсорбері, то запропоновано кожен параметр (3.14) подавати умовною функцією $\varphi_{n,jn}$ (j – номер параметра в $W_n(s, t)$), яку корегуватимуть при співставленні значень вибраної змінної на виходах адсорбера та його моделі.

3.3.3 Визначення форм нелінійностей моделей каналів передавання сигналів

Для вибору форм нелінійностей таких функцій розглянемо підтверджені експериментами математичні вирази, що характеризують різні аспекти процесів адсорбції [9], [27], [56] зокрема формули розрахунку показника a . Оскільки для адсорбційного очищення ВОМ відсутні рекомендації по розрахунку a , то скористаємось декількома формулами, які можна взяти за основу. Серед них формули Ленгмюра, Фрейндліха, Редліха-Петерсона, БЕТ (теорія полімолекулярної (багатошарової) адсорбції Брунауера, Еммета та Теллера), Дубініна-Радущкевича, Бойда, Лагергрена [9], [39], [42], [56]. Кожна з формул базується на певній сукупності різноманітних припущень, пов'язаних як з властивостями матеріальних потоків, так і з умовами проведення процесу.

Так, у формулі Дубініна-Радущкевича [56] показник адсорбції a залежить нелінійно від властивостей матеріальних потоків і режимних параметрів таким чином:

$$a = \frac{a_m B P}{1 + B P}, \quad (3.15)$$

де a_m – ємність моношару адсорбованої речовини в адсорбенті; P – парціальний тиск; B – параметр, який пропонують розраховувати за формулою

$$B = \alpha_m \exp\left(\frac{q_m}{kT}\right) / k_0 \sqrt{(2\pi m k T)}, \quad (3.16)$$

де m – маса молекули; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура; α_m – коефіцієнт конденсації; k_0 – ентропійний коефіцієнт; q_m – теплота адсорбції однієї молекули.

Формула Фрейндліха (для енергетично неоднорідних поверхонь) має такий вид

$$\ln a = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C, \quad (3.17)$$

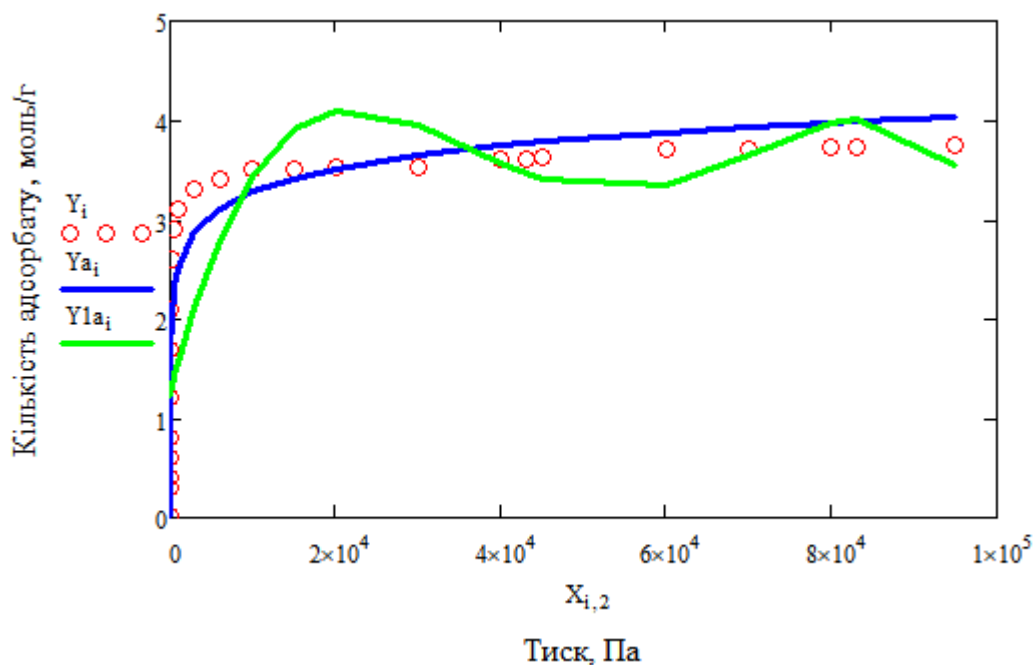
де K_F , n – адсорбційні константи Фрейндліха, що характеризують адсорбційну ємність та інтенсивність взаємодії речовин «адсорбент – адсорбат» відповідно.

Структура цих виразів має спільні риси – вони нелінійні з експоненціальними, логарифмічними та степеневими складовими від концентрації адсорбату, температури та тиску в адсорбері. Виходячи з цього, необхідно обґрунтувати, які саме структури функцій $\varphi_{n,jn}$ потрібно вводити в модель, призначену для керування та дослідження алгоритмів.

Визначення форми $\varphi_{n,jn}$ виконано за допомогою результатів досліджень, наведених у працях [41], [51], [52].

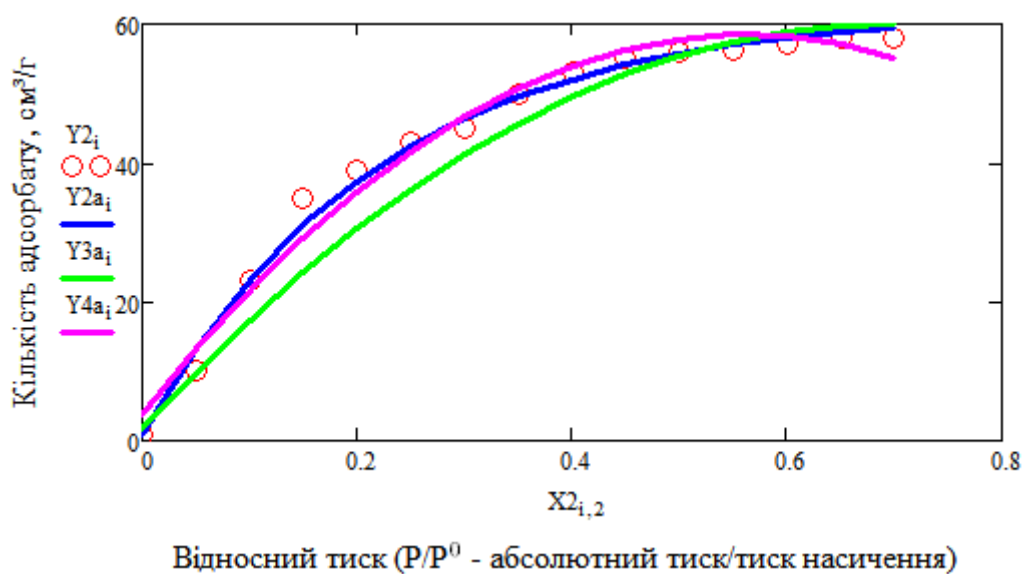
Так, у [41] досліджено адсорбцію ізомерів тетрафторетану на цеоліті NaY. На рисунку 3.5 наведено експериментальні дані, які відображають залежність кількості адсорбованої речовини від тиску, та її логарифмічну і поліноміальну апроксимації.

У праці [51] розглядають процеси відділення Krypton (Kr) від Xenon (Xe) на різних адсорбентах. На рисунку 3.6 наведено залежність кількості Kr від відносного тиску з використанням FAU LSX K – цеоліту фожазитової структури зі співвідношенням Si/Al = 1 – i , відповідно, її апроксимацію експоненціальною та квадратичною параболою.



Y_i – набір експериментальних даних; Y_{a_i} – логарифмічна апроксимація; $Y1a_i$ – апроксимація поліномом 4-го степеня

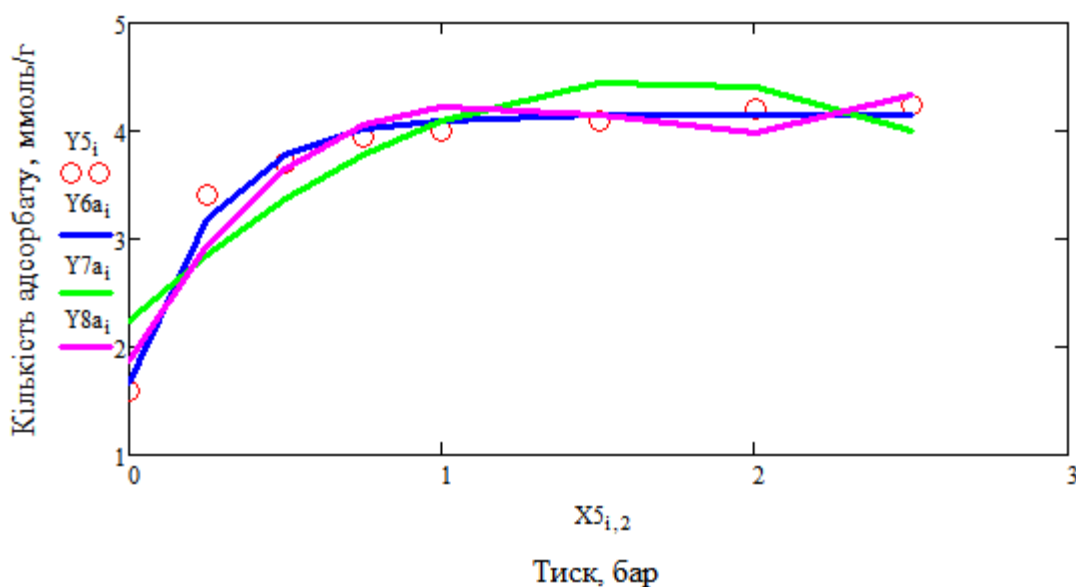
Рисунок 3.5 – Апроксимація залежності кількості адсорбованої речовини від тиску при адсорбції тетрафторетану на цеоліті NaY



$Y2_i$ – набір експериментальних даних, $Y2a_i$, $Y3a_i$, $Y4a_i$ – відповідно експоненціальна, квадратична та кубічна апроксимації

Рисунок 3.6 – Апроксимація залежності кількості Kr від відносного тиску при адсорбції на цеоліті FAU LSX K

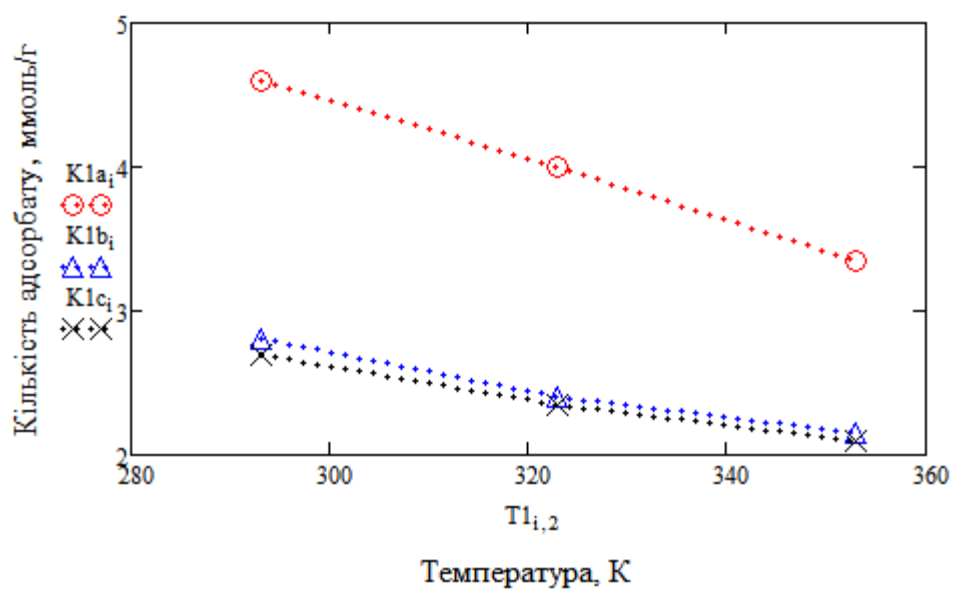
Автори в [52] розглянули проблему утилізації відпрацьованих фторвмісних сполук шляхом вилучення з них та розділення фторвуглеводнів адсорбційними методами. На рисунку 3.7 наведено залежність кількості адсорбованого дифторметану $R32$ (адсорбату) від тиску при адсорбції на цеоліті 5A з модифікованими розмірами пор та апроксимацію отриманої залежності кількості адсорбату від тиску експонентою, квадратичним та кубічним поліномами.



Y_{5i} – набір експериментальних даних, Y_{6a_i} , Y_{7a_i} , Y_{8a_i} – відповідно експоненціальна, квадратична та кубічна апроксимації

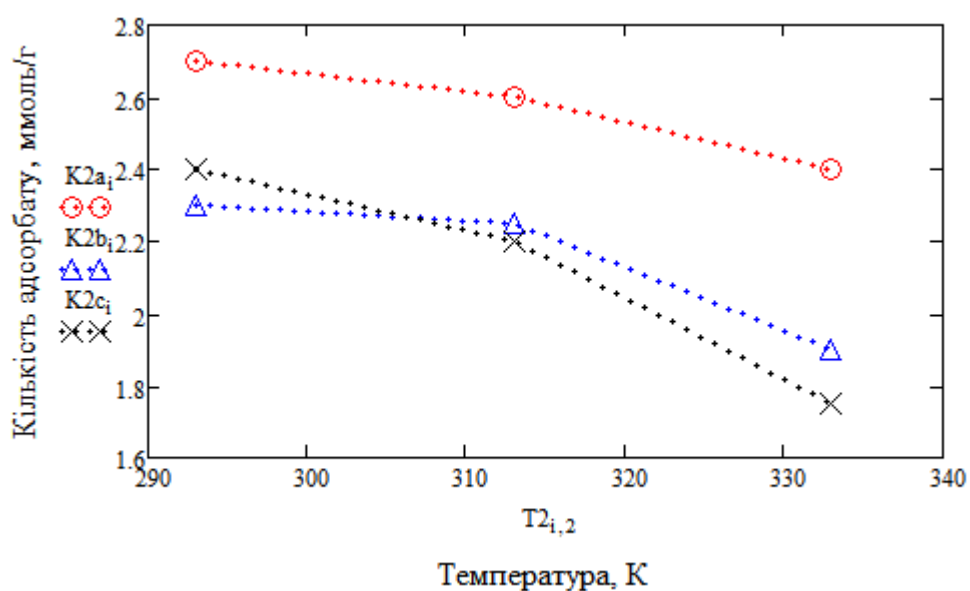
Рисунок 3.7 – Апроксимація залежності кількості дифторметану $R32$ від тиску при адсорбції на цеоліті 5A

Наведемо на рисунках 3.8 і 3.9 залежності кількості адсорбату фторвуглеводнів від температури при різних тисках [52]: залежність кількості $R32$, $R22$ (хлордифторметану) та $R125$ (пентафторетану) від температури при адсорбції на цеоліті 5A та тиску 1,5 бар (рисунок 3.8); залежність кількості $R134a$ (1,1,1,2-тетрафторетану), $R125$ та $R143a$ (1,1,1-трифторетану) від температури при адсорбції на цеоліті 13X та тиску 1 бар (рисунок 3.9).



$K1a_i$ – кількість $R32$, $K1b_i$ – кількість $R22$, $K1c_i$ – кількість $R125$

Рисунок 3.8 – Залежність кількості адсорбату від температури з використанням цеоліту 5А (тиск 1,5 бар)

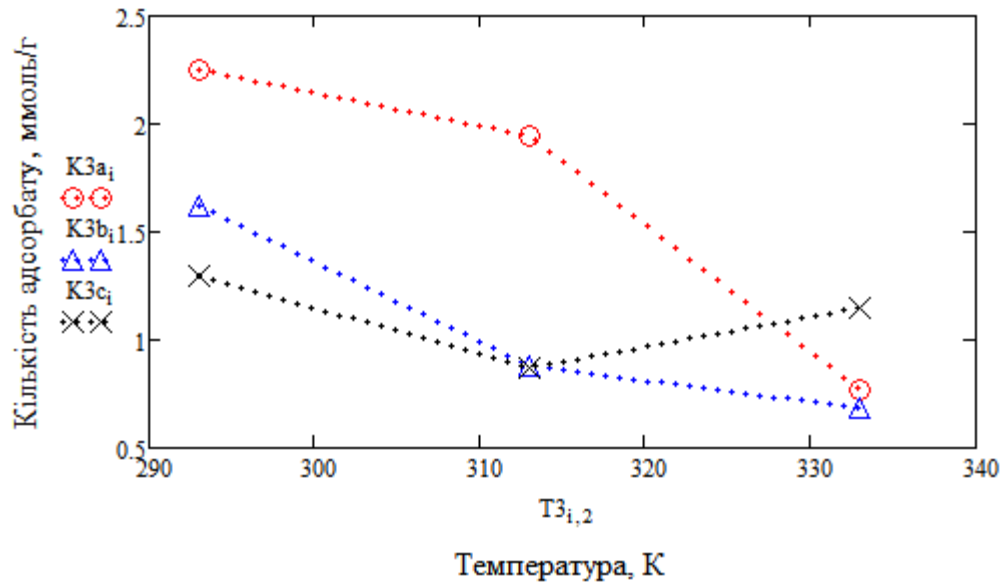


$K2a_i$ – кількість $R134a$, $K2b_i$ – кількість $R125$, $K2c_i$ – кількість $R143a$

Рисунок 3.9 – Залежність кількості адсорбату від температури з використанням цеоліту 13Х (тиск 1 бар)

Наведемо на рисунку 3.10 результати адсорбції фторвуглеводневих компонентів $R134a$, $R125$ та $R143a$ на цеоліті 13Х, отримані з використанням

дворівневого рівняння Ленгмюра-Фрейндліха при температурах 293 К, 313 К і 333 К.



$K3a_i$ – кількість $R134a$, $K3b_i$ – кількість $R125$, $K3c_i$ – кількість $R143a$

Рисунок 3.10 – Залежність кількості адсорбату від температури при адсорбції на цеоліті 13X

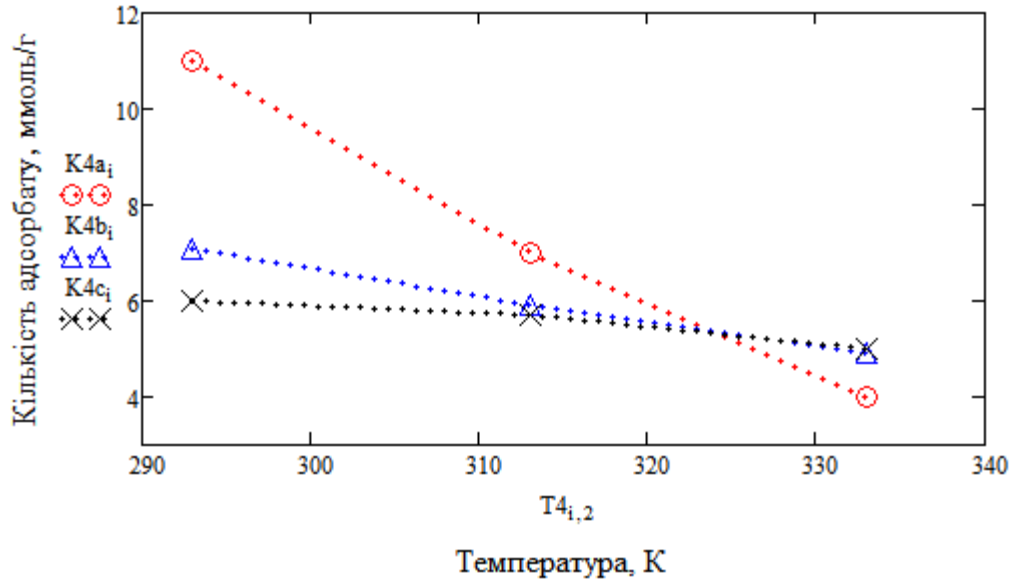
На рисунку 3.11 зображено залежності кількості адсорбату фторвуглеводнів $R32$, $R22$ та $R125$ від температури при тиску 1 бар на цеоліті $HKUST-1$, який має тривимірну пористу структуру з трьома типами клітин, утворених з'єднанням димерних кластерів міді, координованих із чотирма карбоксилатними групами тримезинової кислоти [52].

Виходячи з досліджень щодо структурної ідентифікації, які проілюстровані рисунках 3.5 – 3.11, для коефіцієнта передачі каналу керування запропоновано вибрати конкуруючі структури $\varphi_{n,jn}$ – експоненціальну, поліноміальну або будь-яку їх комбінацію

$$\varphi_{n,jn}(t) = a_0 + a_1 e^{a_2 \Theta(t)} + a_3 e^{a_4 P(t)}, \quad (3.18)$$

$$\varphi_{n,jn}(t) = \varphi_{n,jn,\Theta}(\Theta(t)) + \varphi_{n,jn,P}(P(t)) + \varphi_{n,jn,C}(C(t)), \quad (3.19)$$

де a_i – параметри експоненціальної моделі; $\varphi_{n,jn,\Theta}(\Theta(t))$, $\varphi_{n,jn,P}(P(t))$, $\varphi_{n,jn,C}(C(t))$, $\varphi_{n,jn,P}(P(t))$, $\varphi_{n,kn,c}(c(t))$ – поліноми 2-го чи 3-го ступеня для температури, тиску, концентрації.



$K4a_i$ – кількість $R32$, $K4b_i$ – кількість $R22$, $K4c_i$ – кількість $R125$

Рисунок 3.11 – Залежність кількості адсорбату від температури з використанням цеоліту *HKUST-1* при тиску 1 бар

Корегування функцій (3.18), (3.19) при адаптації моделі не викликають складностей при розрахунках.

Розглянемо основний канал керування « $F_a \rightarrow C_{rs,ah}$ ». В результаті дослідження експериментальних даних визначено, що його передавальна функція може мати такий вид:

$$W_1(t) = W_{F_a \rightarrow C_{ah}}(t) = \frac{k_{11}(t)}{T_{21}(t)s^2 + T_{11}(t)s + 1} e^{-\tau_1 s};$$

$$k_{11}(t) = a_{10} + a_{11} e^{a_{12}\Theta(t)} + a_{13} P(t)^{a_{14}};$$

$$T_{11}(t) = b_{11}; \quad T_{21}(t) = b_{21},$$
(3.20)

де τ_1 – час транспортного запізнювання, який буде визначено в умовах виробництва як часовий інтервал між зміною витрати та початком зміни концентрації.

Стартовими значеннями параметрів корегувальних функцій доцільно вибрати значення T_{11} , T_{21} та k_{11} , отримані зі спрощених матеріальних балансів (3.12) або з наявних експериментальних даних.

3.4 Схеми застосування адаптивних моделей в системі керування

На рисунку 3.12 наведена узагальнена структурна схема системи адаптації моделі адсорбції за декількома каналами керування та збурення.

Вона дозволяє створити алгоритм адаптації моделі. Згідно з алгоритмом вектори вхідних сигналів \mathbf{U} (керувальні впливи) та \mathbf{V} (режимні параметри) надходять на входи моделей кожного каналу керування. На вхід реального ТОК надходять вектори вхідних сигналів \mathbf{U} та різноманітних збурень, пов'язаних з властивостям матеріальних потоків та обладнання, \mathbf{V}_0 .

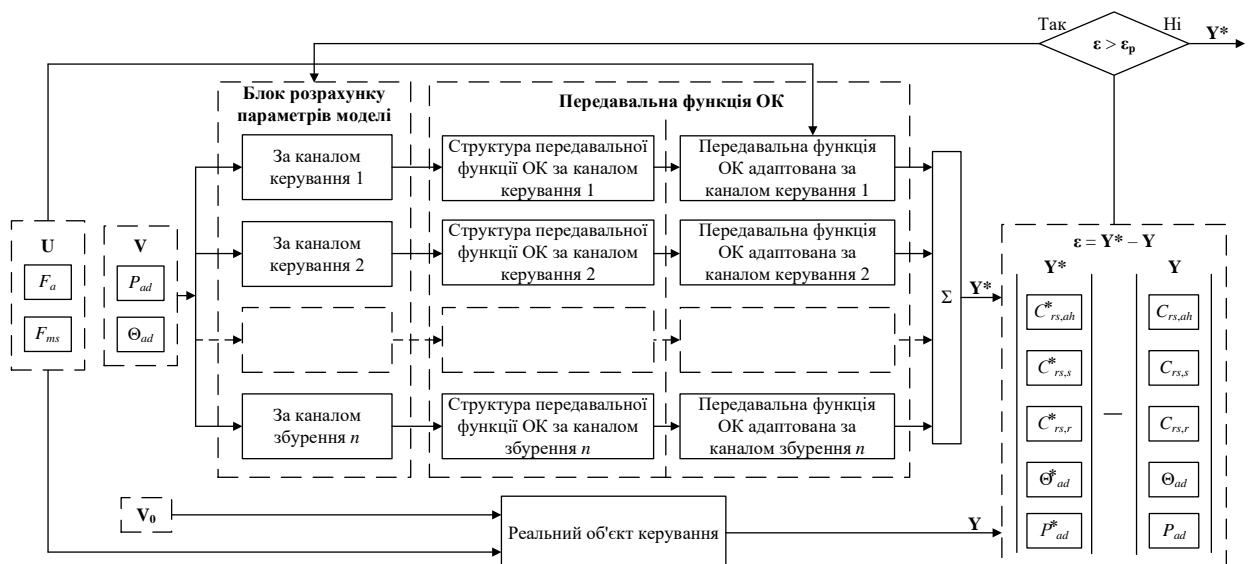


Рисунок 3.12 – Структурна схема системи адаптації моделі адсорбера

Адаптивна модель передбачає наявність блоку адаптації для визначення коефіцієнтів передавальної функції моделі, структура якої відома, (3.18), (3.19). Вектор виходів адаптивної моделі \mathbf{Y}^* порівнюють з вектором відповідних виходів адсорбера \mathbf{Y} . Якщо похибка ϵ (різниця між елементами відповідних векторів) більша припустимої, ϵ_p , то в блоці адаптації виконують

налаштування коефіцієнтів передавальної функції (3.18), (3.19) до виконання умови $\varepsilon \leq \varepsilon_p$.

На рисунку 3.13 наведемо приклад структурно-параметричної схеми моделі із запропонованими корегувальними функціями для каналу керування « $F_a \rightarrow C_{rs,ah}$ ».

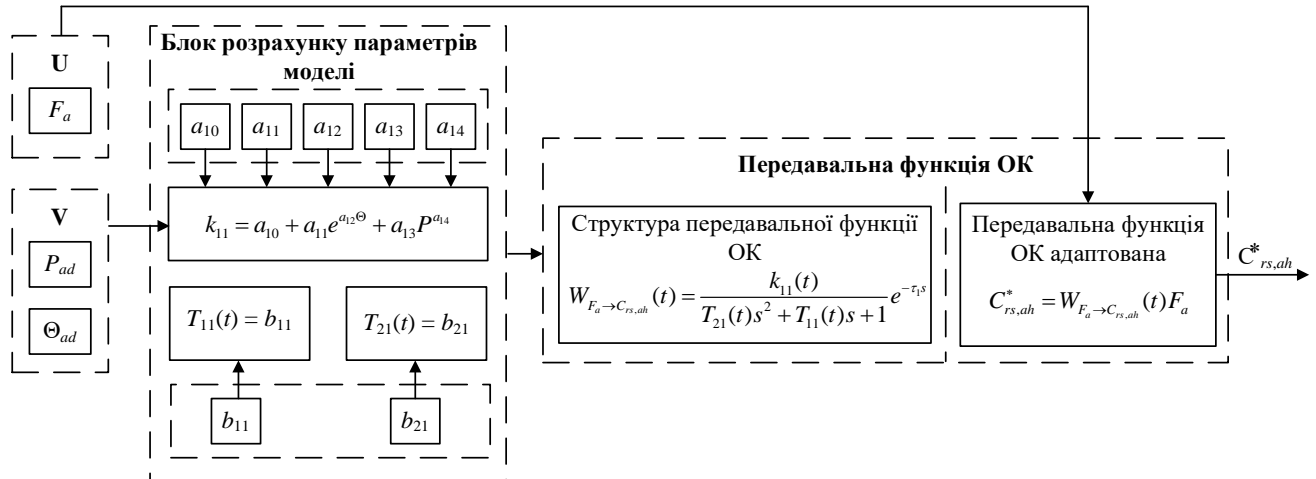


Рисунок 3.13 – Структурно-параметрична схема моделі

3.5 Імітаційне моделювання процесу адсорбції

На рисунку 3.14 зображена структурна схема моделі адсорбції за каналом керування « $F_a \rightarrow C_{rs,ah}$ », реалізовану засобами *MATLAB* + *Simulink*. Структура передавальної функції (3.20) представлена двома блоками: перший має вигляд аперіодичної частини $W_{F_a \rightarrow C_{rs,ah}}$ (на схемі $W_{F_a \rightarrow C_{rs,ah}}$), другий – транспортне запізнювання $e^{-\tau_1 s}$, де τ_1 – час транспортного запізнювання, с. На вхід цієї функції подають керувальний вплив F_a і параметри, розраховані у відповідному Блоці розрахунку параметрів моделі (БРПМ). На рисунку 3.15 наведено структуру підсистеми БРПМ, яка передбачає розрахунок параметрів моделі за рівняннями (3.20).

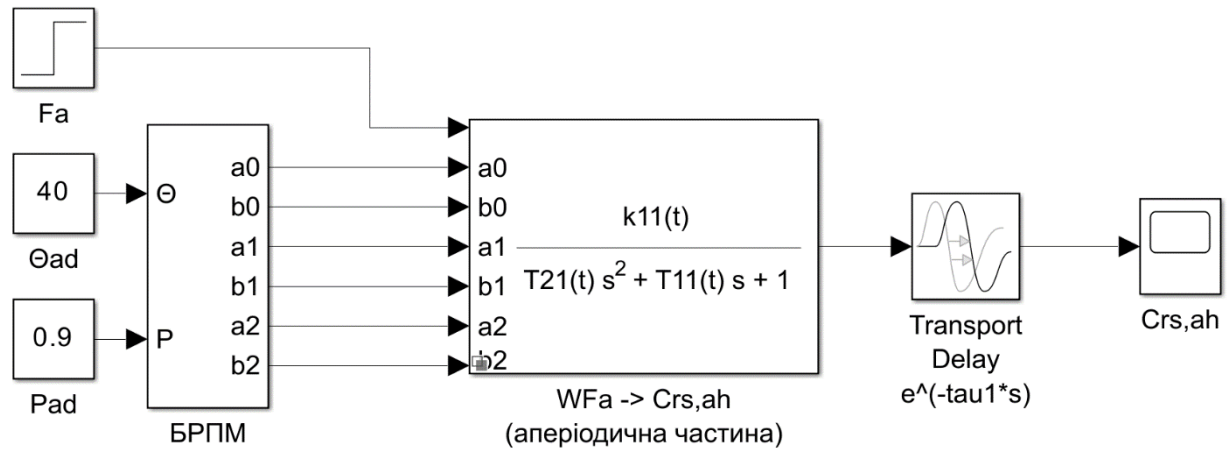


Рисунок 3.14 – Структурна *Simulink*-модель адсорбції за каналом керування

$$\langle\langle F_a \rightarrow C_{rs,ah} \rangle\rangle$$

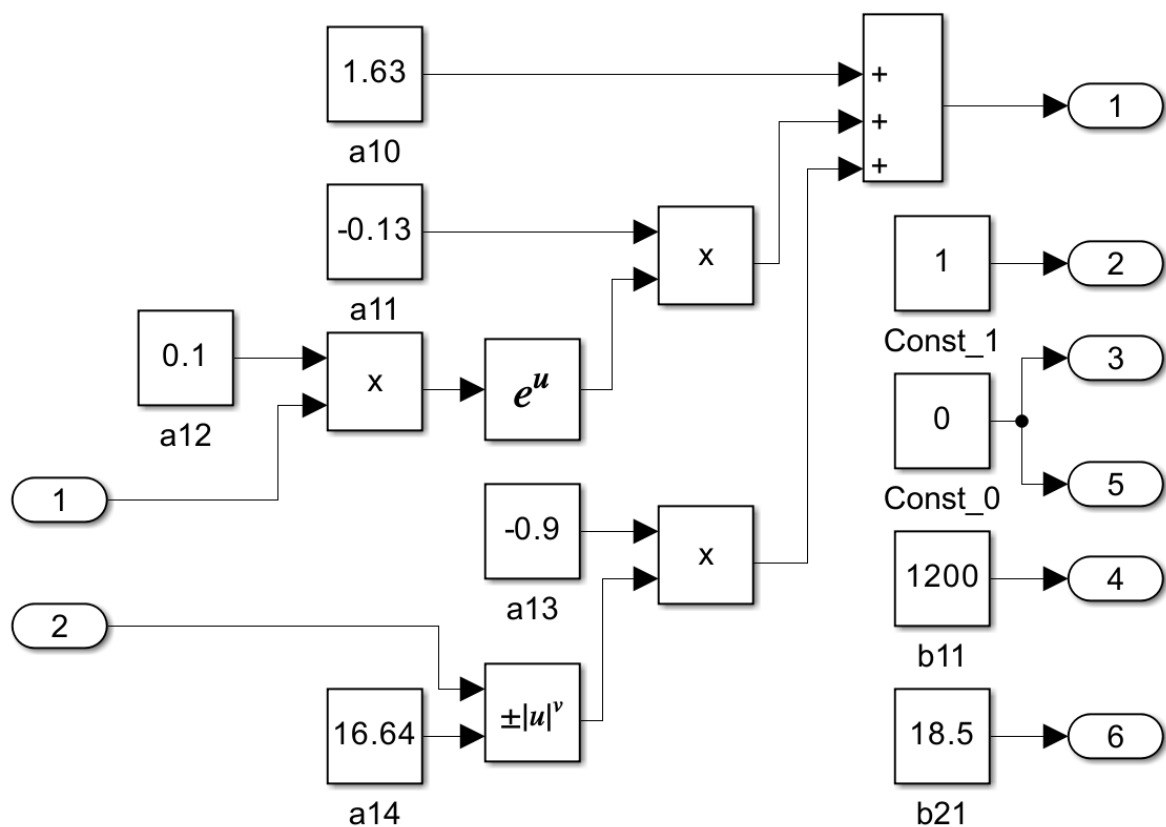


Рисунок 3.15 – Структура підсистеми БРПМ *Simulink*-моделі адсорбції

Таку *Simulink*-модель можна використовувати для порівняння алгоритмів керування адсорбером, доповнивши її блоками збурень, характерними для виробничих умов.

Для використання створеної імітаційної моделі в системі керування, перевіримо її адекватність – відповідність її поведінки об'єкту – з

використанням дисперсійного аналізу. Розглянемо канал « $F_a \rightarrow C_{rs,ah}$ » як один з основних, схема якого наведена на рисунку 3.16. Отриману модель, яку описують виразом (3.20), порівнюють з реальним об'єктом.

Наведемо перелік компонентів, з яких складається схема:

- 1) F_a – блок *Step* для задання східчастого сигналу – витрати адсорбенту.
- 2) T_{ad} , P_{ad} – блок *Constant* – для задання поточних значень температури і тиску адсорбції відповідно;
- 3) БРПМ – підсистема *Simulink*-моделі адсорбції для розрахунку коефіцієнтів передавальної функції (3.20);
- 4) $WF_a \rightarrow C_{rs,ah}$ (аперіодична частина) – блок *Varying Transfer Function* – передавальна функція об'єкта (3.20) зі змінними параметрами;
- 5) $e^{-\tau s}$ – блок *Transport Delay* – транспортне запізнювання;
- 6) $C_{rs,ah}$ – блок *Scope* для побудови графіків зміни концентрації АН створеної ІМ та реального об'єкта відповідно.

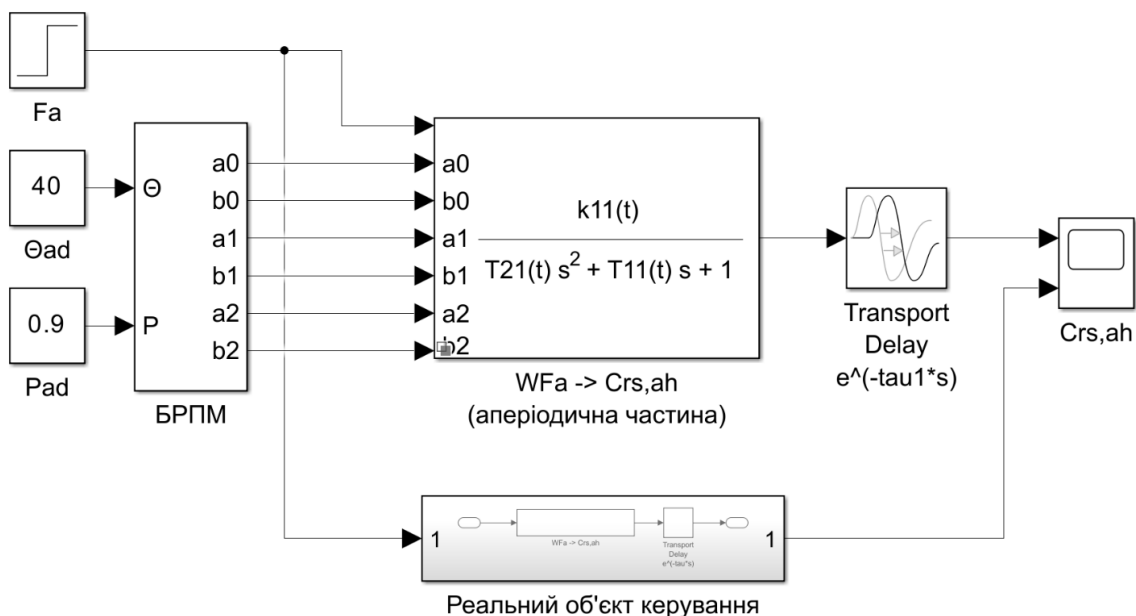
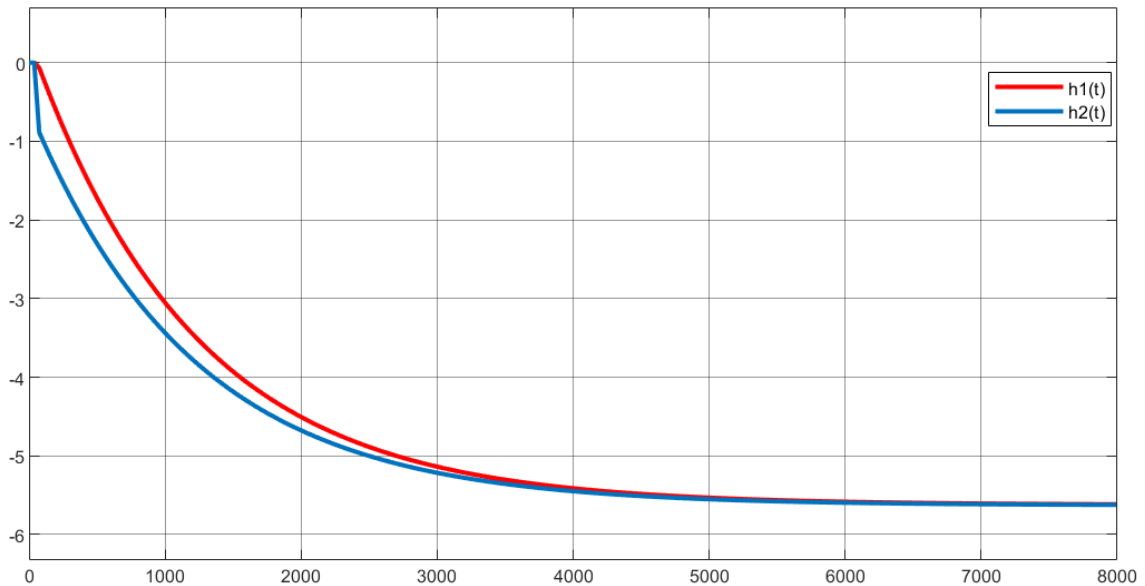


Рисунок 3.16 – Схема ІМ за каналом « $F_a \rightarrow C_{rs,ah}$ »

На рисунку 3.17 наведемо перехідні характеристики ІМ і об'єкта як реакцію на одиничний ступінчастий сигнал.



$h_1(t)$ – перехідна характеристика ІМ, $h_2(t)$ – перехідна характеристика ТОК
Рисунок 3.17 – Перехідні характеристики ІМ і ТОК за каналом « $F_a \rightarrow C_{rs,ah}$ »

Проведемо дослідження моделі з різними вхідними сигналами.

Подамо на вхід випадковий сигнал. Схема ІМ і результати роботи наведено на рисунках 3.18 і 3.19 відповідно.

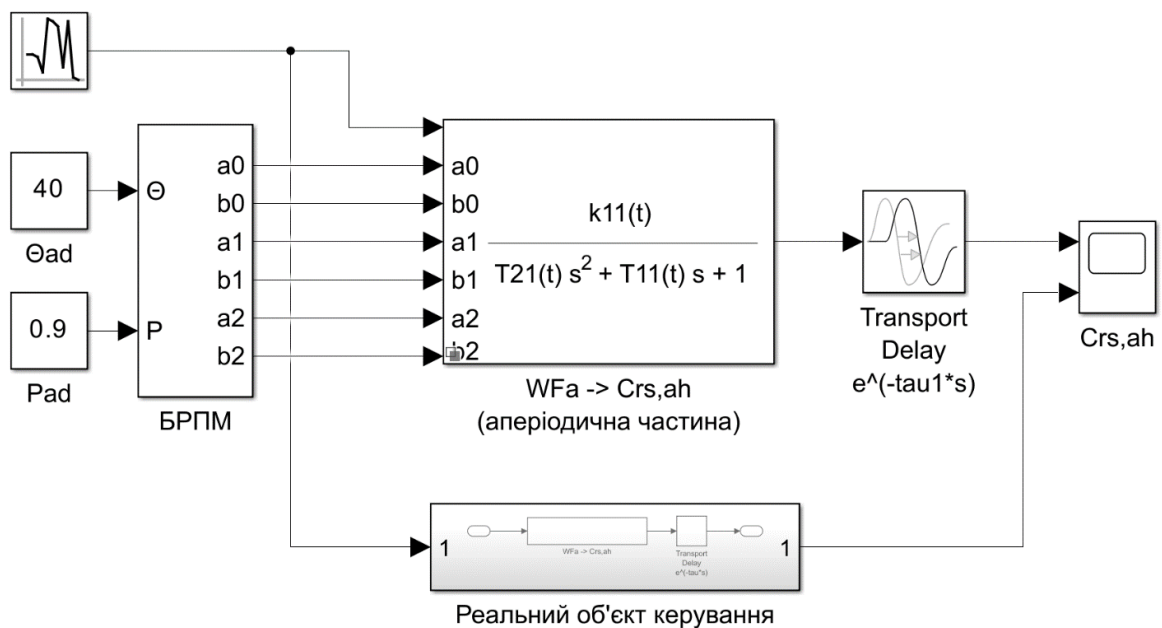
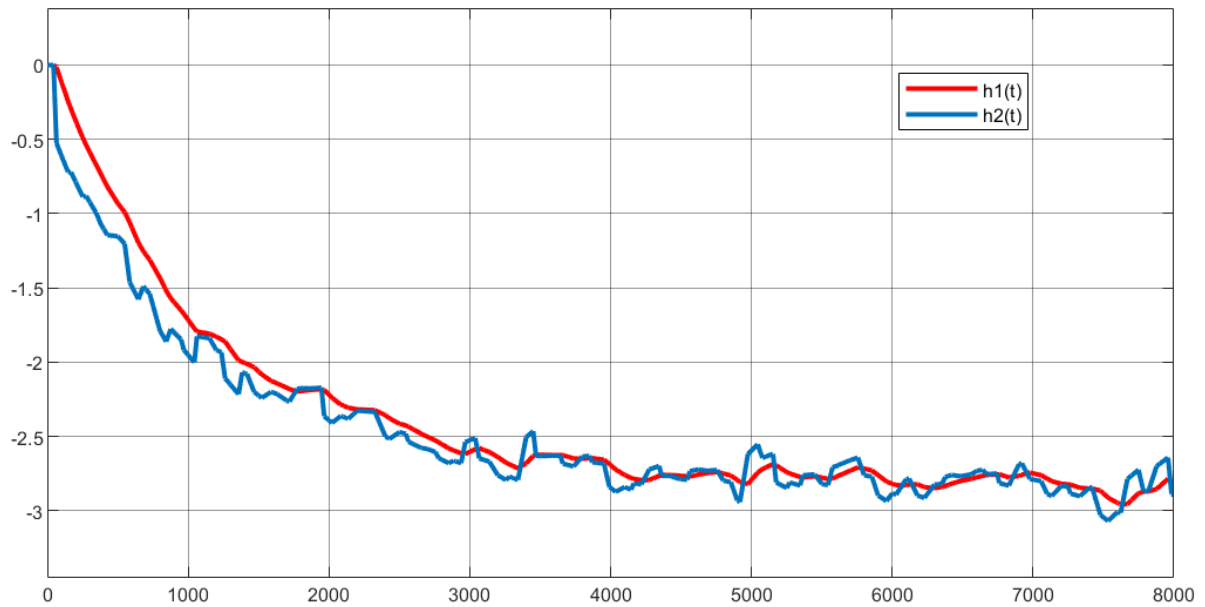


Рисунок 3.18 – Схема ІМ за каналом « $F_a \rightarrow P$ » (на вході об'єкта – випадковий сигнал)



$h_1(t)$ – перехідна характеристика ІМ, $h_2(t)$ – перехідна характеристика ТОК
Рисунок 3.19 – Перехідні характеристики ІМ і ТОК за каналом « $F_a \rightarrow C_{rs,ah}$ »
(реакція на випадковий вхідний сигнал)

Подамо на вихід об'єкта сигнал збурення випадкового характеру (рисунок 3.20). Блок налаштування параметрів моделі та результати такого моделювання наведено на рисунках 3.21 і 3.22 відповідно.

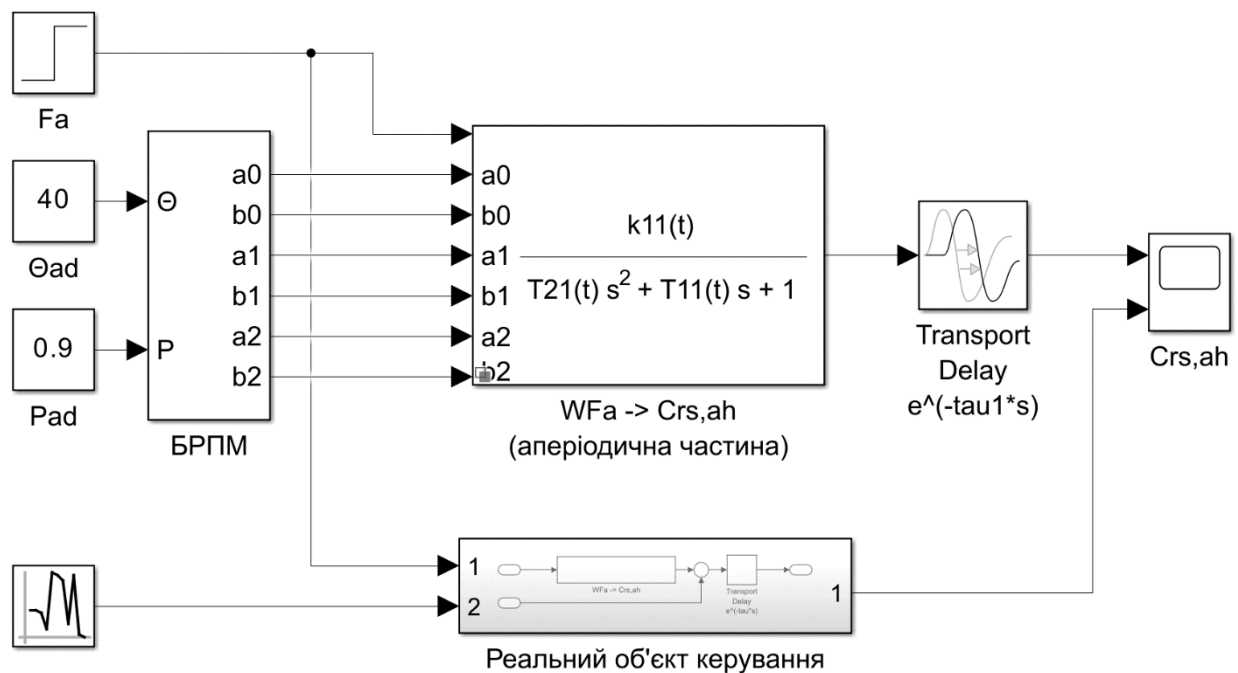


Рисунок 3.20 – Схема ІМ за каналом « $F_a \rightarrow C_{rs,ah}$ » (на виході об'єкта – випадковий сигнал)

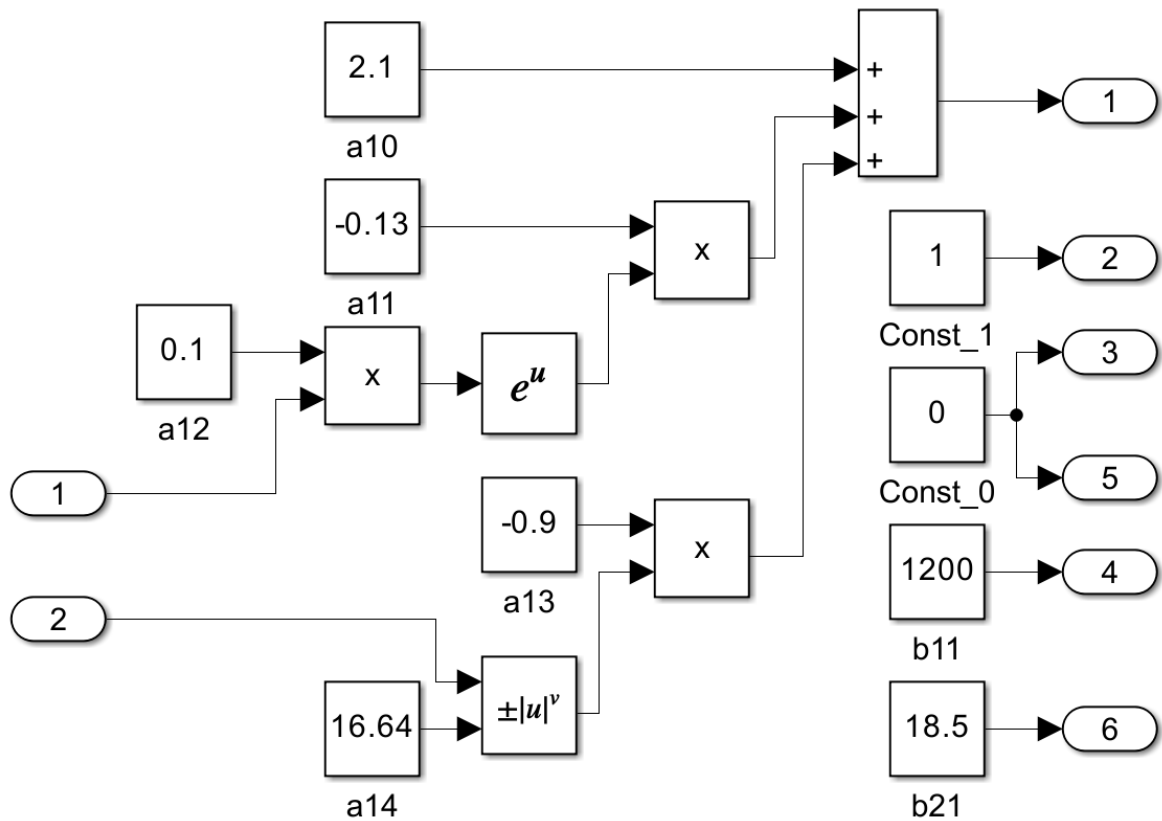
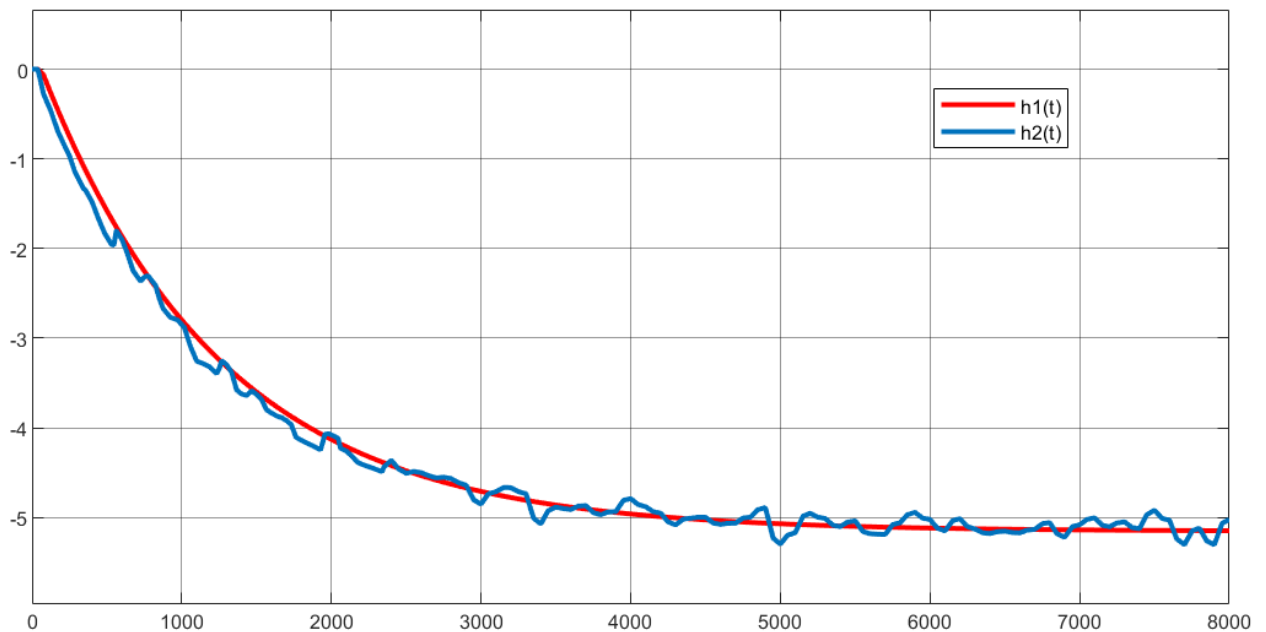


Рисунок 3.21 – Блок налаштування $k_{11}(t)$ (на виході об'єкта – випадковий сигнал)



$h_1(t)$ – перехідна характеристика ІМ, $h_2(t)$ – перехідна характеристика ТОК

Рисунок 3.22 – Перехідні характеристики ІМ і ТОК за каналом « $F_a \rightarrow C_{rs,ah}$ » при збуренні на виході ТОК

Як видно з рисунків 3.19, 3.22, ІМ відтворює поведінку реального об'єкта при нанесенні різних сигналів, у тому числі імітації збурень.

Висновки до розділу 3

1) Аналіз існуючих методів моделювання адсорбції показав, що застосування виключно аналітичних методів обмежено для розділення багатокомпонентних сумішей з нестабільним складом. Адекватна математична формалізація процесів, яка може врахувати поточні властивості частинок адсорбента, адсорбата й адсорбтива, наразі неможлива. Методи, які розглядають властивості речовини в адсорбері усереднено (як макросистем), також передбачають знання багатьох змінних, які характеризують властивості матеріальних потоків і стану технологічного обладнання, що неможливо в умовах виробництва.

2) Враховуючи, що метою застосування математичної моделі є адаптування параметрів налаштувань регуляторів і дослідження алгоритмів керування процесами адсорбційного очищення, то на основі використання спрощеної аналітичної моделі запропоновано моделювати канали керування та збурення у виді передавальних функцій другого порядку з транспортним запізнюванням.

Виконана ідентифікація експериментальних даних з відкритих джерел показав, що коефіцієнти передачі моделей є нелінійними функціями від температури та тиску в адсорбері. Встановлено, що залежності коефіцієнта передачі від режимних параметрів можуть бути експоненціальними, поліноміальними 2-3 порядку або логарифмічними.

3) Створено структурно-параметричну схему моделі та схему системи адаптації моделі адсорбера, які ілюструють алгоритм їх використання в комп'ютерних системах керування процесами очищення ВОМ.

4) На основі визначеної структури передавальних функцій була створена імітаційна модель засобами *MATLAB* + *Simulink*, яка відповідає концепції моделювання і показала свою працездатність.

5) Виконано порівняння імітаційної та спрощеної аналітичної (СА) моделей адсорбера. Визначено, що поведінка імітаційної моделі відтворює СА з високою точністю. Враховуючи, що ІМ вимагає меншої кількості параметрів і факторів, то її доцільно застосувати в системі керування.

4 КЕРУВАННЯ АДСОРБЕРОМ У РЕЖИМІ СТАЛОЇ СИРОВИНИ

Подані у пп. 1.1, 2.1, 3.3.1 дослідження технологічної системи очищення індустриальних та транспортних олив та мастил вказують на те, що для неї притаманні два типи зміни властивостей речовин.

Було відзначено, що перший має *системний характер*, оскільки виникає кожний раз, як відбувається надходження сировини з суттєво різними властивостями. Відповідна нестационарність має або більш-менш передбачуваний (псевдоперіодичний) характер при одному постачальнику сировини (постачальник має декілька «точок» збору відходів) або непередбачуваний (випадковий) – при декількох різних постачальниках. Систему керування процесом очищення для такого типу зміни сировини (режим «Зміна сировини») описано в розділі 2.

Інший тип змін (нестационарності) має суто *випадковий характер*. Властивості сировини й адсорбенту є випадковими величинами, ми розглядаємо їх як зовнішні збурення. Показники стану внутрішніх елементів конструкції адсорбера та інших апаратів вважаємо внутрішніми збуреннями [61]. Значну частину цих факторів неможливо контролювати оперативно.

Створенню системи керування для цього типу змін – режиму «сталості сировини» – присвячено цей розділ. Така система керування має забезпечити вимоги до якості очищення ВОМ в умовах недостатнього інформаційного забезпечення та нестационарності значної кількості характеристик технологічної системи.

Створення системи керування процесом адсорбції в умовах невизначеностей характеристик сировини, адсорбенту й адсорбера, притаманних нормальному режиму функціонування виробництва передбачає розв'язання таких задач:

а) визначення джерел нестационарності процесів адсорбційного очищення та типів їх трендів;

б) створення структури АСК та алгоритмів її роботи, що враховують наявність нестационарностей.

4.1 Дослідження типів нестационарності процесу

Оливи та мастила характеризують значною кількістю властивостей. Це пов'язано з достатньо складними умовами їх використання та вимогами до експлуатації тих матеріалів, з якими вони контактують.

Відсутність потрібних ТЗА викликає невизначеність умов функціонування ТОК. Для системи керування об'єктом доцільно вибрати спрощені та зручні для адаптування моделі. Саме такі моделі запропоновані в розділі 3.

Як сказано раніше, джерелами нестационарності процесів адсорбційного очищення можуть бути, забруднена сировина, адсорбент та адсорбер. Динаміка саме їх характеристик дає розуміння про типи часових трендів у ТС. Розглянемо кожне джерело.

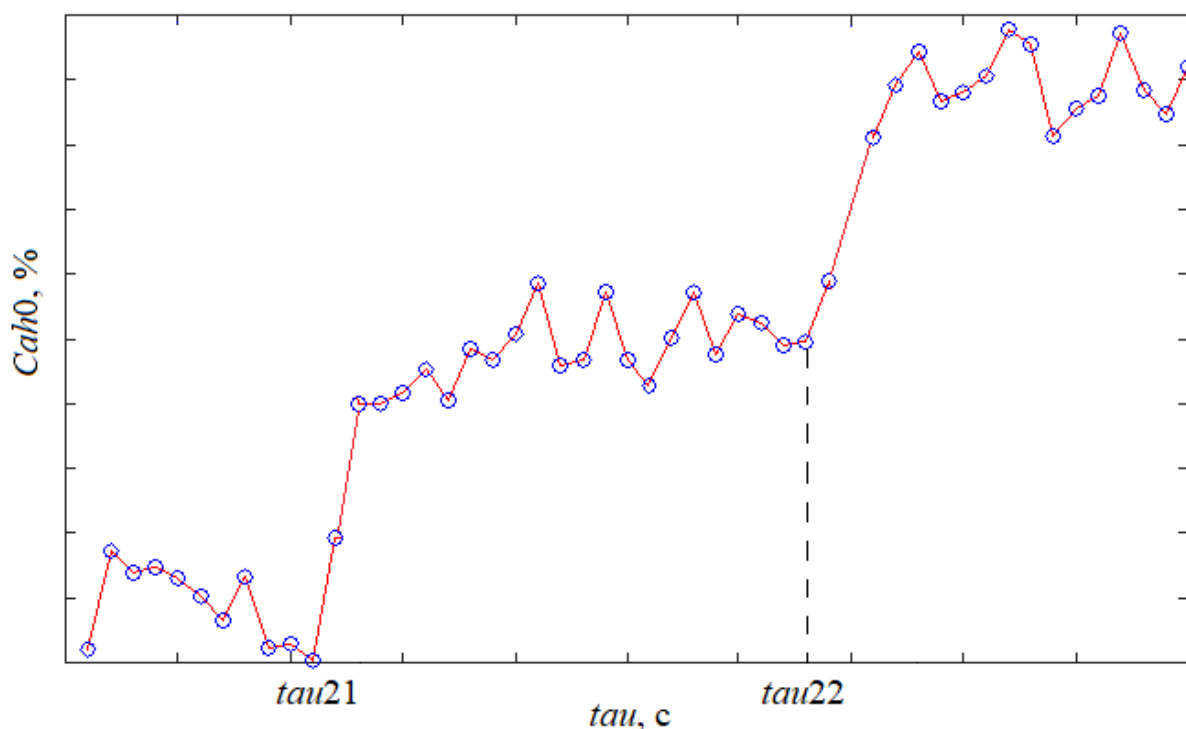
Оливи та мастила є багатокомпонентними матеріалами, їх склад визначає властивості і призначення цільової продукції. При експлуатації вони змінюють свої властивості через накопичення забруднювачів. Тип відпрацьованого мастила відображає як його початковий, так і кінцевий компонентний склад.

Нестабільність властивостей забруднених оливи або мастила викликана різними факторами, серед яких компонентний склад, ступінь забруднення та характер попередньої експлуатації.

Для оцінювання якості очищеної продукції (рафінату) використовують також цілий комплекс фізико-хімічних властивостей, перелік яких змінюється залежно від її призначення [34].

Розглянемо можливу поведінку властивостей сировини на прикладі концентрації ароматичних вуглеводнів, C_{AH} , які є частиною забруднювачів.

Можливі приклади реалізацій випадкового процесу адсорбції для концентрації ароматичних вуглеводнів у сировині, C_{ah0} та в очищеному продукті, $C_{rs,ah}$ в режимах «Зміна сировини» та «Стала сировина» наведено на рисунках 4.1 та 4.2 відповідно.



τ_{21} , τ_{22} – момент зміни властивостей сировини – перехід у режим «Зміна сировини»

Рисунок 4.1 – Реалізація випадкового процесу адсорбції для концентрації ароматичних вуглеводнів у сировині, C_{ah0} в режимах «Зміна сировини» та «Стала сировина»

З рисунків 4.1 і 4.2 видно, що тип нестационарності, пов'язаний із сировиною, в цих двох режимах різний. Велика амплітуда значень у коливаннях відповідає режиму «Зміна сировини», а мала – «Стала сировина». Коливання ілюструють поведінку концентрації як випадкової величини.

Адсорбент неперервно циркулює в технологічних ланках виробництва в такій послідовності: адсорбція, десорбція, стадії підготовки (висушування, регенерація, охолодження), й знову адсорбція.

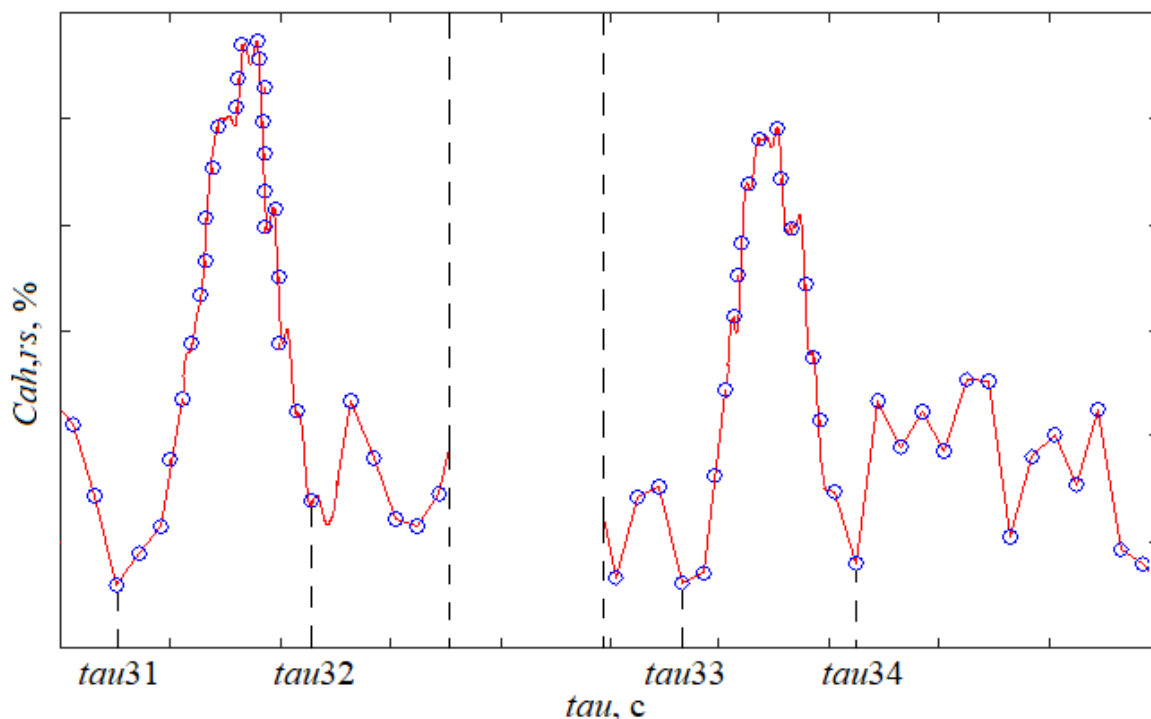


Рисунок 4.2 – Реалізація випадкового процесу адсорбції для концентрації ароматичних вуглеводнів в очищеному продукті, C_{ah1} в режимах «Зміна сировини» та «Стала сировина»:

τ_{au31} , τ_{au33} – час переходу в режим «Зміна сировини», τ_{au32} , τ_{au34} – час переходу в режим «Стала сировина»

Характеристиками адсорбенту є, зокрема, ступінь його відновлення, тобто співвідношення між його початковою і кінцевою адсорбційною здатністю, яка визначається компонентним складом адсорбенту і властивостями адсорбату – концентраціями ароматичних вуглеводнів, сірки, смол і т. ін.

При очищенні відпрацьованих олив або мастил використовують синтетичні адсорбенти, зокрема, дрібнопористий алюмосилікатний каталізатор [4], [34], властивості якого змінюються при неперервній циркуляції від адсорбції до процесу охолодження.

На рисунку 4.3 наведено можливий приклад реалізацій випадкового процесу для концентрації смол (C_{r0}) в адсорбенті на вході адсорбера.

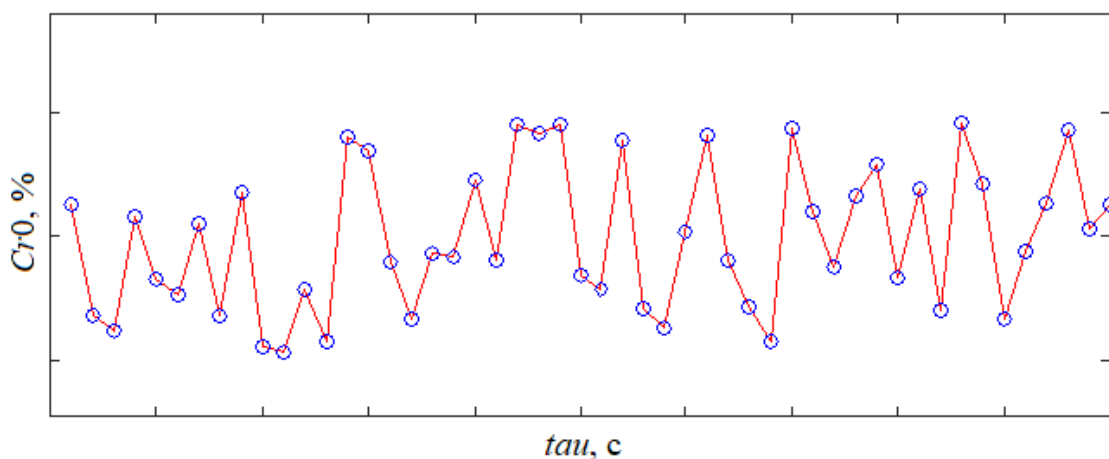


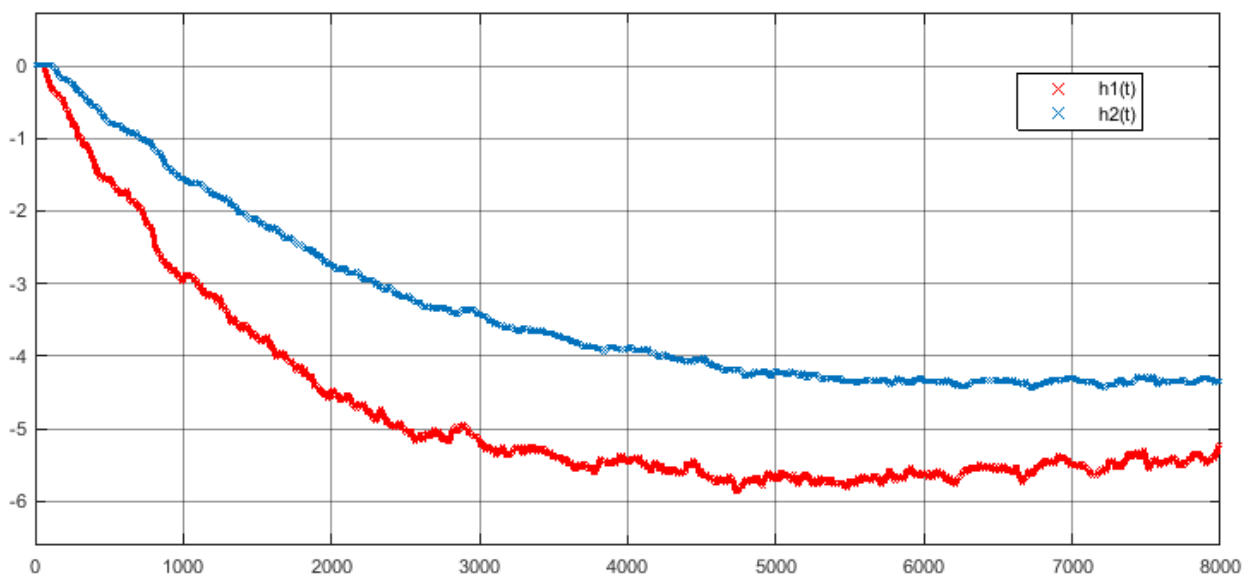
Рисунок 4.3 – Реалізація випадкового процесу для концентрації смол в адсорбенті на вході адсорбера

Адсорбери, які розглядаються в дисертації, працюють неперервно і розподілені по висоті за зонами (секціями). Зони відокремлені одна від одної розподільними тарілками – трубчастими решітками [4].

Зміни параметрів конструкційних елементів апарату можуть бути викликані налипанням речовин на стінках адсорбера, забиванням прохідних перерізів між тарілками та механізмів подачі адсорбенту (форсунок) тощо. Ці збурення знижують показники ефективності очищення сировини та є функціями часу, t . Показниками можуть бути питомі витрати адсорбенту на одиницю зменшення концентрацій забруднювачів, спеціально визначений узагальнений коефіцієнт ефективності очищення (чи функціонування технологічної системи) тощо.

Зміни у розмірах, конфігураціях і масі конструктивних елементів адсорбера призводять до зміни видів зв'язку в каналах ТОК. Це можна ілюструвати прикладами перехідних характеристик (рисунок 4.4) каналу « $F_a \rightarrow C_{ah1}$ » на різних етапах процесу очищення.

Отже, зміни в часі властивостей сировини, адсорбенту та поверхонь елементів адсорбера розглядатимемо як нестационарні процеси.



$h_1(t)$, $h_2(t)$ – перехідні характеристики, визначені для раннього та пізнього етапів перебігу очищення відповідно

Рисунок 4.4 – Графіки перехідних характеристик каналу керування

Ознайомлення з типами ліній тренду (рисунки 4.1 – 4.4) дозволяє визначити, які саме математичні і логічні операції треба виконувати в АСК для компенсації впливу нестационарності на якість керування.

Так, рисунок 4.1 вказує на стрибкоподібну лінію тренду однієї з характеристик (концентрація в адсорбері ароматичних вуглеводнів, C_{ah0}), пов'язаної з надходженням нової сировини.

У режимі «*Стала сировина*» часовими змінами характеристик сировини й адсорбенту можна знехтувати. А от зміни властивостей внутрішніх поверхонь адсорбера призведуть до змін властивостей цього апарату з точки зору ТОК. Таке джерело нестационарності вимагає адаптування параметрів налаштування ПІ-регулятора (k_{p1} , T_{i1}) АСК тиску та температури в адсорбері (далі для спрощення тексту будемо називати тільки першу АСК). Корегування k_{p1} та T_{i1} в тій або іншій мірі потрібне при зміні складу сировини, оскільки різні хімічні елементи по-різному адсорбуються. Склад забруднювачів, вважаємо, стосується головним чином k_{p1} . Різноманіття алгоритмів адаптації АСК дозволяє вибрати найбільш ефективну пару k_{p1} , T_{i1} .

4.2 Вибір типу системи адаптивного керування

Смисл адаптивного керування передбачає виконання широкого кола досліджень і розробок, таких як створення структур систем керування, алгоритмів їхнього функціонування, зокрема алгоритмів корегування моделей. Такий тип керування треба використовувати, коли властивості ТОК змінюються, як у нашому випадку, під впливом зовнішніх чи внутрішніх причин і в умовах невизначеності знайдені раніше керувальні впливи не відповідатимуть потребам об'єкта у поточний час.

Існують різноманітні класифікації адаптивних систем. Поширеною [62] є виділення трьох класів систем: із самоналаштуванням (СНС), із самоорганізацією, із самонавчанням. Розглянемо їх більш детально.

Системи із самоналаштуванням, в яких для зміни параметрів регуляторів або уставок для них використовують інформацію про динамічні характеристики ТОК та/або зовнішні впливи із забезпеченням заданого або екстремального значення критерію якості. До них належать розімкнені і замкнені системи, які, у свою чергу, можуть бути функціонально (пошукові/безпошукові) та параметрично (з ідентифікацією об'єкта/параметрів системи керування) адаптивні. Розімкнені системи використовують, якщо відомі залежності, за якими потрібно змінювати параметри налаштування регулятора. Якщо неможливо безпосередньо визначити динамічні властивості об'єкта, параметри розраховують зі зворотним зв'язком. Для отримання мінімального обсягу інформації про об'єкт, вимірюють його вхідні і вихідні сигнали.

У функціонально адаптивних системах зміну параметрів або керування виконують за певним критерієм якості – прямі алгоритми адаптивного керування [62].

У пошукових системах для мінімізації критерію якості I

$$I = f(U, A),$$

де U – керувальні впливи, A – параметри системи, змінюють значення U або A на певне відхилення ΔU або ΔA відповідно:

$$U_{ad} = U \pm \Delta U, A_{ad} = A \pm \Delta A,$$

де U_{ad}, A_{ad} – адаптовані параметри системи керування.

Рух продовжують у напрямку зменшення критерію I до досягнення I_{\min} .

У безпошукових системах використовують еталонну модель з обчисленням критерію оптимальності на основі апріорної або поточної інформації про об'єкт і порівнянням з поточним значенням I_{cur} .

$$\Delta I = I - I_{cur}.$$

Адаптація в таких системах завершитися $\Delta I = 0$ або $\Delta I \rightarrow \min$.

У параметрично-адаптивних системах керування, в яких параметри регулятора змінюють залежно від поточної інформації про властивості об'єкта, ідентифікацію проводять або тільки для об'єкта, або для системи керування.

У системах з самоорганізацією адаптація полягає в зміні структури системи керування. Системи із самонавчанням передбачають збір даних про об'єкт, відслідковування його поведінки, зокрема законів функціонування системи, і забезпечення оптимальних режимів з використанням інформації, отриманої про об'єкт у процесі експлуатації. Такі системи додатково потребують зовнішніх знань про ТОК.

Наявність невизначеностей (нестационарностей) при адсорбційному очищенні, описані у п. 4.1, призводять до необхідності адаптування параметрів моделі відповідно до змін властивостей ТОК [62]. Алгоритм адаптації полягає у знаходженні коефіцієнтів рівняння (3.20) відповідно до змін поведінки реального об'єкта.

При виборі типу АдАСК до уваги була взята потреба у поточній моделі ТОК для інших задач контролю та керування, зокрема для аналізу та прогнозування перебігу процесів.

Тому для керування очищенням в режимі «Стала сировина» вибрано адаптивну систему керування ідентифікаційного типу. Алгоритм керування в

такому випадку передбачає використання поточної моделі каналу керування, яку будуть ідентифікувати реальній поведінці каналу ТОК та використовувати для корегування параметрів налаштування регулятора.

4.3 Система адаптивного керування адсорбером

Наразі розв'язання задач нестационарності на основі адаптивного керування забезпечено вже цілою низкою алгоритмів, достатньо опрацьованими теоретично і перевіреними практично. Існує достатньо ідей щодо реалізації адаптивного керування, які об'єднують за різними класифікаційними ознаками [62], [63]. Результати застосування певного алгоритму залежать від врахування в ньому особливостей технологічних процесів.

4.3.1 Корегування параметрів моделі адсорбції та регуляторів

У пп. 3.3.2, 3.3.3 [64] обґрунтовано структуру імітаційної моделі ТОК за каналом «Витрата адсорбенту \rightarrow концентрація C_{ah1} ».

Як початкову використаємо таку ж структуру моделі за каналом «Витрата адсорбенту, $F_a \rightarrow$ Тиск в адсорбері, P_{ad} »:

$$W_2(s, t) = k_{22}(t)e^{-\tau_2 s} / (T_{22}(t)s^2 + T_{21}(t)s + 1), \quad (4.1)$$

де $k_{22}(t)$, τ_2 , $T_{22}(t)$, $T_{21}(t)$ – коефіцієнт передачі, транспортне запізнювання та сталі часу.

Скористаємось також структурою залежностей $k_{22}(t)$, $T_{22}(t)$, $T_{21}(t)$ від умов перебігу процесу адсорбції (режимних параметрів P_{ad} , Θ_{ad}) та з метою узагальнення математичних виразів для АДАСК запишемо (4.1), замінивши традиційні для передавальних функцій позначення на позначення, притаманні алгебраїчним рівнянням:

$$W_2(s, t) = [b_{10}(t) + b_{11}(t) e^{b_{12}(t)\Theta_{ad}} + b_{13}P_{ad} b_{14}(t)] e^{-\tau_2 s} / [(b_{22}(t)s^2 + b_{21}(t)s + 1)]. \quad (4.2)$$

З (4.2) отримаємо $W_2(s, t)$, як функцію від векторів параметрів та Θ_{ad}, P_{ad}

$$W_2(s, t) = \varphi[\mathbf{B}_1(t), \mathbf{B}_2(t), \Theta_{ad}, P_{ad}], \quad (4.3)$$

де $\mathbf{B}_1(t), \mathbf{B}_2(t)$ – вектори параметрів у чисельнику та знаменнику передавальної функції каналу керування « $F_a \rightarrow P_{ad}$ » відповідно.

Алгоритм адаптації полягає у знаходженні коефіцієнтів векторів $\mathbf{B}_1(t), \mathbf{B}_2(t)$ рівняння (4.3) відповідно до змін поведінки реального об'єкта.

За результатами роботи промислового об'єкта може бути прийнято рішення щодо спрощення моделей за каналами керування.

Зміна поведінки об'єкта через наявність невизначеностей вимагає створення адаптивних систем керування з корегуванням параметрів регулятора.

Адаптивний ПІ-регулятор [62] можна описати виразом:

$$u = k_p \left[\varepsilon(t) + k_i \int \varepsilon(t) dt \right],$$

де $\varepsilon(t)$ – сигнал розузгодженості, k_p – коефіцієнт передачі регулятора, $k_i = 1/T_i$ – коефіцієнт обернено пропорційний часу інтегрування T_i .

З метою адаптації, коефіцієнт k_p запропоновано перераховувати за формулою:

$$k_p^{n+1} = \alpha \cdot k_p^n \cdot \frac{|\varepsilon(t_1)|}{t_1 \cdot \max \left| \dot{\varepsilon}(t_1) \right|}, \quad (4.4)$$

де k_p^n – значення коефіцієнта підсилення регулятора перед адаптацією, k_p^{n+1} – перераховане значення коефіцієнта підсилення регулятора, t_1 – час досягнення максимуму модуля першої похідної від модуля сигналу неузгодженості, n – номер кроку адаптації.

Алгоритм адаптації [62] передбачає перед (4.4) виконання таких розрахунків

$$\left| \dot{\varepsilon}(t_1) \right| = \max [\dot{\varepsilon}(t)], \quad t_1 = t \text{ при } \left| \dot{\varepsilon}(t_1) \right| = \max [\dot{\varepsilon}(t)], \quad \varepsilon(t_1) = \varepsilon(t) \text{ при } t = t_1.$$

Налаштування $k_p^{(0)}, T_i^{(0)}$ визначають за апріорними даними про об'єкт. Налаштування T_i для АДАСК заплановано виконувати за таким же виразом, що й для k_p .

4.3.2 Схеми систем адаптивного керування адсорбером

На рисунку 4.5 наведено структурну схему АДАСК P_{ad} для режиму «Стала сировина» з ідентифікацією моделі ТОК виду (4.2).

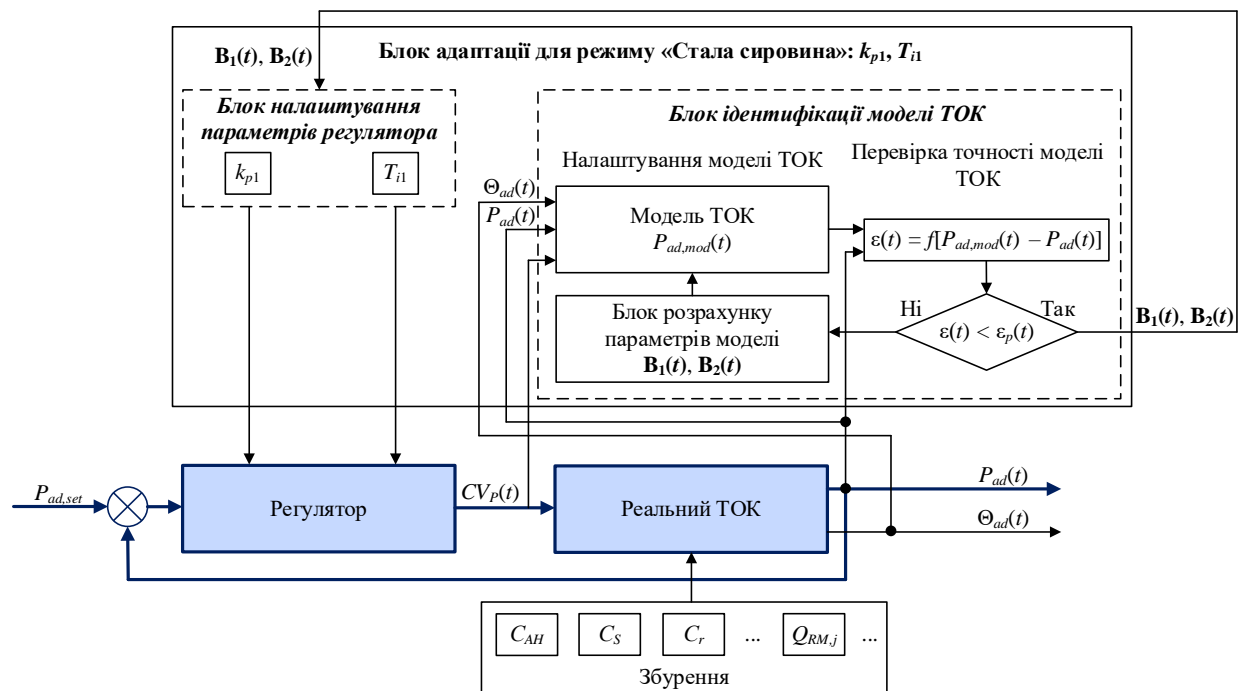


Рисунок 4.5 – Структурна схема АДАСК P_{ad} для режиму «Стала сировина» з ідентифікацією моделі ТОК

Блок адаптації містить Блок ідентифікації моделі ТОК і Блок налаштування параметрів регулятора.

Для налаштування коефіцієнтів моделі ТОК на однойменний блок надходять значення тиску і температури, які вимірюють на виході об'єкта, а також керувальний вплив $CV_P(t)$ (ступінь відкриття клапану). Визначення коефіцієнтів передавальної функції відбувається в блоці розрахунку векторів $\mathbf{B}_1(t)$, $\mathbf{B}_2(t)$. Після такої параметричної ідентифікації порівнюють виходи

моделі з відповідним виходом реального ТОК. Якщо виконується умова $\varepsilon(t) < \varepsilon_p(t)$, де $\varepsilon_p(t)$ – припустиме значення похибки, параметри векторів $\mathbf{B}_1(t)$, $\mathbf{B}_2(t)$ передають на блок налаштування параметрів регулятора, в якому за необхідності коригують параметри k_{p1} , T_{i1} . Якщо $\varepsilon(t) > \varepsilon_p(t)$, коефіцієнти моделі знову перераховують.

У Блоці ідентифікації моделі ТОК записано вираз для розрахунку точності ідентифікації моделі, $\varepsilon(t)$ у загальному виді:

$$\varepsilon(t) = f[P_{ad,mod}(t) - P_{ad}(t)],$$

де $P_{ad,mod}(t)$ – розраховане за моделлю значення тиску в адсорбері.

Існують алгоритми ідентифікації моделі замкненої системи, з якої потім виокремлюють модель регулятора, отримуючи модель ТОК [65]. На рисунку 4.6 зображено схему АдАСК з ідентифікацією моделі ТОК через ідентифікацію замкненої системи.

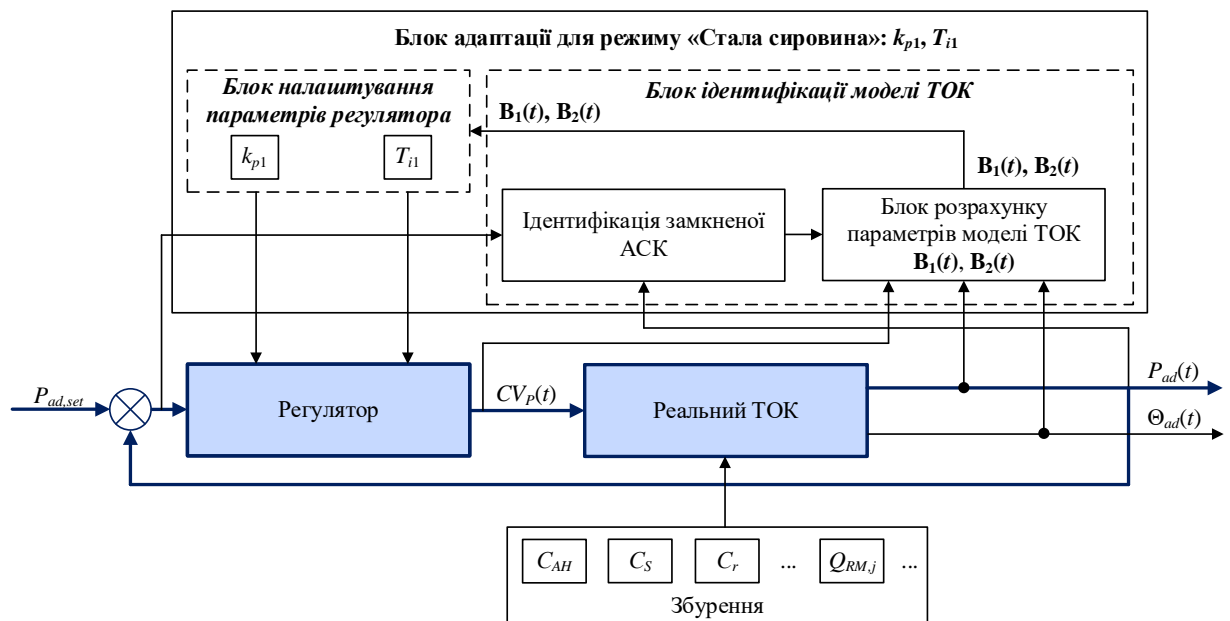


Рисунок 4.6 – Структурна схема АдАСК P_{ad} для режиму «Стала сировина» з ідентифікацією замкненої системи

На відміну від попереднього, цей алгоритм передбачає, що на блок ідентифікації замість сигналу $CV_p(t)$ подають $P_{ad,set}$, тобто визначають передавальну функцію замкненої системи, з якої виокремлюють передавальну функцію ТОК і коригують параметри регулятора.

4.3.3 Визначення умов очищення нової сировини для внесення в базу даних

Як зазначено у п. 2.2 в режимі «Зміна сировини» важливим є визначення ПРП $P_{ad,set}$ і $\Theta_{ad,set}$ на основі речовин-аналогів. Але при переході в режим «Стала сировина» необхідно коригувати ці значення для поточних речовин, які обробляють, за показниками якості продукції. Так, передбачено корегування $P_{ad,set}$ за допомогою значень концентрацій забруднювачів у продукції. На рисунку 4.7 зображено контур керування тиском в адсорбері з корекцією завдання, $P_{ad,set}$ по концентраціях C_{AH} , C_S . Корегування запропоновано виконувати на основі системи *fuzzy logic*, тобто використовуючи нечіткі множини і правила нечіткої логіки.

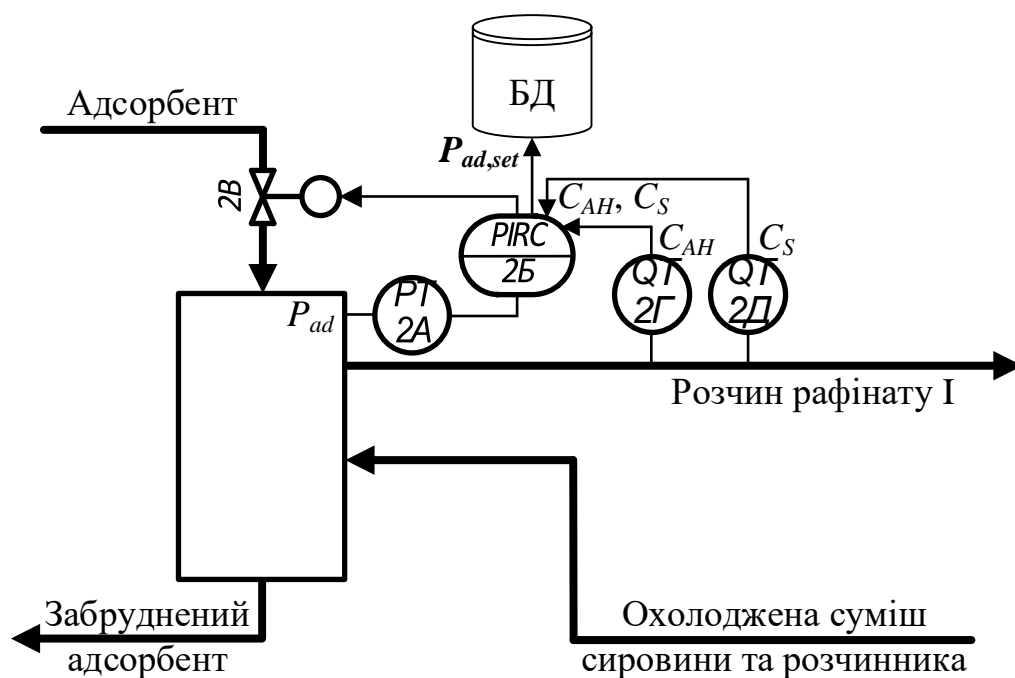


Рисунок 4.7 – Схема керування тиском в адсорбері з корекцією завдання по концентраціях C_{AH} , C_S

Наведемо приклад уточнення $P_{ad,set}$ в системі керування тиском в адсорбері.

Визначимо лінгвістичні змінні для керування зазначеним процесом: C_{ah} , C_s – відповідно вміст ароматичних вуглеводнів та сірки на виході з

адсорбера, Pad – тиск в апараті. Універсуми для вмісту ароматичних вуглеводнів та сірки відповідно: $C_{ah} = 9,6...17 \%$, $C_s = 0,1...0,5 \%$, для тиску $Pad = 0,5...1,6$ МПа. Терм-множина лінгвістичної змінної «**Вміст ароматичних вуглеводнів**» – $C1 = \{\text{«Дуже низький»}, \text{«Низький»}, \text{«Нормальний»}, \text{«Високий»}, \text{«Дуже високий»}\}$, терм-множина лінгвістичної змінної «**Вміст сірки**» – $C2 = \{\text{«Низький»}, \text{«Нормальний»}, \text{«Високий»}\}$, терм-множина вихідної лінгвістичної змінної «**Тиск в адсорбері**» – $C3 = \{\text{«Дуже малий»}, \text{«Малий»}, \text{«Нормальний»}, \text{«Високий»}, \text{«Дуже високий»}\}$.

Сформулюємо продукційні правила керування для системи «вміст ароматичних вуглеводнів та сірки – тиск в адсорбері»:

- ЯКЩО [Вміст AH «Дуже низький» І Вміст S «Низький», ТО Тиск Ad «Дуже малий»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Низький» І Вміст S «Низький», ТО Тиск Ad «Малий»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Нормальний» І Вміст S «Низький», ТО Тиск Ad «Нормальний»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Високий» І Вміст S «Низький», ТО Тиск Ad «Високий»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Дуже високий» І Вміст S «Низький», ТО Тиск Ad «Високий»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Дуже низький» І Вміст S «Нормальний», ТО Тиск Ad «Малий»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Низький» І Вміст S «Нормальний», ТО Тиск Ad «Нормальний»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Нормальний» І Вміст S «Нормальний», ТО Тиск Ad «Нормальний»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Високий» І Вміст S «Нормальний», ТО Тиск Ad «Високий»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Дуже високий» І Вміст S «Нормальний», ТО Тиск Ad «Дуже високий»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Дуже низький» І Вміст S «Високий», ТО Тиск Ad «Нормальний»];

- ЯКЩО [Вміст *АН* «Низький» І Вміст *S* «Високий», ТО Тиск *Ad* «Нормальний»];
- ЯКЩО [Вміст *АН* «Нормальний» І Вміст *S* «Високий», ТО Тиск *Ad* «Високий»];
- ЯКЩО [Вміст *АН* «Високий» І Вміст *S* «Високий», ТО Тиск *Ad* «Високий»];
- ЯКЩО [Вміст *АН* «Дуже високий» І Вміст *S* «Високий», ТО Тиск *Ad* «Дуже високий»].

Результати реалізації нечіткої системи «вміст ароматичних вуглеводнів та сірки – тиск в адсорбері» засобами програми *MATLAB* подано у вигляді вікон такого виду: схема нечіткої системи (рисунок 4.8); редактор функцій належності для вхідних рисунки 4.9, 4.10) і вихідних (керувальних) змінних (рисунок 4.11); редактор продукційних правил після їх визначення (рисунок 4.12); перегляд результату використання продукційних правил (рисунок 4.13) та поверхні нечіткого висновку (рисунок 4.14).

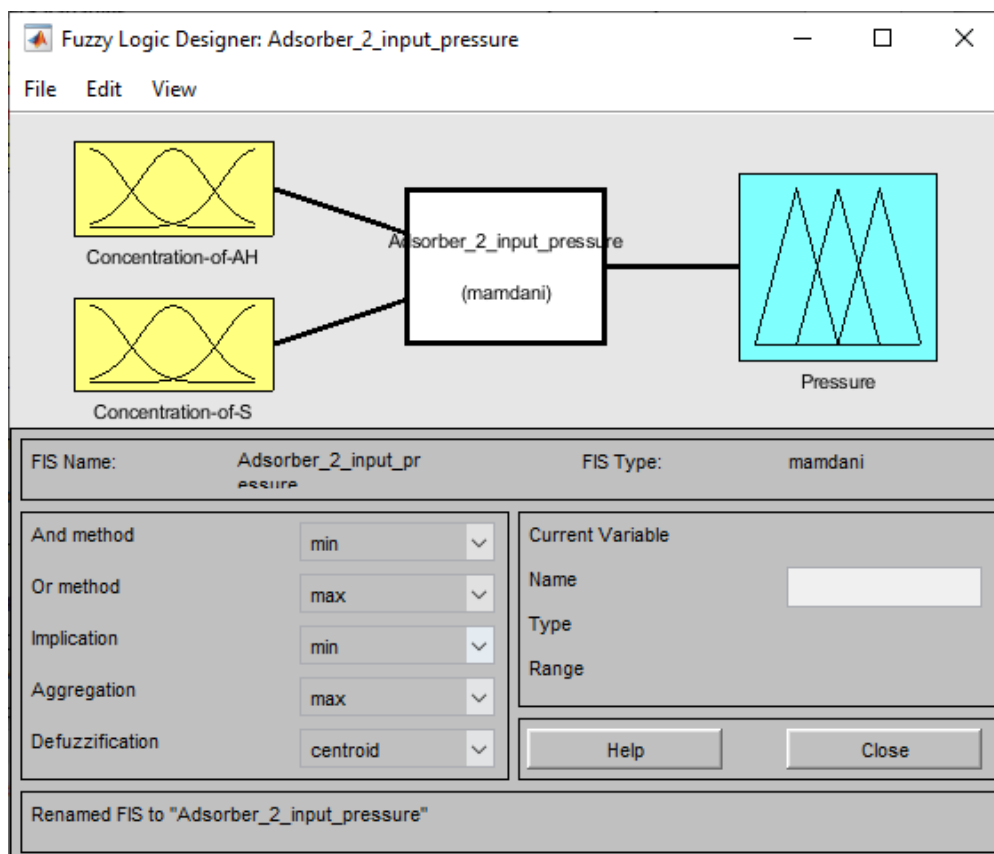


Рисунок 4.8 – Схема нечіткої системи в середовищі *MATLAB*

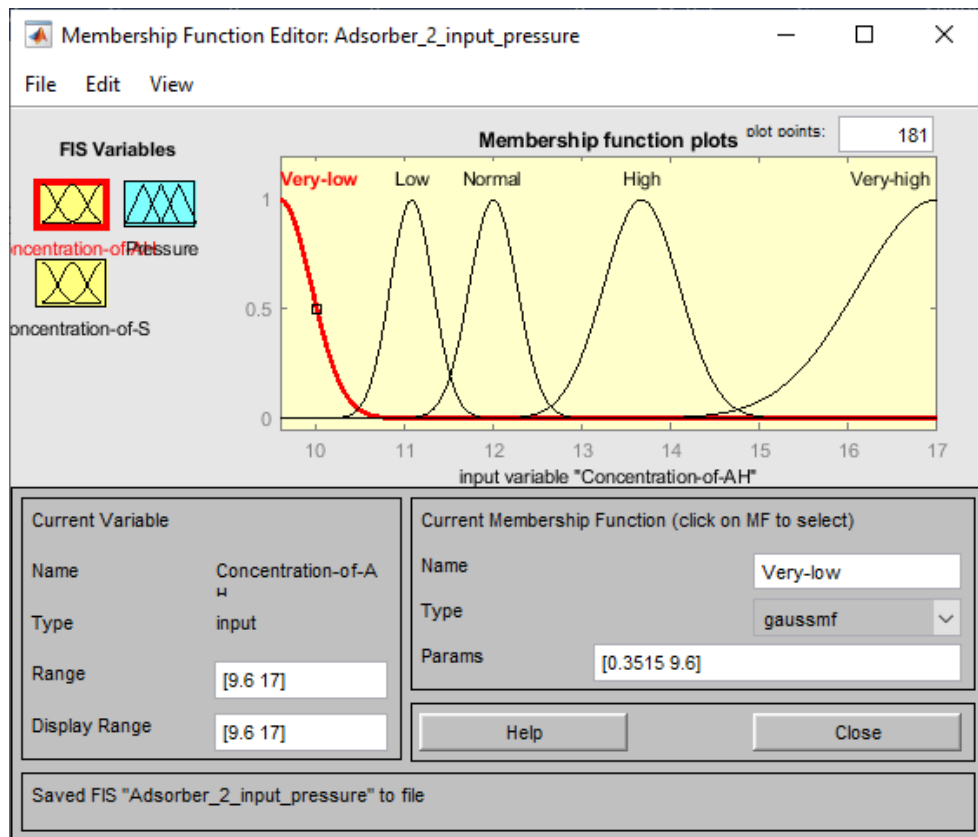


Рисунок 4.9 – Вікно редактора функцій належності для вхідної змінної
«Вміст AH »

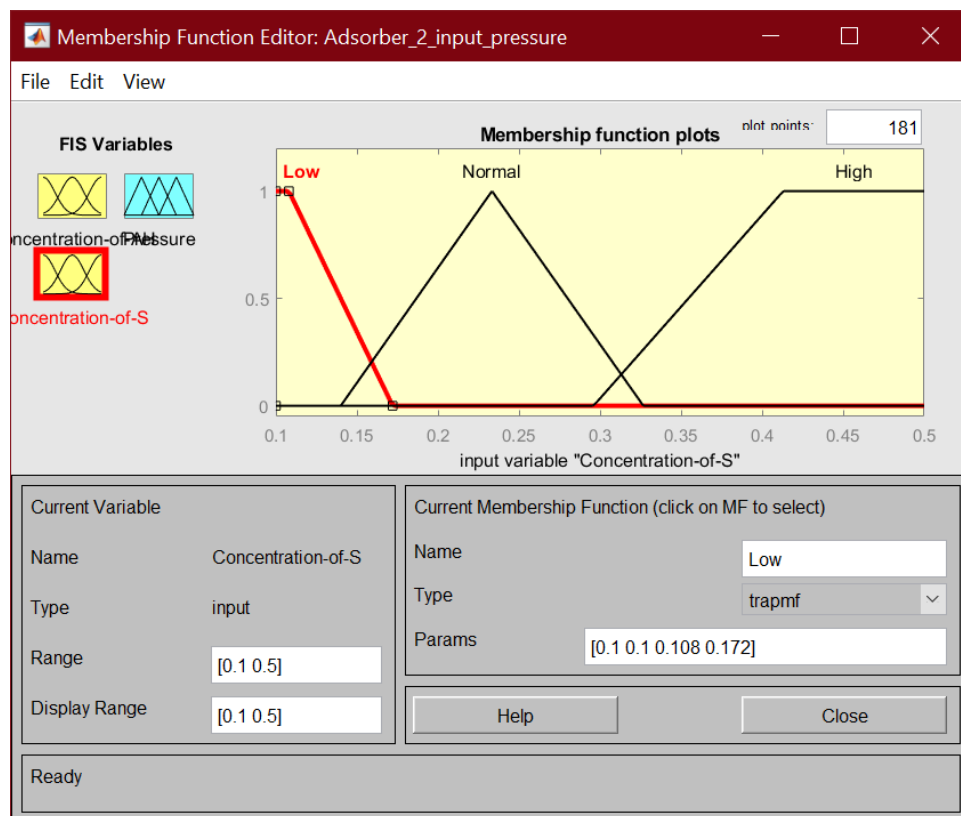


Рисунок 4.10 – Вікно редактора функцій належності для вхідної змінної
«Вміст S »

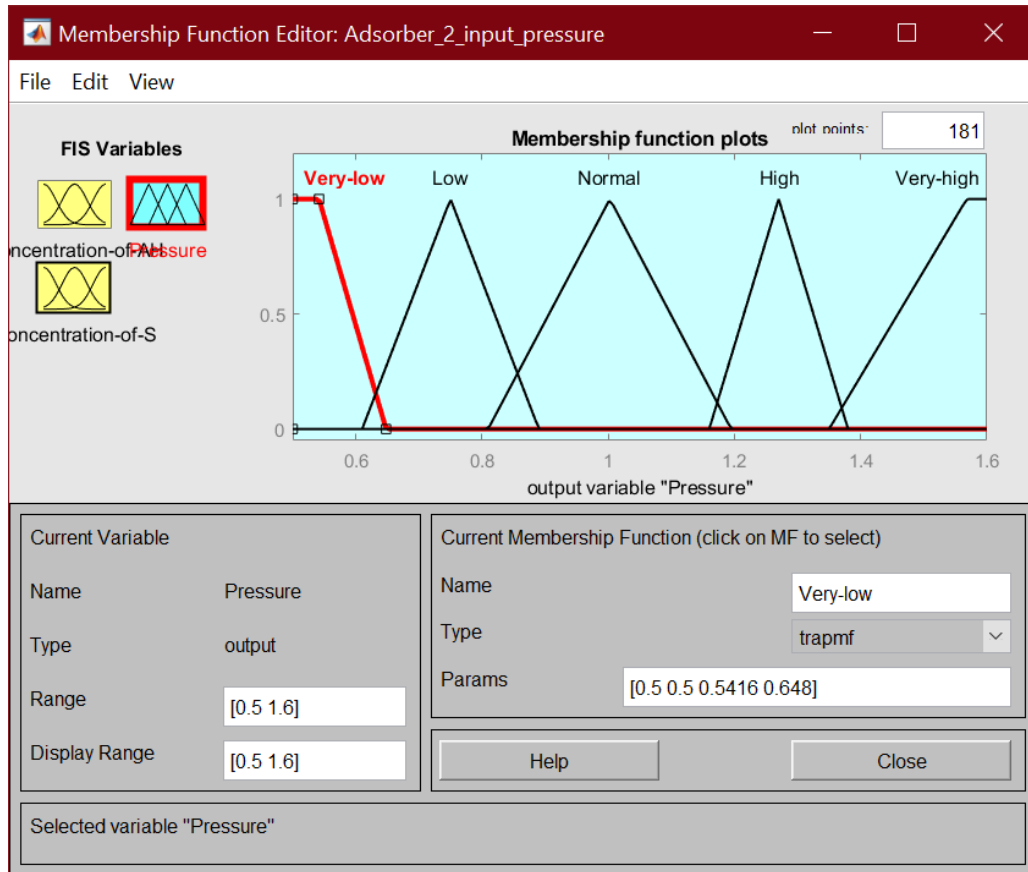


Рисунок 4.11 – Вікно редактора функцій належності для вихідної змінної «Тиск»

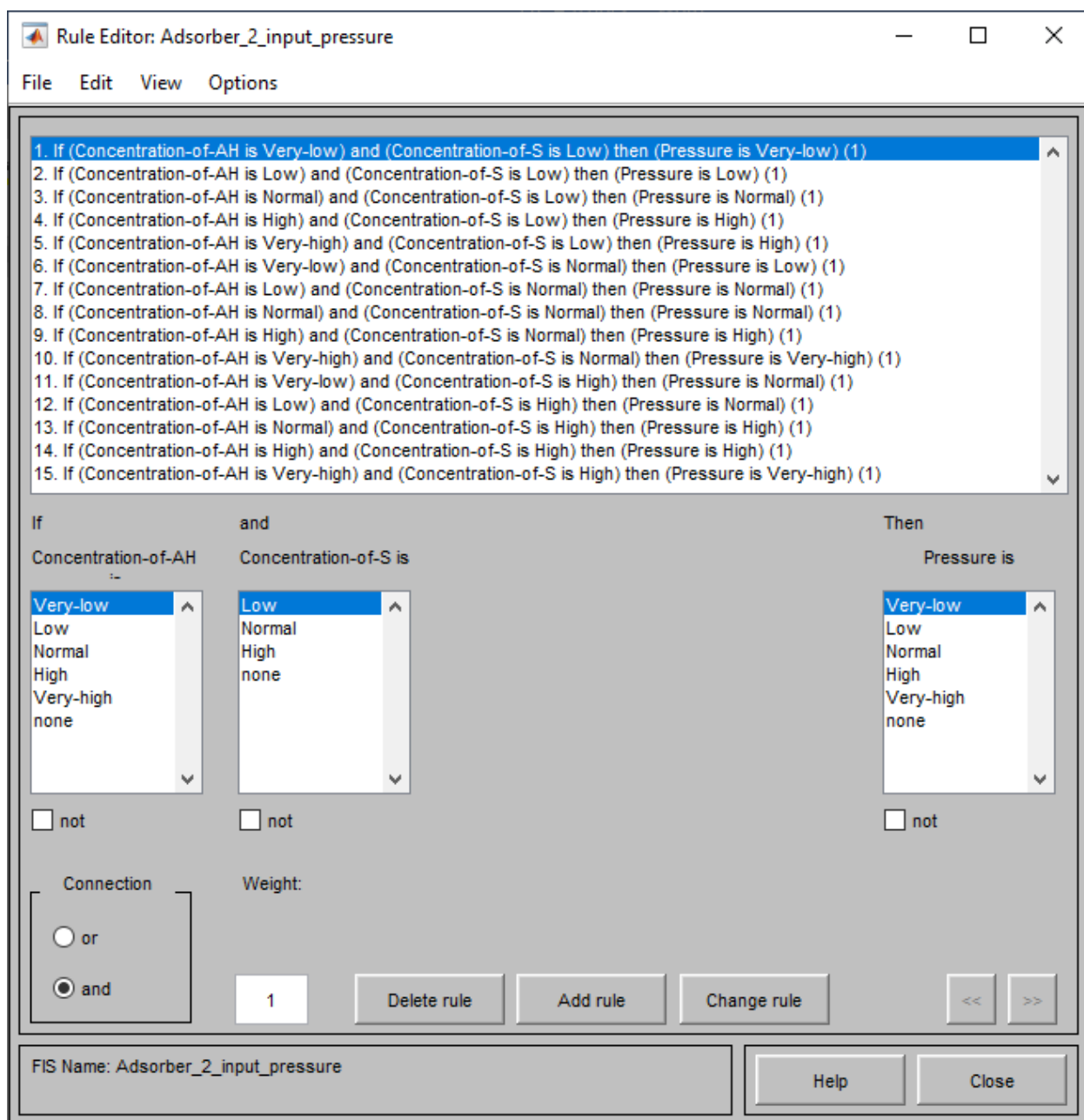


Рисунок 4.12 – Вікно редактора продукційних правил після їх визначення

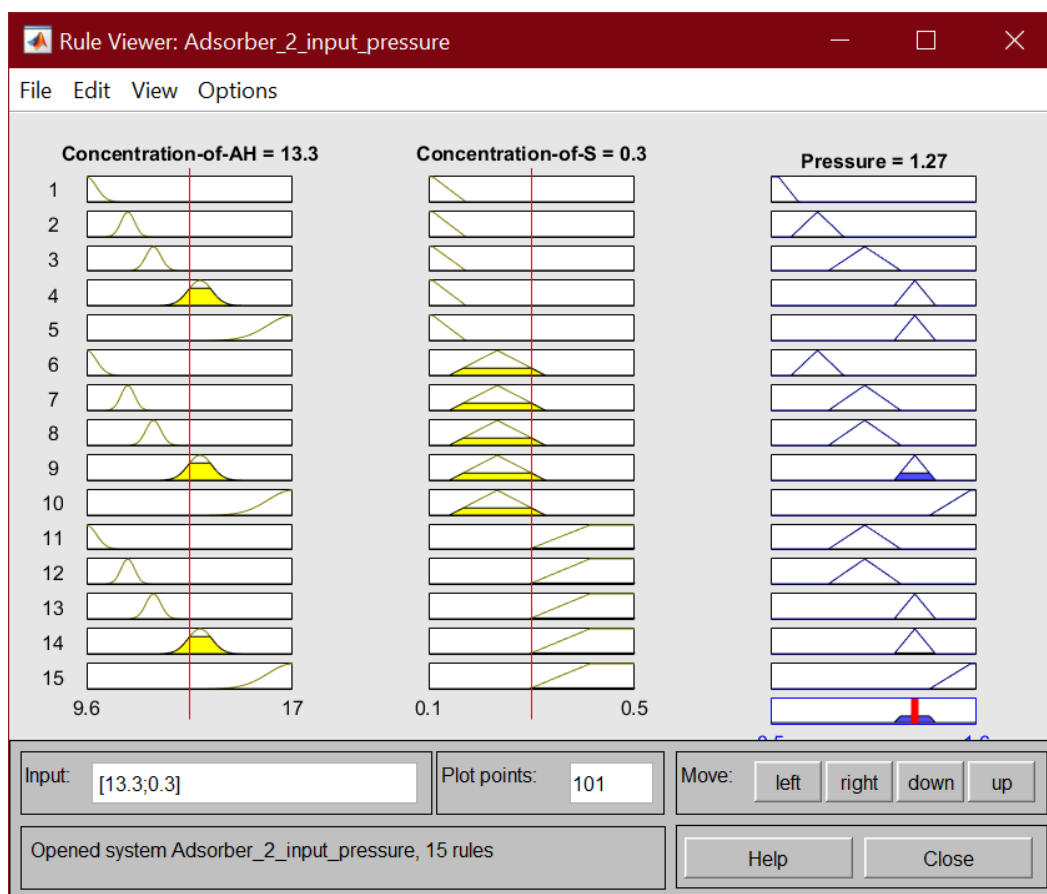


Рисунок 4.13 – Вікно перегляду результату використання продукційних правил

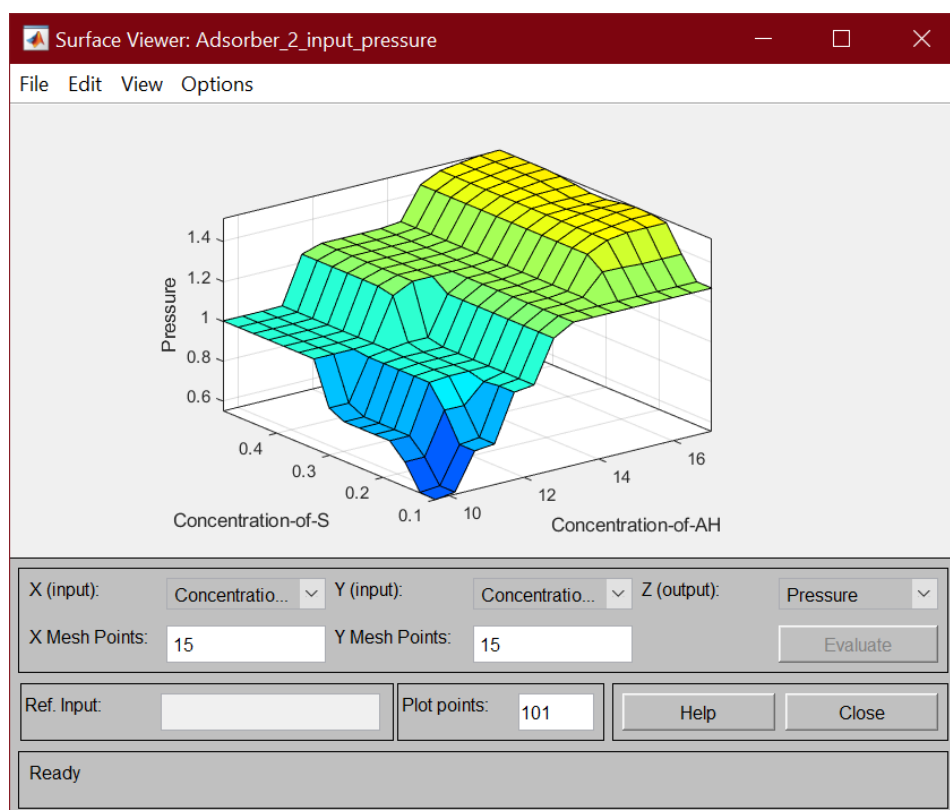


Рисунок 4.14 – Вікно перегляду поверхні нечіткого висновку

Розглянемо модель нечіткого висновку з трикутною формою функцій належності.

Наведемо редактор функцій належності для вхідної змінної «Вміст АН» (рисунки 4.15) з трикутною формою функції належності; перегляд результату використання продукційних правил (рисунки 4.16) та поверхні нечіткого висновку (рисунки 4.17).

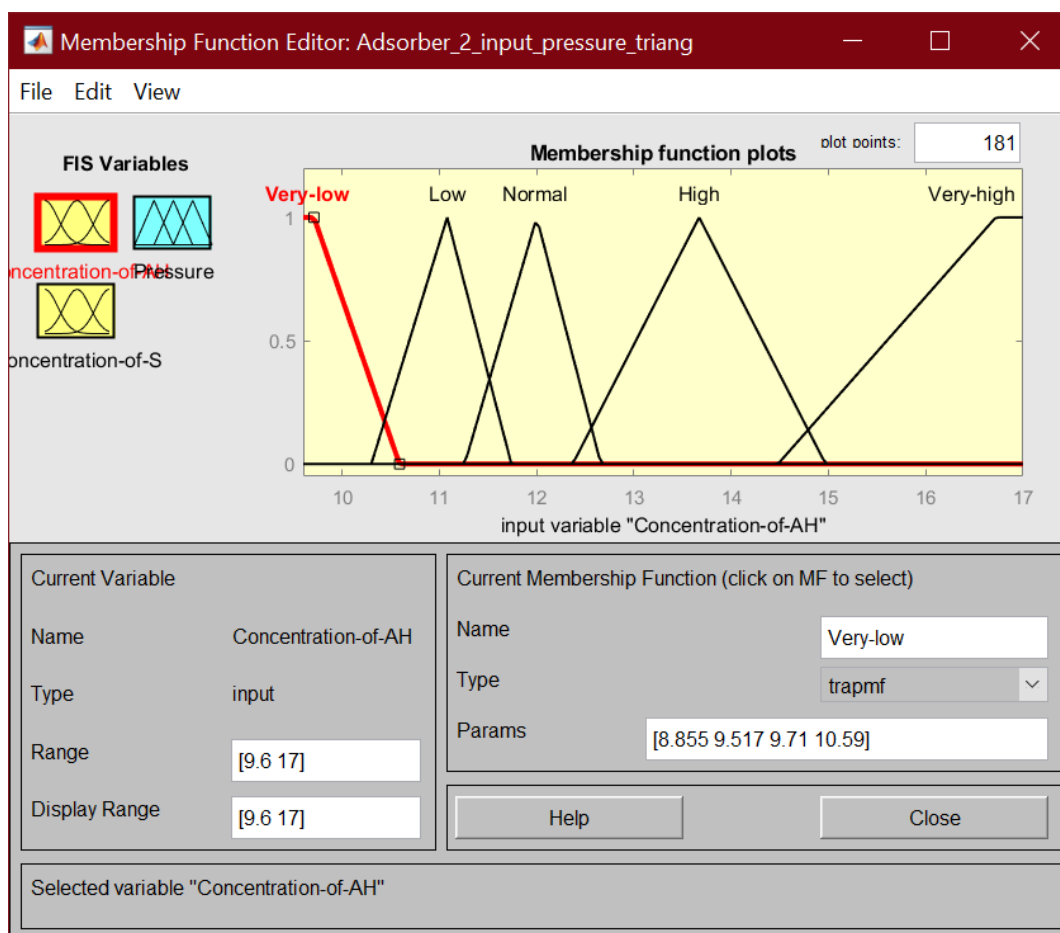


Рисунок 4.15 – Вікно редактора функцій належності для вхідної змінної «Вміст АН» з трикутною функцією належності

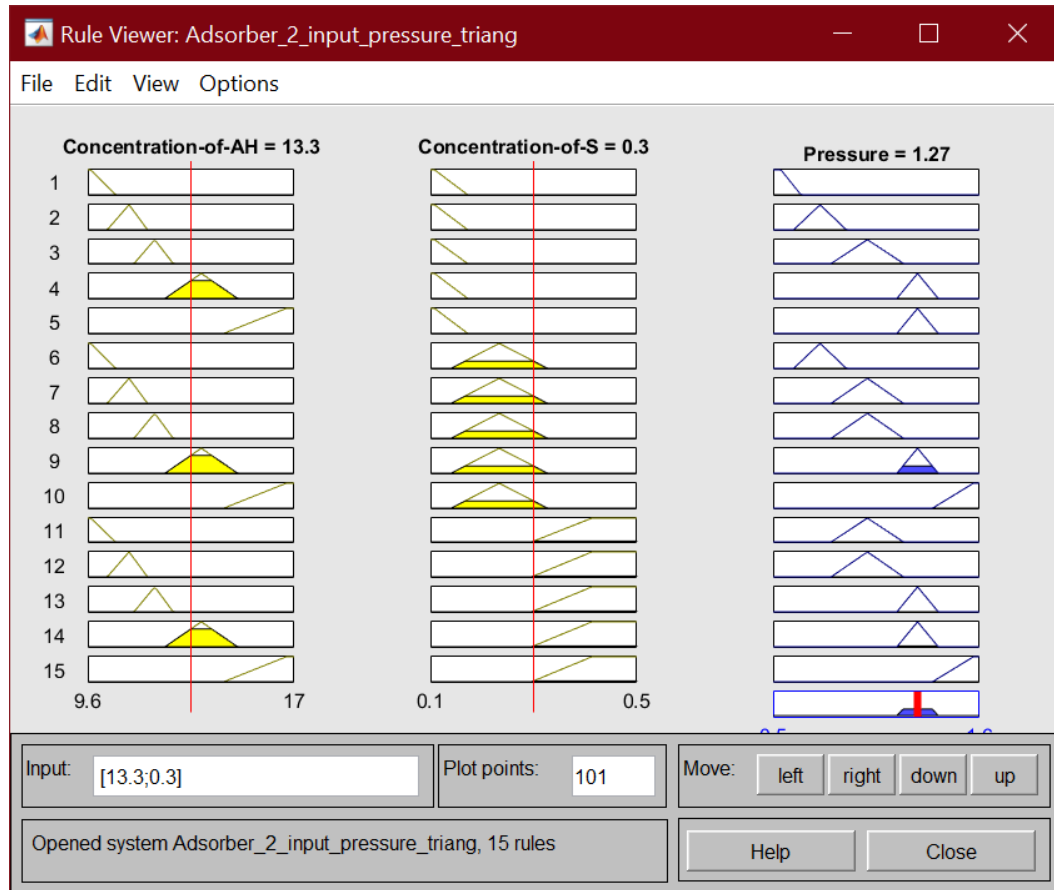


Рисунок 4.16 – Вікно перегляду результату використання продукційних правил з використанням трикутної форми функції належності для змінної «Вміст АН»

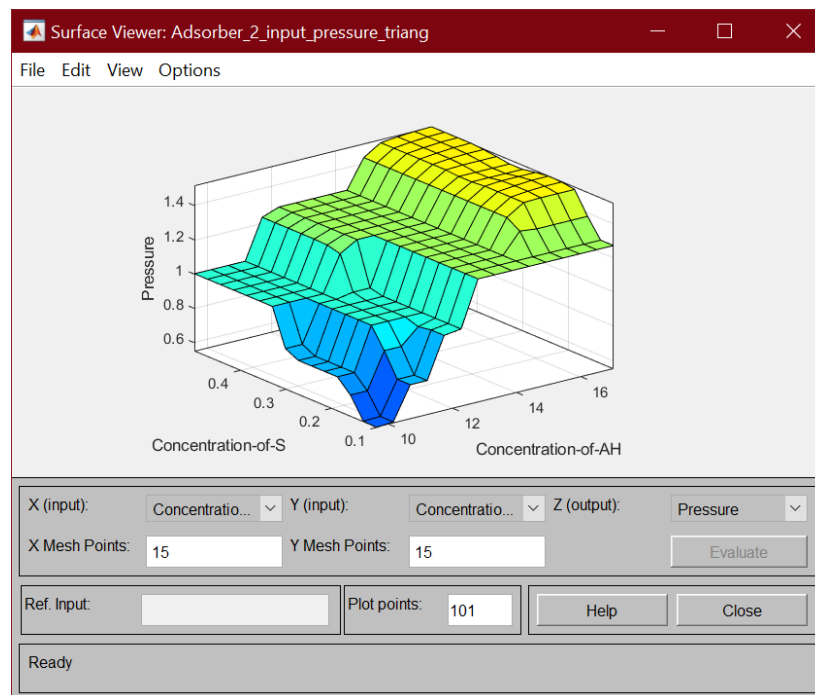


Рисунок 4.17 – Вікно перегляду поверхні нечіткого висновку трикутної форми функції належності для змінної «Вміст АН»

Розглянемо модель нечіткого висновку при зменшенні кількості термів для вхідної змінної «Вміст *АН*». Опишемо лінгвістичну змінну.

Низький

Лінгвістична змінна: $\langle \text{Вміст } АН; \text{ Нормальний}; 9,6 < Саh < 17 \rangle$

Високий

Продукційні правила керування для системи «вміст ароматичних вуглеводнів та сірки – тиск в адсорбері» в такому випадку:

- ЯКЩО [Вміст *АН* «Низький» І Вміст *S* «Низький», ТО Тиск *Ad* «Малий»];
- ЯКЩО [Вміст *АН* «Нормальний» І Вміст *S* «Низький», ТО Тиск *Ad* «Нормальний»];
- ЯКЩО [Вміст *АН* «Високий» І Вміст *S* «Низький», ТО Тиск *Ad* «Високий»];
- ЯКЩО [Вміст *АН* «Низький» І Вміст *S* «Нормальний», ТО Тиск *Ad* «Нормальний»];
- ЯКЩО [Вміст *АН* «Нормальний» І Вміст *S* «Нормальний», ТО Тиск *Ad* «Нормальний»];
- ЯКЩО [Вміст *АН* «Високий» І Вміст *S* «Нормальний», ТО Тиск *Ad* «Високий»];
- ЯКЩО [Вміст *АН* «Низький» І Вміст *S* «Високий», ТО Тиск *Ad* «Нормальний»];
- ЯКЩО [Вміст *АН* «Нормальний» І Вміст *S* «Високий», ТО Тиск *Ad* «Високий»];
- ЯКЩО [Вміст *АН* «Високий» І Вміст *S* «Високий», ТО Тиск *Ad* «Високий»].

Результати реалізації нечіткої системи «вміст ароматичних вуглеводнів та сірки – тиск в адсорбері» засобами програми *MATLAB* при зміні кількості термів подано у вигляді вікон такого виду: редактор функцій належності для вхідної змінної «Вміст *АН*» (рисунок 4.18); редактор продукційних правил після їх визначення (рисунок 4.19); перегляд результату використання продукційних правил (рисунок 4.20) та поверхні нечіткого висновку (рисунок 4.21).

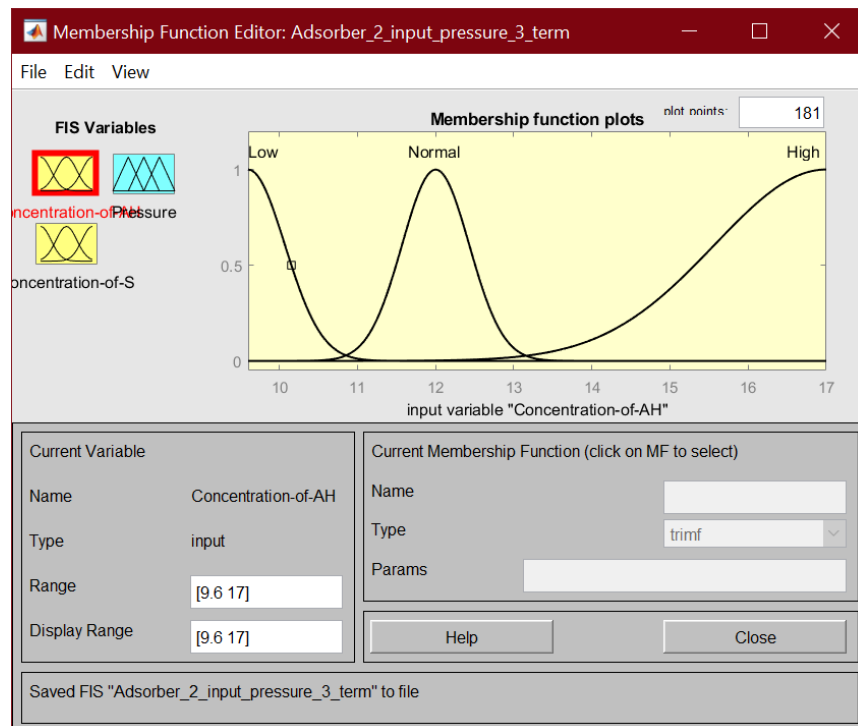


Рисунок 4.18 – Вікно редактора функцій належності для вхідної змінної
«Вміст АН» при зміні кількості термів

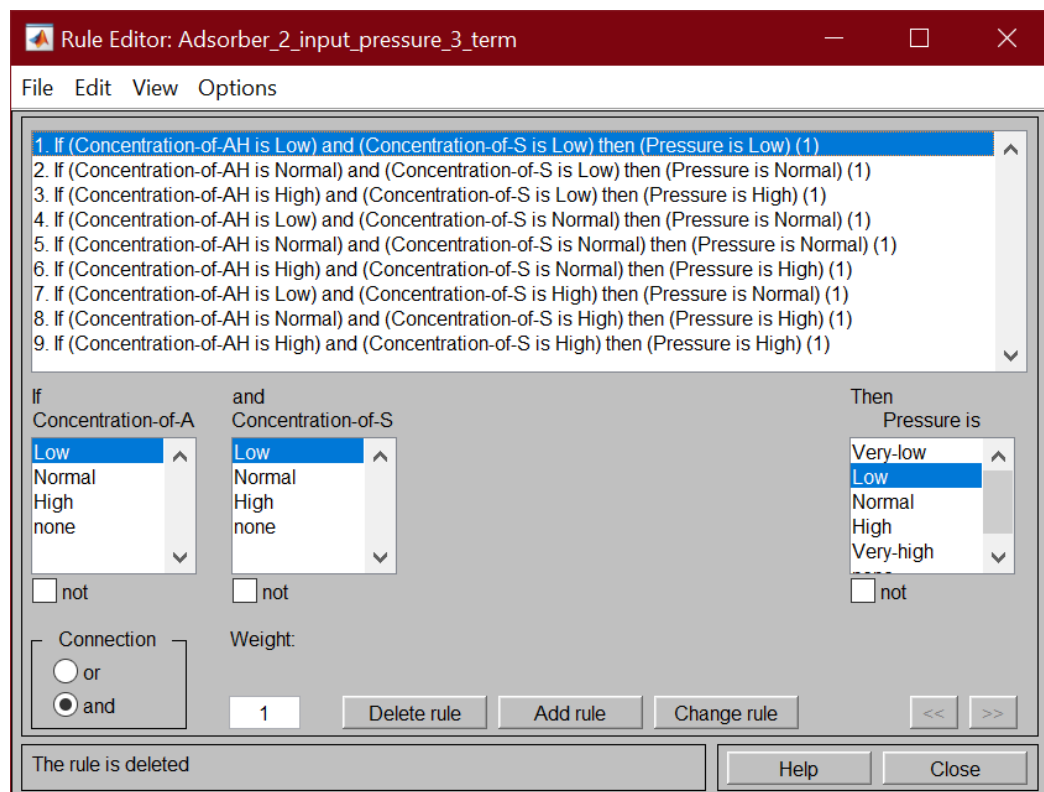


Рисунок 4.19 – Вікно редактора продукційних правил після їх визначення при
зміні кількості термів

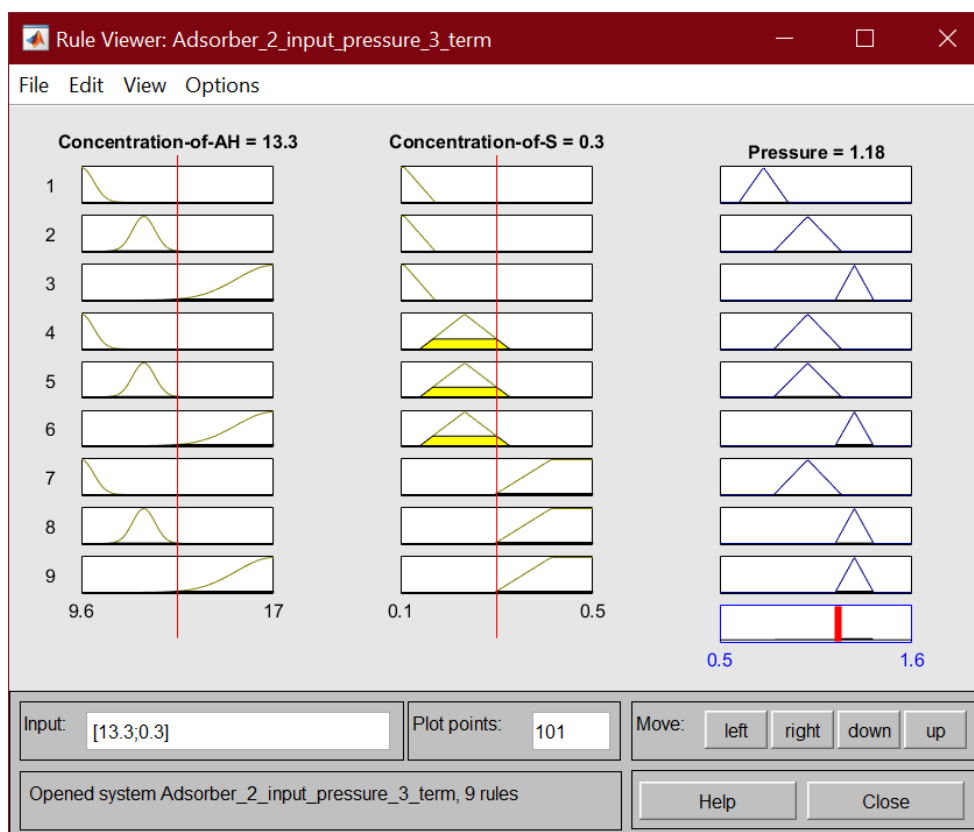


Рисунок 4.20 – Вікно перегляду результату використання продукційних правил при зміні кількості термів

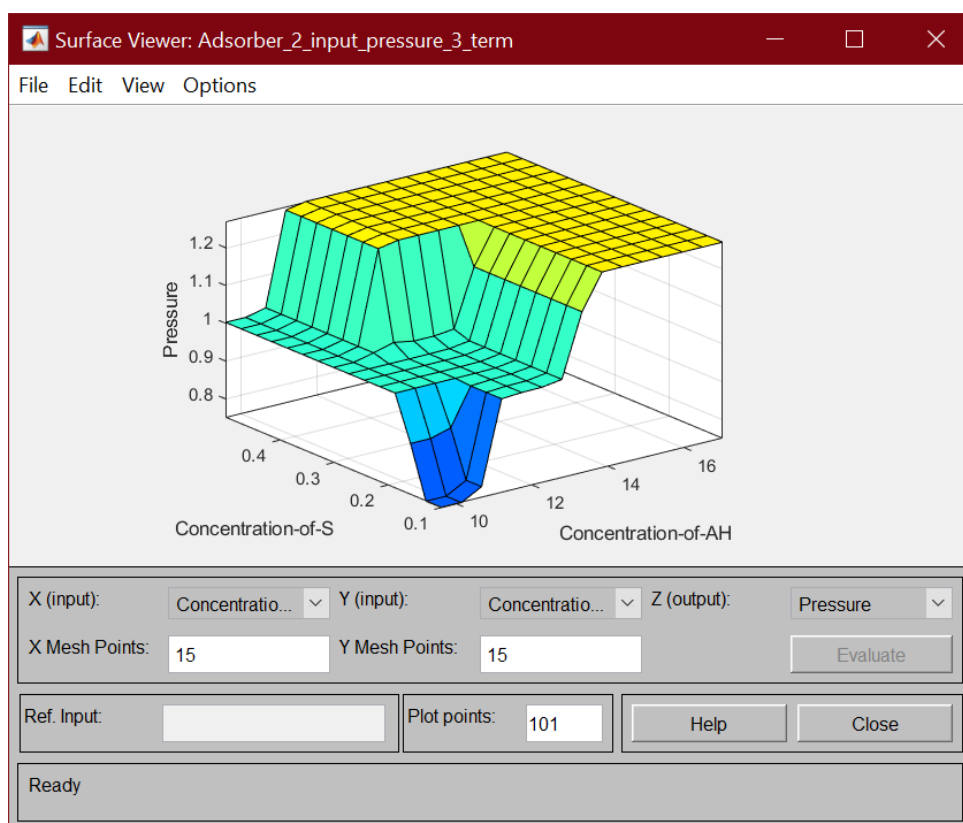


Рисунок 4.21 – Вікно перегляду поверхні нечіткого висновку при зміні кількості термів

Як видно з рисунків 4.13, 4.16 і 4.20, зміна форми функції належності не впливає на роботу нечіткої системи керування. Зміна кількості термів призводить до різних рекомендацій нечіткої системи керування. Так, для системи з меншою кількістю термів для вхідної змінної «Вміст АН» рекомендація стосовно витрати адсорбенту є меншою.

Висновки до розділу 4

У розділі 4 досліджено особливості перебігу процесів адсорбційного очищення, пов'язані з наявністю та типом трендів характеристик матеріальних потоків та конструктивних елементів адсорбера.

Дослідження дало такі результати.

1) З'ясовано, що за часом виникнення та характером прояву в режимі «Стала сировина» можна виділити три джерела нестаціонарності процесу; визначено їх характер.

2) Створено систему адаптивного керування тиском і температурою в адсорбері на основі поточної ідентифікації моделі динаміки процесу з корегуванням початкових значень цих режимних параметрів за концентраціями ароматичних вуглеводнів, сірки і смол у продукції. Уточнені режимні параметри та властивості поточної сировини заносять у базу даних.

3) Запропоновано коригувати уставки регуляторів режимних параметрів за концентраціями ароматичних вуглеводнів, сірки і смол у продукції за допомогою нечіткої логіки.

4) Досліджено вплив різних форм функцій належності та кількості термів на рекомендації нечіткої системи; виявлено, що для розглянутих процесів кількість термів на відміну від форм функцій більшою мірою змінює рекомендації про значення режимних параметрів.

5 ІНТЕГРОВАНЕ КЕРУВАННЯ АДСОРБЦІЙНИМ ОЧИЩЕННЯМ

Новизна промислових виробництв з неперервним адсорбційним очищенням відпрацьованих олив та мастил і суттєва складність відповідних процесів затримують впровадження систем їх автоматизації. Описані у розділах 2 та 4 способи та системи керування потребують логічного інтегрування в більш широку за функціями інтегровану систему, яка дозволить приділяти увагу аварійним режимам, модернізації початкових алгоритмів керування та інноваціям щодо напрямків розвитку стратегій керування. Можливості сучасних комп'ютерних засобів та перспективи їх розвитку дають можливість залучати емпіричні знання фахівців для таких завдань.

Розглянемо приклади формування інтегрованої системи для адсорбційного очищення ВОМ.

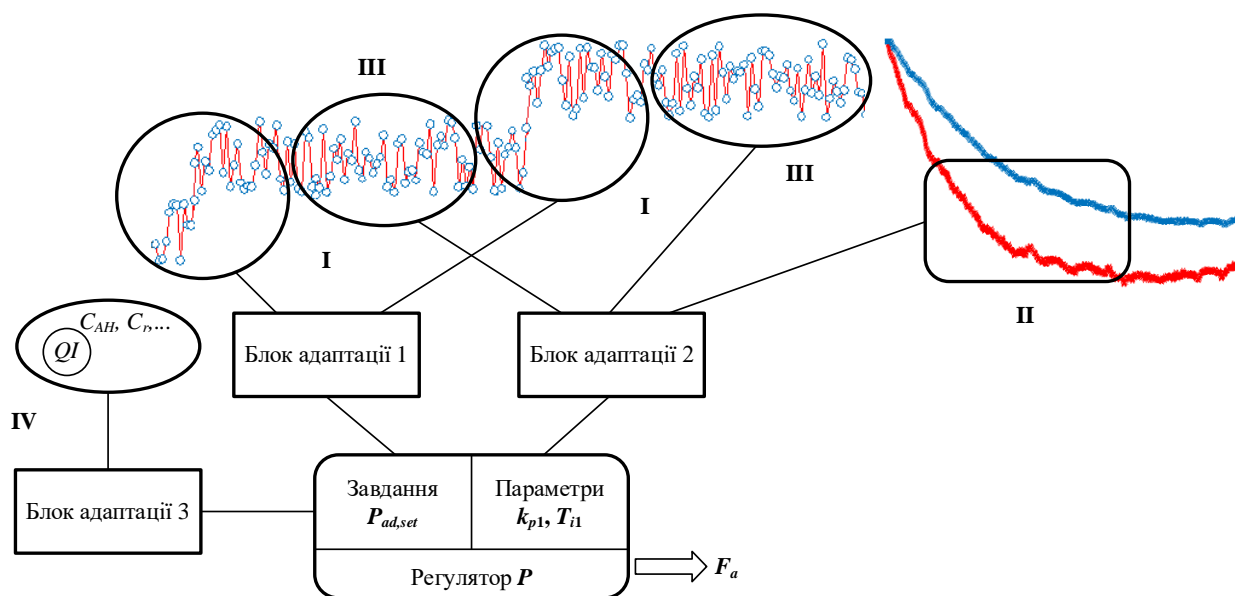
5.1 Синтез систем керування в режимах змінної та сталої сировини

Наведений у розділах 2 і 4 матеріал є підґрунтям для формування узгодженого керування процесами обох режимів – «Зміна сировини» і «Стала сировина». Оскільки в основу класифікації типу режиму покладено динаміку зміни властивостей сировини ТС, то продемонструємо відповідність між типом нестаціонарності концентрації певного забруднювача та дією з боку системи керування, а саме з боку певного блоку адаптації. На рисунку 5.1 наведено схему зв'язків між конкретним типом нестаціонарності і блоками адаптації.

З рисунка 5.1 видно, що в системі керування тиском передбачено три блоки адаптації.

Блок адаптації 1 (БА1), пов'язаний з типом I, діє в режимі «Зміна сировини». На час надходження нової сировини регулятор АСК тиску в адсорбері має завдання (уставку), $P_{ad,set}$ яка відповідає тиску для попередньої сировини. Невідповідність тисків викличе погіршення умов адсорбції для

нової сировини. Отже, це джерело нестаціонарності викликає необхідність завчасного корегування $P_{ad,set}$. Описаний в [34] алгоритм роботи БА1 системи керування базується на застосуванні уставки $P_{ad,set}$, що мала місце раніше при очищенні сировин, які за хімічним складом були близькі (але не тотожні) до нової сировини. Цей алгоритм передбачає пошук аналогів нової партії сировини у спеціально створеній базі даних.



I – IV – типи нестаціонарності

Рисунок 5.1 – Схема зв'язків між конкретною нестаціонарністю і задачами адаптації

Однак ефективний з точки зору швидкості визначення уставки, цей алгоритм має недолік, а саме, він стосується лише аналогів, а не саме нової сировини. Тому $P_{ad,set}$ потребує уточнення (див. опис до БА3).

Під час роботи БА1 треба припинити корегування $P_{ad,set}$ за результатами вимірювання властивостей очищеної речовини (рафінату).

Блок адаптації 2 (БА2) діє в режимі «*Стала сировина*» (типи II та III). Його призначення – поточна ідентифікація динамічних властивостей адсорбційного очищення як ТОК та наступне корегування параметрів регулятора k_{p1} , T_{i1} .

Блок адаптації 3 (БА3) діє в режимі «*Стала сировина*» (тип IV). Блок призначений для уточнення отриманої в БА1 уставки $P_{ad,set}$ (на основі аналогів), яке відбувається шляхом поновлення корегувальних впливів на регулятор від вимірювачів показників якості очищеного продукту. Тільки після цього у БД вносять новим окремим записом дані про властивості нової сировини та відповідний $P_{ad,set}$ ($RM - P_{ad,set}$).

Враховуючи, що отримання аналітичної математичної залежності $P_{ad,set} = \psi(RM)$ ускладнене з об'єктивних виробничих причин, то для корегування $P_{ad,set}$ у БА3 пропонується використати нечіткі моделі й *fuzzy logic*.

Тобто, БА1 та БА3 треба реалізовувати не одночасно.

З рисунка 5.1 зрозуміло, що БА1 і БА3 призначені для корегування уставки, а БА2 – параметрів налаштування ПІ-регулятора.

Враховуючи об'єктивну причину певної періодичності зміни режимів адсорбційного очищення, система автоматизації повинна забезпечити відповідну логіку алгоритму керування. Рисунок 5.2 ілюструє потрібну черговість активації/деактивації блоків адаптації при функціонуванні виробництва, яка забезпечить дотримання цієї логіки.

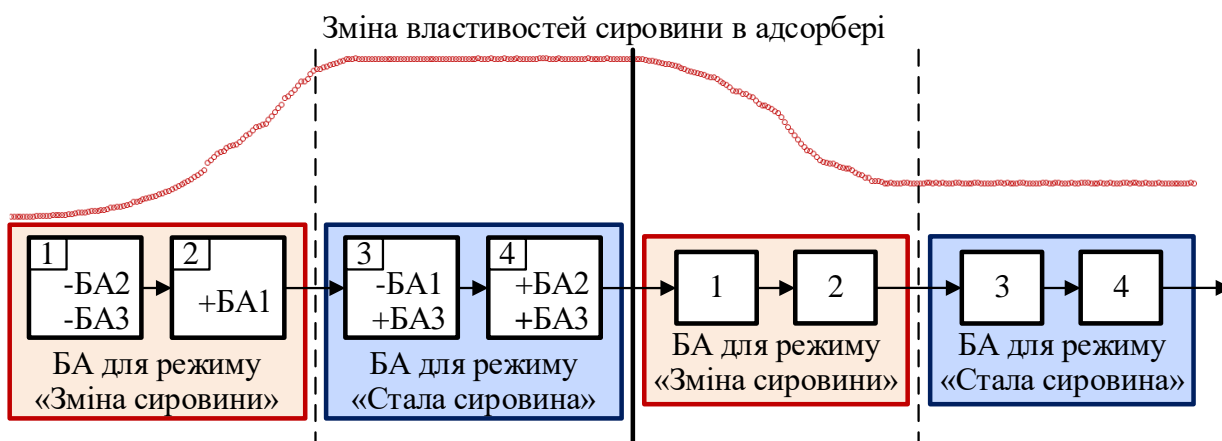
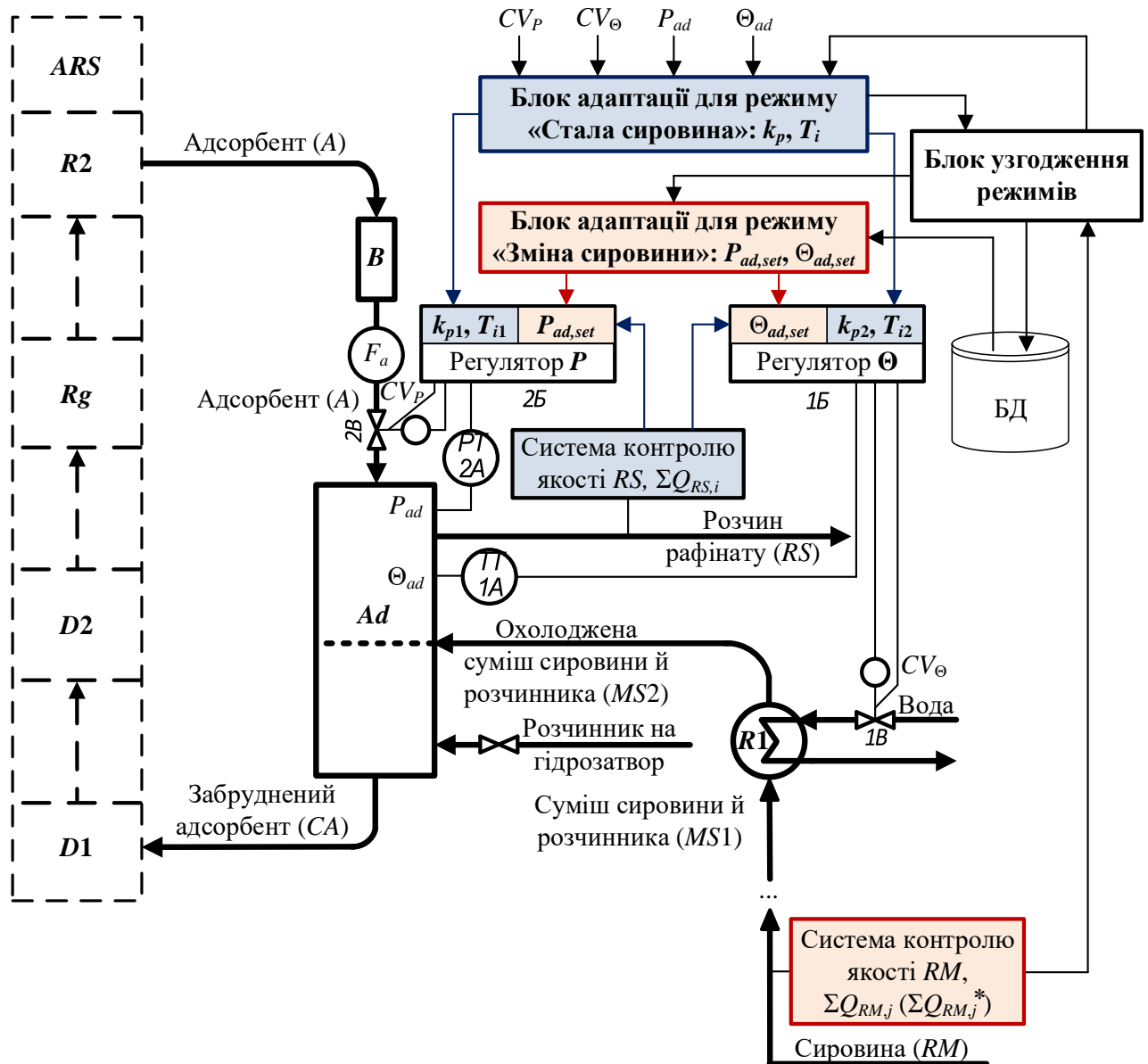


Рисунок 5.2 – Схема відповідності робочих циклів очищення партій сировини й активування блоків адаптації

На рисунку 5.3 блоки БА2 і БА3 об'єднані в один узагальнювальний «Блок адаптації для режиму «Стала сировина», БА1 для однотипності

термінології отримав назву «Блок адаптації для режиму «Зміна сировини»». Рисунок 5.3 дозволяє усвідомити необхідні інформаційні зв'язки в системи автоматизації, що зменшать час та значення відхилення від заданих властивостей рафінату впродовж неперервної експлуатації обладнання.



$Q_{RM,j}$, $Q_{RM,j}^*$ - j -і показники якості RM у режимах «Стала сировина» і «Зміна сировини» відповідно; $Q_{RS,i}$ - i -і показники якості RS ; ARS – відділення відновлення адсорбенту; $D1$, $D2$, Rg , $R2$ – десорбція, висушування, регенерація та охолодження адсорбенту відповідно; CV_P , CV_Θ – ступінь відкриття клапанів регулювання тиску і температури відповідно

Рисунок 5.3 – Фрагмент схеми автоматизації адсорбційного відділення

При виборі типу адаптивної АСК для режиму «Стала сировина» потрібно прийняти до уваги особливості функціонування ТОК, властивості інформаційних потоків та можливості існуючих ТЗА.

Зазначені аспекти пов'язані, зазвичай, з неповнотою апріорної та поточної інформації стосовно:

- а) зовнішніх впливів (як корисних, так і збурювальних);
- б) виду (для поточної ідентифікації – параметрів) моделей ТОК;
- в) сукупності п.а та п.б.

З опису технології та аналізу джерел нестаціонарностей, притаманних описаному виробництву, зрозуміло, що необхідність адаптування відповідає п. в.

5.2 Експертна система для запобігання аварійних ситуацій при очищенні олив і мастил

Всі автоматизовані комплекси по регенерації олив або мастил можуть знаходитися як у стані нормальної експлуатації, так і в аварійному або передаварійному станах. До двох останніх віднесемо, зокрема, невідповідність показників якості рафінату та наднормоване виділення в довкілля шкідливих речовин (до них належать вибухонебезпечні та отруйні, серед яких також є канцерогенні) [66]. Створення алгоритмічних та програмних засобів діагностування причин аварійних ситуацій та запобігання їм є актуальною задачею. Експертні системи, які вдало використовують в автоматизованих системах керування для нетривіальних ситуацій, будуть корисними і для розв'язування зазначених задач. Основною складністю при розробленні цих систем є отримання та формалізація знань експертів.

Проблемам і задачам створення ЕС присвячено численні дослідження.

У випадку адсорбційного очищення олив або мастил необхідно забезпечити не лише раціональне використання ресурсів, але й, з огляду на

специфіку даного виробництва, звести до мінімуму ймовірність виникнення аварійних ситуацій та скоротити час на відновлення виробництва.

З огляду на особливості процесу адсорбційного очищення ВОРМ, описані в розділі 1, зокрема, шкідливість ВОРМ, вартість цих речовин й адсорбенту, а також витрати на їх очищення, існує необхідність створення бази знань для ЕС, призначеної для діагностування причин та прогнозування наслідків аварійних ситуацій при адсорбційному очищенні олив та мастил [28].

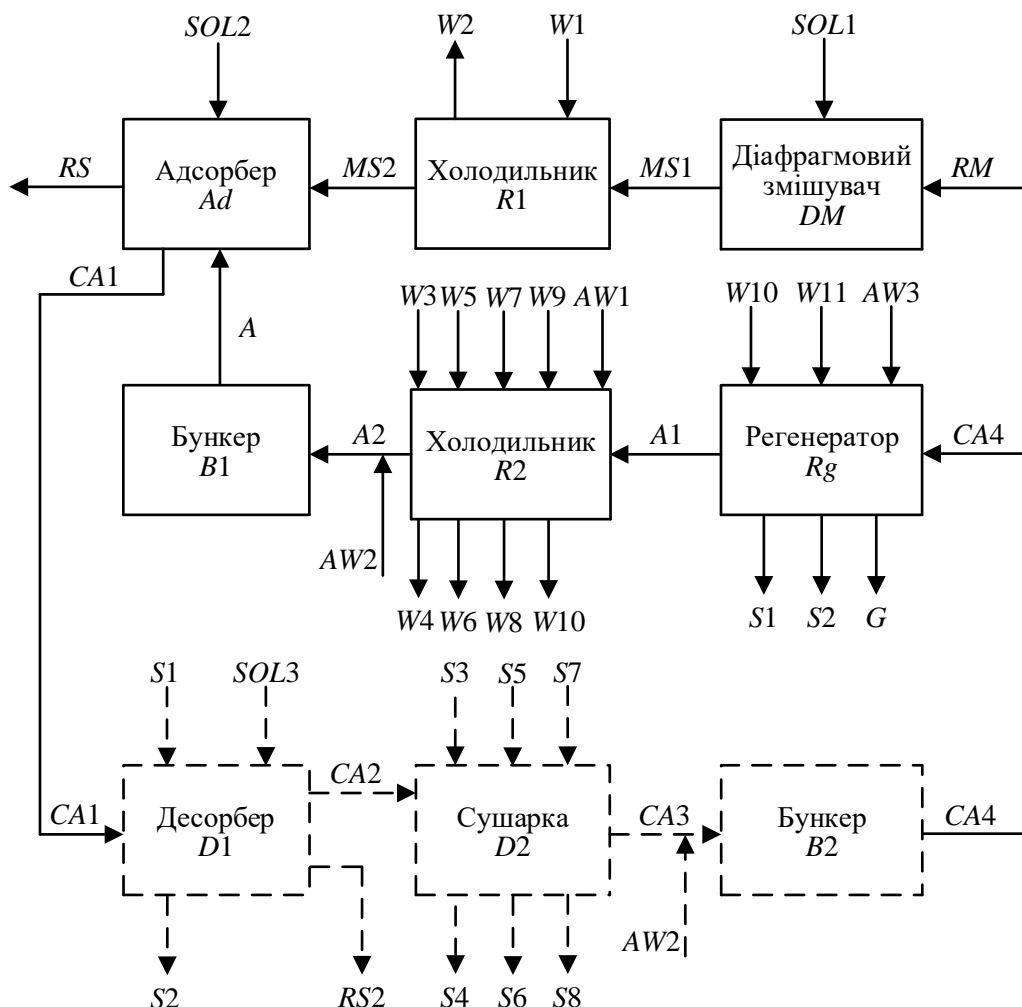
Розглянемо ту частину виробництва, яка відображає процеси підготовки забрудненої сировини, адсорбцію (безпосередньо очищення оливи або мастила) та відновлення адсорбенту. На рисунку 5.4 наведено відповідну структурно-параметричну схему, яка базуючись на рисунку 3.2, розширює її на відділення відновлення адсорбенту.

Як випливає з опису виробництва, наведеного у п. 1.1.1, складність апаратів та значна кількість матеріальних потоків пояснюють суттєву кількість факторів впливу на цю технологічну систему, які можуть стати причинами виникнення аварійних ситуацій. Сприяти цьому можуть, зокрема, вихід з ладу ТЗА чи неспроможність операторів або автоматики утримати режимні параметри у припустимих межах. Відмова ТЗА призведе до сприйняття хибних значень технологічних змінних як правдивих. У результаті описаних причин можливими стануть ситуації виходу значень технологічних змінних за припустимі границі, тобто порушення нормального режиму і перехід в аварійний (чи передаварійний) режим. Скоротити тривалість порушення дозволяють досвід фахівців цього виробництва, який дасть значний ефект, якщо буде реалізований програмно, зокрема як експертна система.

Опишемо необхідні етапи [28] створення ЕС у застосуванні до технологічної системи очищення олив та мастил, наведеної на рисунку 5.4.

Етап ідентифікації. Метою застосування ЕС, як зазначено вище, є діагностування причин та прогнозування наслідків аварійних ситуацій у процесі адсорбційного очищення олив та мастил. Створення такої експертної

системи, з огляду на багатofакторність процесу, вимагає значних зусиль для їх визначення та опису.



CA4 – адсорбент зі смолами та іншими домішками; AW3 – гаряче повітря;
W3, W4 – вода на вході та виході з регенератора R_g відповідно; S1, S2 – пара
на виході зі змішувачів регенератора; G – газ на допал на виході з
регенератора

Рисунок 5.4 – Структурно-параметрична схема процесів підготовки сировини, адсорбції та відновлення адсорбенту

Етап формалізації. База знань складається з фактів і правил [28]. Факти необхідні для опису ситуацій, які мають місце при порушеннях норм технологічного регламенту, а правила використовують як спосіб подання рекомендацій для усунення (запобігання) аварійних ситуацій. Зокрема, фактом

може бути вихід технологічної змінної (або співвідношення між значеннями змінних) за припустимий діапазон. Тому, для того, щоб сформувати базу знань, необхідно визначити факти, пов'язані зі всіма можливими аварійними ситуаціями.

Основними факторами, що впливають на процес адсорбційного очищення оливних та мастильних матеріалів є: температура процесу, властивості адсорбенту (фізико-хімічні, в тому числі структура частинок адсорбенту, ступінь його відновлення) та сировини (вміст важких ароматичних вуглеводнів, смол та сірчистих з'єднань).

Розглянемо процес з точки зору визначення набору фактів аварійності, пов'язаних з властивостями речовин.

Для забезпечення мінімальної концентрації вищевказаних небажаних речовин в оливі або мастилі, а також досягнення високих техніко-економічних показників виробництва, адсорбент повинен мати такі властивості:

1) високу стабільність – здатність зберігати достатньо високу активність після багаторазової регенерації (з цього виникають факти, пов'язані з поганою якістю продукції, в тому числі «Вміст ароматичних вуглеводнів $> 17\%$ », «Вміст сірки $> 0,5\%$ », «Вміст смол $> 3\%$ »);

2) високу механічну міцність на стискання та зношування: адсорбенти не повинні кришитися і розбухати при насиченні водою, оскільки в іншому випадку виникає різке збільшення перепаду тиску в системі (з цього виникають, зокрема, такі факти як «Вологовміст адсорбенту $> \omega_1$ », «Вологовміст адсорбенту $< \omega_2$ », де ω_1 , ω_2 – значення вологовмісту, які залежать від типу і властивостей адсорбенту);

3) адсорбент повинен володіти не тільки високою здатністю поглинання, а й мати високу швидкість адсорбції, що дозволяє пропускати сировину з високою швидкістю і, отже, використовувати невеликі компактні установки (з цього виникають, у тому числі, такі факти як «Швидкість адсорбції $> S_1$ », «Швидкість адсорбції $< S_2$ » де S_1 , S_2 – параметри, що залежать від властивостей адсорбенту).

Для підвищення ефективності процесу очищення олив і мастил необхідно також підтримувати задану температуру адсорбції зміною витрати води в холодильнику та регулювати перепад тиску в адсорбері в нижній і верхній частинах колони витратою адсорбенту.

Оскільки основними джерелами інформації для ЕС є спеціалісти відповідної галузі діяльності та публікації, то сама ця інформація може перебувати у вигляді текстів, графіків, формул і міркувань під час опитування. Для використання у програмному засобі, яким є ЕС, треба розробити форми, в які вкладати отриману інформацію. Для того, щоб не втрачати інформацію та легко її перевіряти на достовірність, несуперечливість і повноту, автори пропонують використати таблиці, стовпцями яких будуть атрибути кожної властивості кожного матеріального потоку речовин усередині кожного апарату та потрібних співвідношень між властивостями потоків (якщо це буде вказано фахівцями).

Для побудови ланцюгів залежних фактів аварійних ситуацій доцільно об'єднати ці факти у продукційні правила «Якщо стався факт А, то станеться факт Б». Цьому сприяє введення атрибуту «Наслідок порушення А».

При діагностуванні причин порушень для оперативного персоналу стають у нагоді також відомості про апріорні ймовірності появи порушення. Такі ймовірності можуть бути надані з виробничої документації про аварії, а також оціночно – фахівцями (на основі власного досвіду). Ймовірності пов'язують факти – порушення з фактами – причинами порушення та фактами – наслідками порушення.

Судячи з переліку інформації, яка буде потрібна при розробці ЕС діагностувального типу для виробничих процесів, можна зробити висновок, що кінцеву базу знань доцільно подати в табличному вигляді, тобто описати кожну технологічну змінну за одним і тим самим переліком атрибутів [36]. Тоді будь-яка форма подання первинної інформації буде трансформована в

задану структуру даних, порожні поля атрибутів підкажуть, які дані ще треба з'ясовувати.

При створенні таблиці треба дбати про те, щоб жодна інформація не була втрачена і не відбувалося плутанини з властивостями речовин (матеріальних потоків чи середовищ усередині апаратів), які мають однакову назву, але належать різним етапам виробництва (наприклад, адсорбент знаходиться у різних частинах процесу очищення). Обов'язково в таблицю вводять дані про властивості речовин, зазначені в нормативних документах.

Для цього серед атрибутів доцільно вказувати так звані координати джерела інформації – наводити ідентифікатори кожного апарату (при потребі місця отримання даних усередині апарату) та ідентифікатори апаратів, між яким рухається матеріальний потік.

Для відбору властивостей речовин, за якими слід спостерігати як за «прапорцями» порушень, запропоновано в набір атрибутів вводити відомості про те, чи цю властивість наразі вимірюють автоматично (неперервно або періодично) або лабораторними методами.

Наведемо опис фрагменту такого способу подання інформації. Розглянемо технологічну змінну «вміст ароматичних вуглеводнів на виході з адсорбера». Позначимо її ідентифікатором C_{AH} , а відповідний матеріальний потік – RS (рисунок 5.4), визначимо місце входу потоку через попередній апарат (адсорбер Ad) та наступний (ємність), місце спостереження – трубопровід, одиниці вимірювання у відсотковому співвідношенні, спосіб вимірювання – автоматичний, періодичність – неперервний, припустимі границі – 9,6 – 17 %. Ця змінна є показником якості, пов'язані з ним показники – вміст смол C_r та сірчистих з'єднань C_s . Змінна C_{AH} може бути причиною аварії, ознакою якої є високий вміст AH . Таке порушення (аварія) може призвести до браку продукції, ймовірність якої наближається до 1. Схожий ланцюжок міркувань можна використати для кожної технологічної змінної.

До наслідків порушень, які можуть статися в системі підготовки сировини та адсорбції, належать, зокрема, брак продукції (визначений на етапі

ідентифікації), «захливання» адсорбера, нераціональне використання енергоресурсів у зв'язку з розузгодженістю навантаження апаратів, втрата сировини з суспензією тощо.

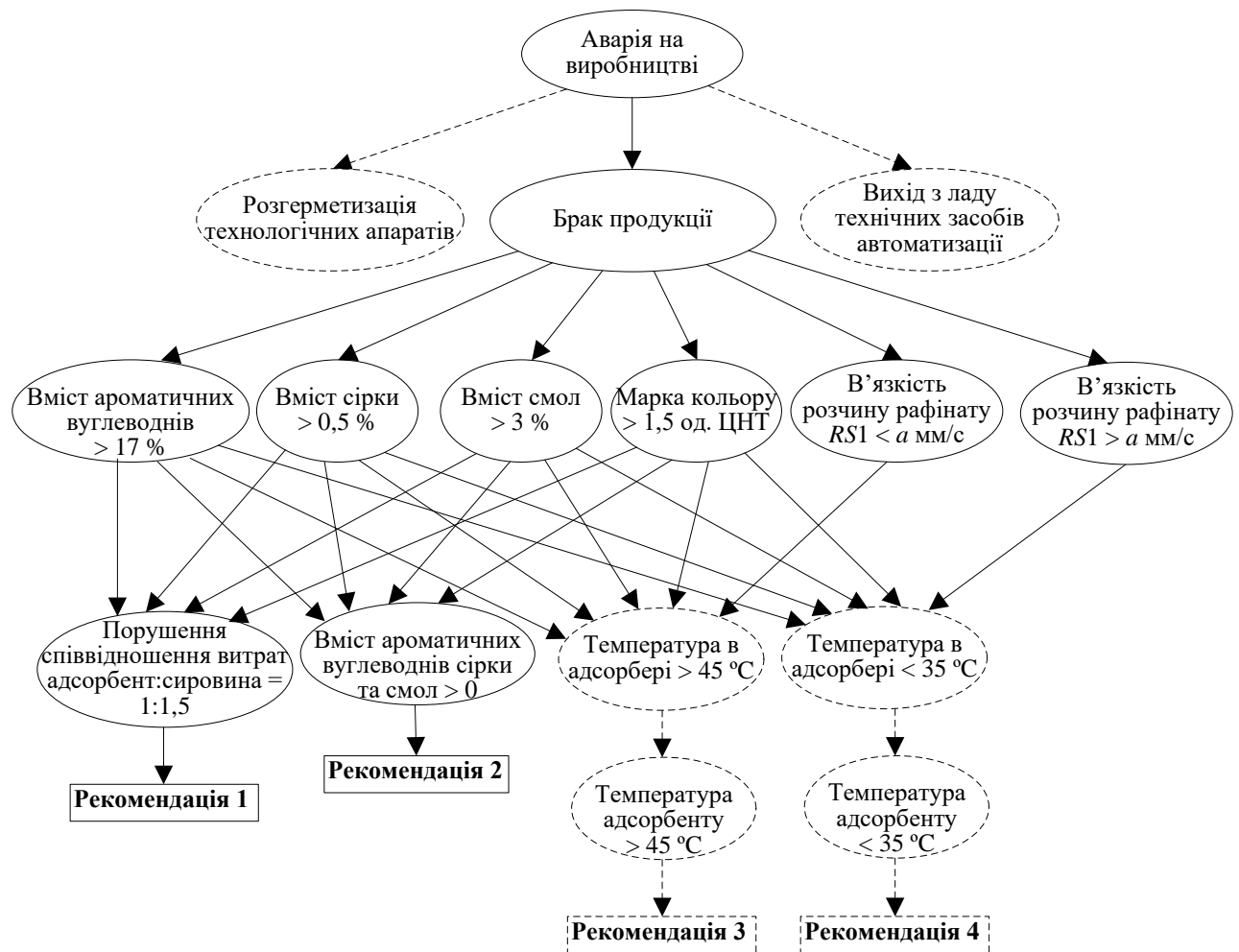
Інформацію, закладену в таблицю (Додаток В), треба перевірити та узгодити групою експертів. Табличну форму, як носій інформації, легко запрограмувати, але перевіряти незручно. Для уникнення ситуації, коли навіть група фахівців може недогледіти помилку, запропоновано подати інакше ту саму інформацію – у графічній формі.

На основі створеної бази знань побудовано семантичну мережу у вигляді графу аварійних ситуацій, які можуть виникнути під час очищення. Така мережа дозволяє діагностувати причину порушень і прогнозувати можливі майбутні аварії. Наведемо фрагмент графу на рисунку 5.5 та зробимо опис його роботи (пунктирними лініями позначено інші можливі аварійні ситуації).

Якщо використовувати мережу, просуваючись згори вниз, то дуги (зв'язки) між аваріями (фактами) мають значення «може бути викликана(ний)», спрощено – «викликана(ний)». Так, «Аварія на виробництві» **викликана** появою «Браку продукції». Він, у свою чергу, **викликаний** тим, що «Вміст ароматичних вуглеводнів/сірки/смола/марка кольору/в'язкість» вихідної продукції приймуть неприпустимі значення. І далі – «Вміст ароматичних вуглеводнів $> 17\%$ » **викликаний** внаслідок «Порушення співвідношення витрат адсорбенту й сировини 1:1,5». На цьому ж рівні ієрархії наведені й інші факти, що пов'язані з низькою якістю продукції (зокрема, «Температура в адсорбері $< 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ » через те, що «Температура адсорбенту $< 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ »). І, відповідно, до кожної аварійної ситуації надано рекомендації стосовно її усунення.

Якщо використовувати мережу, просуваючись схемою знизу нагору, то зв'язки мають значення «може призвести до», спрощено – «призведе до». Так, «Температура адсорбенту $> 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ » **призведе до** того, що «Температура в адсорбері $> 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ », і, відповідно, у вихідному продукті вміст ароматичних

вуглеводнів/сірки/смола/марка кольору можуть перевищити припустимі значення, що, у свою чергу, призведе до браку продукції та, в результаті, до аварії на виробництві.



a – параметр, який залежить від типу (властивостей) сировини, яку очищують; ЦНТ – колір темних нафтопродуктів

Рисунок 5.5 – Елемент графу аварійних ситуацій в адсорбері

На основі семантичної мережі створено програму для діагностування та прогнозування можливих аварійних ситуацій на вказаному виробництві. Наведемо результати роботи програми в режимах діагностування (рисунок 5.6) та прогнозування (рисунок 5.7) для фрагменту графа (рисунок 5.5).

У режимі діагностування програма працює так. Ліворуч відображені аварійні ситуації, праворуч – причини їх виникнення. Оператор має

можливість вказати факт, що дійсно стався, і побачити ланцюжок фактів, які призвели до його появи. На рисунку 5.6 наведена ланка з відображенням одного з можливих варіантів виникнення браку продукції.

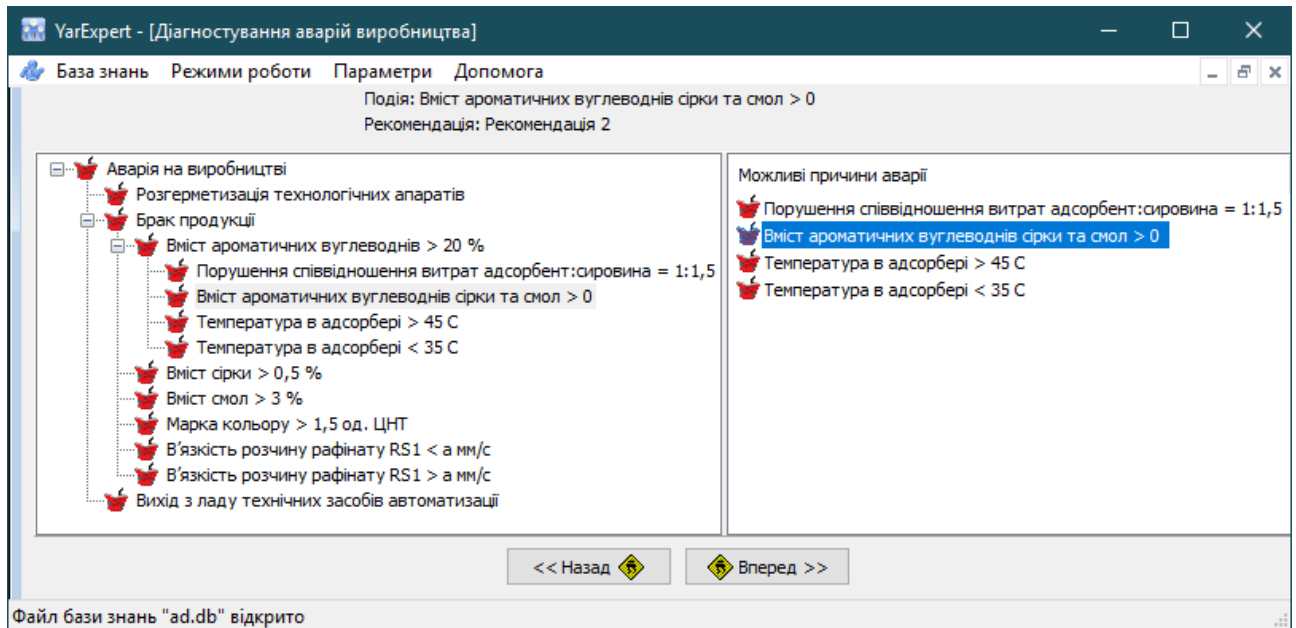


Рисунок 5.6 – Вікно програми для режиму діагностування аварій виробництва з очищення олив та мастил

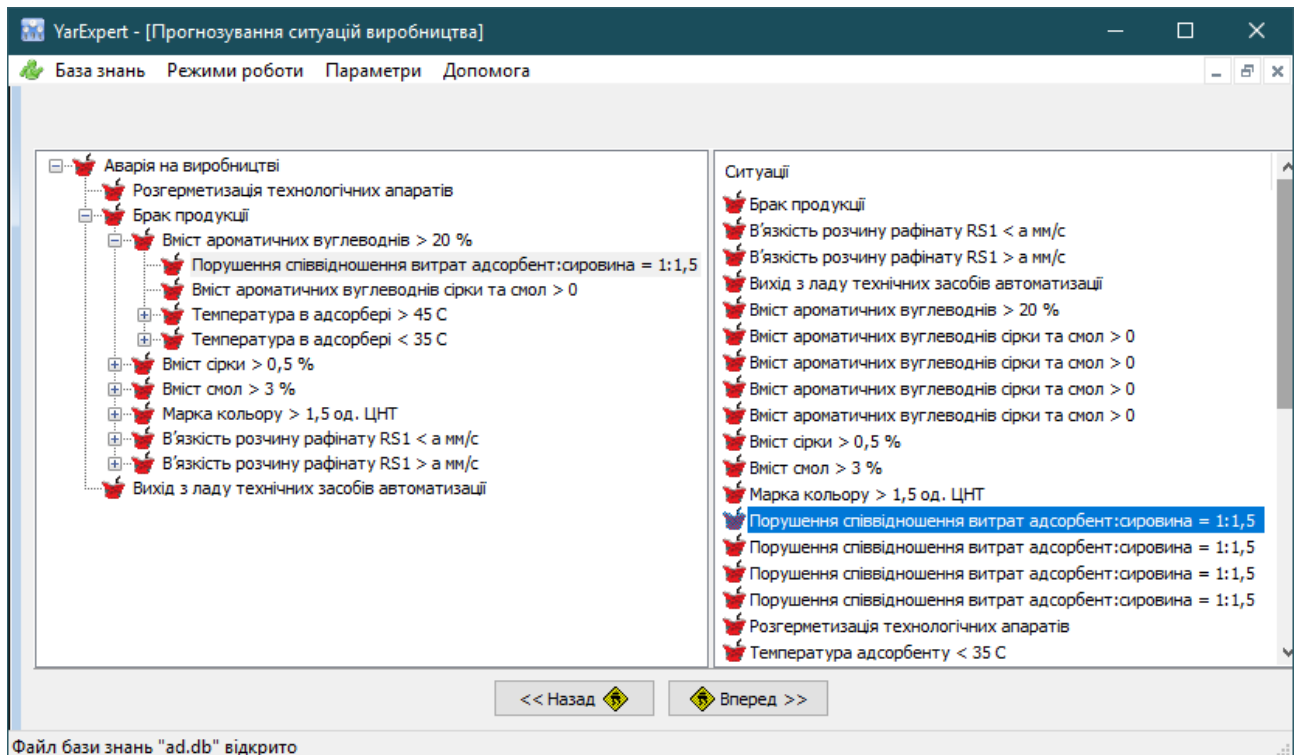


Рисунок 5.7 – Вікно програми для режиму прогнозування аварій виробництва з очищення олив та мастил

В режимі прогнозування оператор може обрати наявний факт та подивитися, до яких наслідків призведе його поява. На рисунку 5.7 наведена ланка з відображенням одного з можливих наслідків факту «Порушення співвідношення витрат адсорбент : сировина = 1:1,5», в результаті чого існує ймовірність браку продукції.

З наведених результатів дослідження зрозуміло, що експертні системи дозволяють передбачати та запобігати виникненню аварійних ситуацій, що, у свою чергу, знижує ймовірність отримання бракованого продукту і викидів шкідливих речовин в атмосферу. Такий граф доцільно використовувати під час створення систем керування при виборі найбільш інформативних технологічних змінних залежно від способу вимірювання (він повинен бути автоматичним), від імовірності аварії, яка може статися в результаті виходу змінної за припустимі межі, та від суттєвості її наслідків.

Запропонований граф дуже ефективний для перевірки логіки поведінки майбутньої ЕС та алгоритмів функціонування системи автоматизації в цілому, а також для навчання персоналу.

Табличні та графічні засоби формалізації думок експертів дозволять прискорити виконання етапів отримання знань та програмування ЕС.

Подальша робота над створенням ЕС полягає у верифікації створеного програмного засобу та у пошуку можливостей корегування апріорних імовірностей появи фактів.

5.3 Формування системи знань для підготовки експертів та експертиз при автоматизації адсорбційного очищення

Використання досвіду розробників і оперативного персоналу дають можливість дотримуватися вимог до технології, але несистемність залучення експертів зменшує їх ефективність. Систематизація інтелектуальних задач, конкретних видів емпіричних знань та способів їх отримання є актуальною.

Існуючі праці, хоча і присвячені втіленню елементів штучного інтелекту у виробничі процеси, але вони не носять комплексного підходу при проектуванні систем автоматизації і, зокрема для процесів очищення мастильних матеріалів. Численні на цей час роботи по отриманню та застосуванню експертних знань не розкривають методологічних особливостей такої роботи у виробничій сфері.

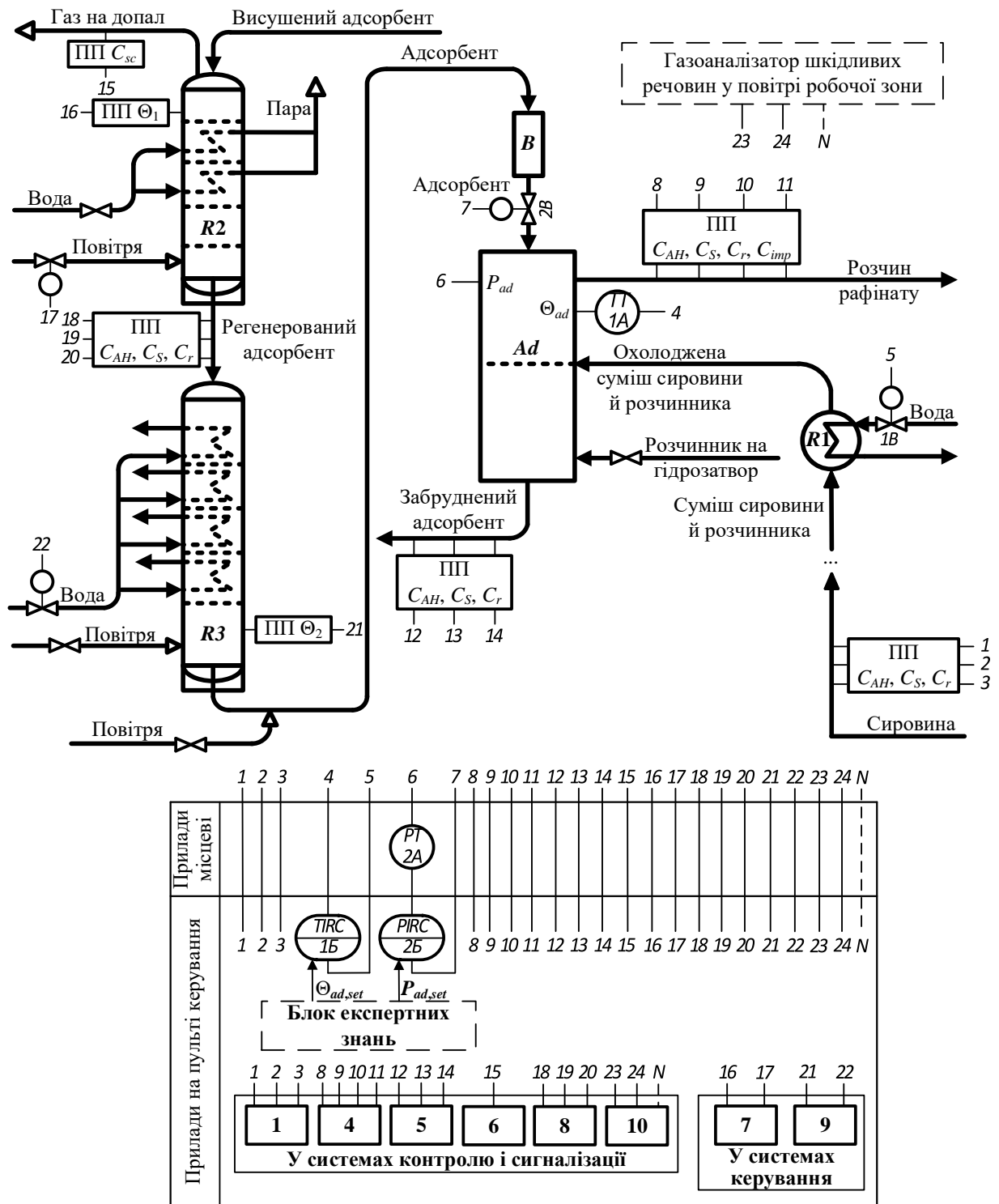
Математичне забезпечення систем автоматизації повинно враховувати специфіку систем, побудованих на знаннях. Вибір та узагальнення типів задач штучного інтелекту, способів формування та застосування відповідних знань є продовженням досліджень [27].

Актуальним є визначення сукупності задач, які доцільно та можливо розв'язати методами, пов'язаними не з математично формалізованими знаннями, а з тими, що набувають у результаті практичної діяльності при адсорбційному очищенні речовин. Результати роботи повинні показати, до яких предметних областей належать потрібні знання, як вони можуть бути отримані та як використані.

Наведемо на рисунку 5.8 фрагмент спрощеної системи автоматизації, в якому передбачено, зокрема, контроль витрат сировини й адсорбенту та концентрацій ароматичних вуглеводнів, сірчистих з'єднань і смол. У системах керування температурою (Θ_{ad}) і тиском (P_{ad}) в адсорбері завдання регуляторам $\Theta_{ad,set}$ і $P_{ad,set}$ надходять з блоку експертних знань, наповнення якого визначається задачами керування.

Задача 1 – створення алгоритму керування процесом адсорбції при переході до очищення нової сировини (сировина того ж постачальника, але з іншого джерела, або сировина від іншого постачальника).

Зрозуміло, що при виконанні алгоритму регулярно виникають питання, пов'язані з прийняттям рішення щодо можливості визнання попередньої сировини аналогом нової. Це питання про критично малу кількість властивостей і про критично широкі межі діапазону порівняння.



ПП – первинний перетворювач; 1, 4, 5, 6, 8, 10 – прилади контролю і сигналізації технологічних параметрів; 7, 9 – регулятори відповідних технологічних параметрів

Рисунок 5.8 – Фрагмент схеми автоматизації адсорбційного відділення

Запропоновано розглядати два способи визначення $P_{ad,set}$ та $\Theta_{ad,set}$ – статистичний та проведення експертизи. Статистику використовують тоді, коли знайдено аналоги, а експертизу – коли треба запропонувати $P_{ad,set}$ та $\Theta_{ad,set}$ за відсутності надійних аналогів.

Для задачі 1 передбачено застосувати емпіричний досвід для таких випадків:

- а) формування переліку властивостей для порівняння;
- б) визначення початкових (найменших) інтервалів порівняння для кожної властивості;
- в) коефіцієнти збільшення інтервалів за відсутності аналогів;
- г) задання $P_{ad,set}$ та $\Theta_{ad,set}$, якщо немає збігів з жодною властивістю;
- д) задання $P_{ad,set}$ та $\Theta_{ad,set}$, якщо збіги є за окремими властивостями при поточних інтервалах, але вони видаються сумнівними;
- е) задання $P_{ad,set}$ та $\Theta_{ad,set}$, якщо при пошуку аналогів перевищено припустимі інтервали порівняння.

Доцільно заздалегідь сформулювати перелік осіб, допущених до експертиз, визначити критерії їх компетентності, створити електронні таблиці опитувань і відповідний комп'ютерний математичний апарат їх обробки.

Знаннями пп. (а – в) володіють хіміки-технологи, а знання про відповідність між властивостями та режимними параметрами адсорбції, пп. (г – е), є в оперативного персоналу та фахівців з автоматизації.

Пункти (а – в) можна виконати заздалегідь шляхом обговорення в експертному середовищі.

Необхідність у виконанні пп. (г – е) з'являється тільки після визнання факту надходження нової сировини й отримання числових значень її властивостей. У цей період швидкість виконання алгоритму впливає на якість очищення і пов'язана з його економічною ефективністю. Отже, саме для цієї задачі важливим є обмеження на тривалість консультаційних заходів.

Програмна реалізація алгоритму має суттєві переваги перед тим або іншим способом активних експертиз. Але і вона в критичні моменти потребує залучення фахівців. Задіяні у виконанні пп. (г – е) фахівці повинні пройти спеціальне навчання, зокрема з правил організації мозкових штурмів, рольових ігор, анкетування тощо.

***Задача 2** – запобігання аварійним ситуаціям, з'ясування та усунення їх причин.*

Для розв'язання задачі 2 передбачено створення ЕС – системи програм, яка містить емпіричні знання фахівців.

Існує багато способів подання інформації, закладеної в БЗ.

Для створення бази знань необхідні відповідні знання експертів і вибір способу отримання цих знань. Так, експертами можуть бути фахівці різних предметних областей (ПО), зокрема ті, які працюють на виробництві з очищення оливних або мастильних матеріалів, і фахівці в області автоматизації. Отримання таких знань не вимагає терміновості, тому доцільно організовувати обговорення в експертних групах та індивідуальні опитування експертів.

***Задача 3** – створення нечіткої автоматичної системи керування (НчАСК) об'єктом.*

Автори запропонували керування режимними параметрами P_{ad} та Θ_{ad} з корекцією за концентраціями забруднювачів.

Як впливає з п. 4.2.3, складові нечіткого моделювання ТОК не формалізовані й базуються виключно на експертних пропозиціях.

Задачу визначення терм-множини (базової чи розширеної) для кожної ЛЗ доцільно розділити на такі підзадачі: кількість нечітких змінних у ЛЗ, N ; універсуми кожної НчЗ; вид функції належності кожної НчЗ (множина функцій належностей – μ); параметри функції належності кожної нечіткої змінної (множина **FP**).

Думки експертів стосовно перших трьох властивостей доцільно з'ясовувати, надаючи перелік варіантів відповідей, додаючи пункт опитування «Ваш варіант». Щодо виду функцій, то треба як варіанти навести математичні вирази, які традиційно використовують для математичного опису адсорбції. На жаль, математичні моделі каналу керування для вибраного виробництва відсутні, тому при опитуванні експертів доцільно наводити формули існуючих апроксимацій, що вдало себе зарекомендували та їх графічні зображення, знову таки, з пунктом «Ваш варіант».

Параметри функцій належності кожний експерт може підібрати, використовуючи, наприклад, графічний редактор у бібліотеці *Fuzzy logic* математичного пакету *MATLAB*. Для адсорбції доцільно віддати перевагу експонентам та логарифмам.

Вибрати одну нечітку модель з декількох запропонованих доцільно в результаті обговорення або ранжування за процедурою Дельфі.

Рекомендації щодо значень керувальної змінної при певних комбінаціях керованої та корегувальних змінних розробляють у виді правил продукції (ЯКЩО «акцедент», ТО «консеквент»). Існує достатній вибір відповідних алгоритмів, зокрема Мамдані, Цукамото, Ларсена, Сугено тощо. Правил до вибору якогось з них немає – це вирішують експерти.

Аналіз необхідних знань для задачі 3 показав, що найкращим способом як для отримання експертних знань, так і для підготовки фахівців до експертиз є використання графіків і формул, які дозволяють зрозуміти існуючі зв'язки між технологічними змінними. Дуже корисною практикою ознайомлення майбутніх експертів буде створення нечітких моделей у середовищах спеціалізованих математичних процесорів.

Задача 4 – *приєднання виробництва з очищення індустриальних олив і мастил до напрямку міжнародної співпраці «Концепція сталого розвитку».*

Промислове адсорбційне очищення ВОМ супроводжується викидами в атмосферу речовин, які забруднюють довкілля (повітря, воду, ґрунт). Ці причини зобов'язують розробників ТС та систем автоматизації враховувати

світові тенденції організації технологічних процесів, а також відповідні державні стандарти, норми і правила стосовно вмісту шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Головна ідея Концепції – системне поєднання трьох компонентів розвитку суспільства: економіки, екології та соціальної сфери.

Відповідно до цілей сталого розвитку України до 2030 р. [67], стратегія сталого розвитку пов'язана зі зменшенням антропогенного впливу на навколишнє середовище шляхом, зокрема, усунення накопичених у минулому токсичних відходів.

Така глобальна задача базується на різних моделях знань. Значну частину таких знань формують нормативні документи, що стосуються рівнів виробництва, країни, світу. Документи виробництва потрібні для регулювання гранично припустимих концентрацій (ГДК) у повітрі робочої зони, забезпечення стандартів очищення відпрацьованих матеріалів для отримання товарного продукту тощо. Державні документи (закони, кодекси) фіксують обмеження на викид небезпечних речовин у навколишнє середовищі в рамках всіх підприємств, які діють у межах країни. Документи світового рівня (стратегії), розраховані на довготривалі терміни, у них відображені зобов'язання кожної країни зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферу в перспективі десятиліть. Оскільки оптимальне керування технологічними об'єктами в цій задачі повинно враховувати економічну, екологічну та соціальну складові Концепції, то головним завданням експертиз є домовленість про вагові коефіцієнти між цими складовими:

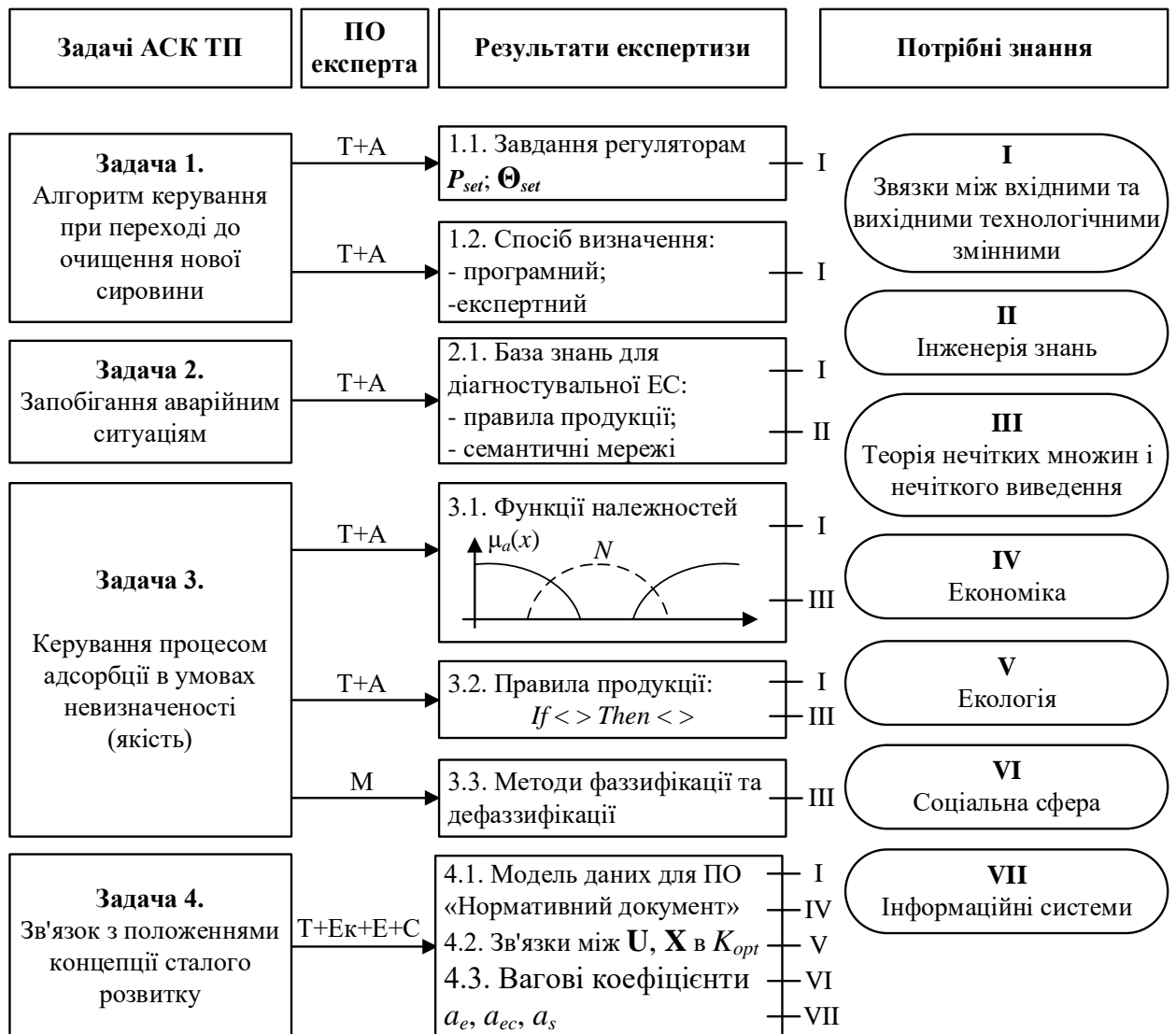
$$K_{opt}(\mathbf{U}, \mathbf{X}) = f(a_e K_{opt,e}; a_{ec} K_{opt,ec}; a_s K_{opt,s}),$$

де $K_{opt,e}$; $K_{opt,ec}$; $K_{opt,s}$ – критерії оптимальності для економічної, екологічної та соціальної складових загального критерію відповідно; a_e , a_{ec} , a_s – вагові коефіцієнти відповідних складових для поточної виробничої, державної та світової ситуації.

Зрозуміло, що ця задача вимагає залучення експертів різних предметних областей. Її розв'язання не передбачає терміновості, методами роботи з

експертами можуть бути експертизи типу круглих столів, а також індивідуальні опитування.

Результатом досліджень комплексу задач, які потребують емпіричних знань, є створення системи заходів, які забезпечать більшу ефективність автоматизації виробництва з очищення ВОР за рахунок збільшення правдивості залучених знань. На рисунку 5.9 зображено схему, яка дозволяє розробникам математичного забезпечення системи автоматизації переходити від аналізу задач виробництва до організації відповідної роботи з експертами.



ПО – предметна область; М – математика; Т – технологія; А – автоматизація,

Ек – економіка, Е – екологія, С – соціальна сфера

Рисунок 5.9 – Схема визначення знань для підготовки експертів та експертиз

Висновки, які можна зробити з проведених досліджень, можна покласти в основу таких рекомендацій:

- при розробці системи автоматизації доцільно формувати не тільки перелік окремих її задач, а й створювати перелік типів емпіричних знань в кожній з них і в цілому в проєкті;
- створювати експертні групи потрібно не окремо для кожної задачі, а по напрямку знань, який може бути задіяний у декількох задачах;
- майбутні експерти повинні пройти певну підготовку перед проведенням експертизи, по-перше, їм треба надати додаткову інформацію як про властивості технології, так і про існуючі методи розв'язання задач; по-друге, з експертами треба провести тренувальні експертизи для кращого «занурення» у проблематику, використовуючи, зокрема, засоби спеціалізованих математичних процесорів.

Висновки до розділу 5

1) Створено інтегровану систему керування адсорбційним очищенням шляхом поєднання системи керування процесом при суттєвій зміні властивостей нової забрудненої сировини з системою керування процесом при сталих властивостях забрудненої сировини. В ній передбачено чергування етапів визначення режимних параметрів адсорбції за сировинами-аналогами та за показниками якості очищеного продукту, при цьому режимні параметри другого етапу запам'ятовуються в базі даних сировин-аналогів першого етапу.

2) Створена та реалізована в режимі консультанта експертна система для діагностування та прогнозування аварійних ситуацій виробництва, яка дозволяє уникнути тривалих зупинок через порушення технологічних умов, підвищуючи тим самим рівень ресурсозбереження.

3) Враховуючи високий рівень залучення емпіричних знань при автоматизації очищення відпрацьованих речовин, проаналізовано типи цих знань і можливі способи їх отримання та запропоновано систему підготовки

експертів для такого типу виробництв. Ці заходи сприятимуть підвищенню якості знань і, відповідно, ефективності систем керування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано систему керування процесом неперервного адсорбційного очищення відпрацьованих олив і мастил від забруднювальних речовин, яка враховує вимоги до показників якості продукції та спрямована на ресурсозбереження як сировини, так і адсорбенту, що забезпечить підвищення ефективності виробництв по відновленню цінних речовин, а також дотичних до них.

У результаті проведених досліджень отримано такі результати.

1. Аналіз процесів адсорбційного очищення олив та мастил показав, що умови перебігу процесів залежать від значної кількості характеристик сировини, адсорбенту й адсорбера, які неможливо визначити поточно. Їх значення істотно впливають на ступінь очищення продукції, який оцінюють, зокрема, за концентраціями забруднювачів. Оскільки сировину збирають з різних джерел, їх властивості можуть суттєво відрізнятися від партії до партії, тому запропоновано розглядати керування адсорбційним очищенням ВОМ у різних режимах експлуатації – сталої сировини й зміни сировини. Систематизація задач керування адсорбційним очищенням дозволяє скоротити тривалість та підвищити ретельність виконання етапів, необхідних для проєктування або модернізації систем автоматизації.

2. Керування в режимі «Зміна сировини» полягає у визначенні режимних параметрів на основі сировин-аналогів. Алгоритм керування в цьому режимі передбачає автоматизований пошук у базі даних сировин-аналогів нової сировини, статистичні дослідження масиву знайдених у базі варіантів режимних параметрів, прийняття рішень щодо корегування та, відповідно, саме корегування поточних завдань регуляторам режимних параметрів. Використання такого способу керування при змінній сировині дозволяє підвищити ефективність роботи систем керування виробництв з регенерації відходів за рахунок скорочення часу та підвищення точності визначення необхідних умов переробки забруднених матеріалів.

3. Проведений аналіз властивостей технологічної системи адсорбційного очищення відпрацьованих олив або мастил і методів її моделювання показав, що застосування виключно аналітичних методів обмежено для розділення багатокomпонентних сумішей з нестабільним складом. Методи, які розглядають властивості речовини в адсорбері усереднено (як макросистем) також передбачають знання багатьох змінних, які характеризують властивості матеріальних потоків і стану технологічного обладнання, що неможливо в умовах виробництва. Тому запропоновано використовувати імітаційну модель, структуру якої визначено на основі аналізу особливостей адсорбції, для адаптування параметрів налаштувань регуляторів і дослідження алгоритмів керування такими процесами.

4. Досліджено особливості перебігу процесів адсорбційного очищення, пов'язані з наявністю та типом трендів характеристик матеріальних потоків і конструктивних елементів адсорбера. Визначено джерела нестаціонарності процесу за часом виникнення та характером прояву в режимі «Стала сировина».

5. Керування в режимі «Стала сировина» передбачає наявність таких структурних елементів: адаптивної системи керування тиском в адсорбері на основі поточної ідентифікації залежностей вихідних змінних адсорбції від тиску й температури в адсорбері; нечітку систему для корегування уставок регуляторам режимних параметрів за залишковими показниками забруднень в продукції, яка дозволяє заповнювати базу даних з властивостями сировини й відповідними режимними параметрами. Досліджено вплив різних форм функцій належності та кількості термів на рекомендації нечіткої системи. Використання запропонованої адаптивної системи керування підвищить ефективність очищення за рахунок більш скорочення часу, необхідного для визначення й нанесення потрібних керувальних впливів у відповідь на прояви невизначеності стану технологічної системи.

6. Виконано синтез систем керування процесом очищення ВОМ, які були створені для режимів зміни та сталої сировини, що дозволяє узгоджувати

роботу програмного та технічного забезпечення систем і досягати покращення якості продукції.

7. Створена та реалізована в режимі консультанта експертна система для діагностування та прогнозування аварійних ситуацій виробництва. Проведено аналіз типів емпіричних знань при автоматизації очищення відпрацьованих речовин і можливі способи їх отримання, запропоновано систему підготовки експертів для такого типу виробництв, що забезпечить більшу ефективність автоматизації виробництва з очищення ВОР та буде корисною для інших виробництв, пов'язаних з відновленням відпрацьованих корисних речовин.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Чабанний В. Я., Черновол М. І., Солових Є. К., Магопець С. О., Бевз О. В., Солових А. Є., Катеринич С. Є. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення : навч. посіб. Кропивницький : Центральноукраїнський національний технічний університет, 2022. 486 с.

2. Кухнюк Н. В. Інтерактивний комплекс з дисципліни «Автоматизація технологічних процесів» для студентів III-го курсу спеціальності 5.092503 «Монтаж, обслуговування засобів і систем автоматизації технологічного виробництва». Рівне : Технічний коледж НУВГП, 2008. 227 с.

3. Поджарський М. А. Теоретичні основи процесів сорбції : конспект лекцій. Дніпропетровськ : РВВ ДНУ, 2007. 40 с.

4. Иванова Л. В., Корнеев И. И., Юзбашев В. Н. Технология переработки нефти и газа. М : Химия, 1966. 419 с.

5. Чабанний В. Я., Магопець С. О., Осіпов І. М., Аулін В. В., Мажейка О. Й., Солових Є. К., Павлюк-Мороз В. А., Попов Г. А., Катеринич С. Є. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення. Книга 2. Системи забезпечення якості паливо-мастильних матеріалів, 2-ге видання, перероблене та доповнене. Кіровоград : Центрально-Українське видавництво, 2008. 500 с.

6. Кулик, М. І. Утилізація відпрацьованих моторних мастил: еколого-економічний аспект. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2015. Вип. 1-2. С. 122 – 128.

7. Кобилянський, Є. В., Іщук, Ю. Л. & Альтшулер, М. А. Основи нанотехнологій мастильних матеріалів. *Каталіз та нафтохімія*. 2005. № 13. С. 1 – 8. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/3767>.

8. Мchedlov-Petrosyan М. О., Лебідь В. І., Глазкова М. О., Лебідь О. В. Колоїдна хімія : підручник, 2-ге вид., випр. і доп. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2012. 500 с.

9. Іваненко І. М., Донцова Т. А., Феденко Ю. М. Адсорбція, адсорбенти і каталізатори на їх основі : підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» спеціалізації «Хімічні технології неорганічних речовин та водоочищення». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 6,75 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 232 с.

10. Маховський В. О. Конспект лекцій «Поверхневі явища та дисперсні системи» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальностей 161 «Хімічні технології та інженерія»; 162 «Біотехнологія та біоінженерія» денної та заочної форм навчання. Кам'янське : ДДТУ, 2018. 52 с.

11. Гордійчук Г. М., Іванченко Л. В., Кожухар В. Я., Муратов Н. Н. Конспект лекцій з курсу «Колоїдна хімія» для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія. Одеса : Національний університет «Одеська політехніка», 2023. 97 с.

12. Ярощук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2020). Вербальне моделювання мікропроцесів неперервної адсорбційної регенерації олив та мастил. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (2), 78 – 88. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2020.208058>

13. Онищук О. О., Кормош Ж. О. Процеси та апарати хімічних виробництв : курс лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 155 с.

14. Жалкін Д. С., Жалкін С. Г. Хімотологія дизельних палив. Альтернативні види палива : конспект лекцій. Харків : УкрДУЗТ, 2016. 42 с.

15. Rudnick L. R., Eds. Synthetics, Mineral Oils, and Bio-Based Lubricants: Chemistry and Technology, 3rd ed. Boca Raron : CRC Press, 2020. 1194 p.

16. Stan, C., Andreescu, C. & Toma, M. “Some aspects of the regeneration of used motor oil”, *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 22. P. 709 – 713. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.03.102.

17. Martínez García, M., Rumbo Morales, J. Y., Torres, G. O., Rodríguez Paredes, S. A., Vázquez Reyes, S., Sorcia Vázquez, F. D. J., Pérez Vidal, A. F., Valdez Martínez, J. S., Pérez Zúñiga, R. & Renteria Vargas, E. M. Simulation and State Feedback Control of a Pressure Swing Adsorption Process to Produce Hydrogen. *Mathematics*. 2022, (10), 1762. <https://doi.org/10.3390/math10101762>.

18. Ramos-Martinez, M., Torres-Cantero, C. A., Ortiz-Torres, G., Sorcia-Vázquez, F. D. J., Avila-George, H., Lozoya-Ponce, R. E., Vargas-Méndez, R. A., Renteria-Vargas, E. M. & Rumbo-Morales, J. Y. Control for Bioethanol Production in a Pressure Swing Adsorption Process Using an Artificial Neural Network. *Mathematics*. 2023, (11), 3967. <https://doi.org/10.3390/math11183967>.

19. Mulholland, M. & Latifi, M. A. Predictive Control of Pressure Swing Adsorption, Editors: Fikar M., Kvasnica M. *In Proceedings of the 17th International Conference on Process Control*. '09, Štrbské Pleso, Slovakia, 2009. P. 323 – 331.

20. Peng, H., Couenne, F & Gorrec, Y. Le. Robust Control of a Pressure Swing Adsorption Process. *18th World Congress of the International federation of Automatic Control*. IFAC'12, Milan, Italy, Aug 2011. P. 7310 – 7315. <https://hal.science/hal-00720345>.

21. Van Vliet, B. M., Weber, Jr W. J. & Hozumi, H. (1979). Modeling and prediction of specific compound adsorption by activated carbon and synthetic adsorbents. *Water Research*, vol. 14. 1719 – 1728.

22. Петрик М. Р., Хіміч О. М., Бойко І.В., Михалик Д. М., Петрик М. М., Ковбашин ВІ. Математичне моделювання теплопереносу та адсорбції вуглеводнів в нанопористих цеолітних каталізаторах систем нейтралізації відпрацьованих газів : монографія. Київ, НАНУ. 280 с.

23. Schönbucher A. Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Berechnungsmethoden für Ausrüstungen und Prozesse. Berlin: Springer, 2002. P. 1030.

24. А. с. 1443924 А1 SU СССР : МКИ⁴ В01D 15/00, G05D 27/10. Способ автоматического управления процессом адсорбционной очистки сточных вод

/ А. А. Рульнов, А. В. Егоров (СССР). № 4258577/31-26 ; заявл. 17.04.1987 ; опубл. 15.12.1988, Бюл. № 46. 3 с.

25. А. с. 1574254 A1 SU СССР : МКИ⁴ B01D 53/04, G05D 27/100. Способ управления циклическим адсорбционным процессом / Р. Я. Фишер, В. М. Кисаров, Ю. В. Кашников (СССР) ; № 4188053/23-26 ; заявл. 30.01.1987 ; опубл. 30.06.1990, Бюл. № 24. 2 с.

26. Спосіб автоматичного керування процесом очищення олив та мастил адсорбентами : пат. 128760, Україна : МПК⁶ C10G 25/05, C10G 71/00, B01D 15/00, G01N 33/28 / Є. О. Тюріна, Л. Д. Ярощук ; № U201802946 ; заявл. 23.03.2018 ; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19. 3 с.

27. Ярощук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2021). Ієрархія задач керування неперервним процесом адсорбційного відновлення мастильних матеріалів. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, (2), 49 – 62. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.239200>

28. Ярощук Л. Д. Інтелектуальні системи управління: Експертні системи – основи проектування та застосування в системах автоматизації: посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 136 с.

29. Ярощук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2019). Врахування стратегії сталого розвитку при автоматизації очищення олив та мастил адсорбентами. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (1), 126 – 134. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171211>.

30. Тюріна Є. О. Керування хіміко-технологічною системою адсорбційного очищення олив та мастил : магістерська дис. : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Київ, 2019. 150 с.

31. Ладієва Л. Р. Оптимізація технологічних процесів : навч. посіб. Київ : ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2004. 192 с.

32. Zhulinskyi, A., Ladieva, L. & Burban, A. (2017). An Optimization of static operating modes of the installation of contact membrane distillation,

Contemporary Engineering Sciences, vol. 10, no. 9. 439 – 446.
<https://doi.org/10.12988/ces.2017.7332>.

33. Шевченко, В. А. (2018). Оптимізація управління електростанцією з умови мінімуму витрат палива і з урахуванням метеоумов, *Вісник ЧДТУ*, том. 1, вип. 4. 46 – 55. DOI: 10.24025/2306-4412.4.2018.162767.

34. Ярощук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2022). Моделювання та керування адсорбційним очищенням олив та мастил у режимі зміни сировини. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, (3), 56 – 68. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265361>.

35. Kume H. Statistical Methods for Quality Improvement. Tokyo : Association for Overseas Technical Scholarship (AOTS), 1989. 231 p.

36. Ishikawa K. What Is Total Quality Control? The Japanese Way. Translated by Lu D. J. New Jersey : Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1985. 215 p.

37. Тюріна Є. О., Ярощук Л. Д. Структурна ідентифікація процесу адсорбції як об’єкта керування. *Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами»*, 26 листопада 2021. Київ, НУХТ, 2021. С. 147.

38. Wood Kevin R., Liu Y. A., Yu Yueying. Design, Simulation and Optimization of Adsorptive and Chromatographic Separations: A Hands-On Approach 1st Edition. Weinheim : Wiley-VCH, 2018. 432 p.

39. Сабадаш В. В. Теоретичні основи сорбційних процесів на природних та синтетичних сорбентах : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2019. 474 с.

40. Wu, Xiu-Wen, Ma, Hongwen, Zhang, Lin-Tao & Wang, Feng-Jiao. (2012). Adsorption properties and mechanism of mesoporous adsorbents prepared

with fly ash for removal of Cu (II) in aqueous solution. *Applied Surface Science*. 261. 902 – 907. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.08.122.

41. Кваско, М. З., Жураковська О. С. & Жураковський Я. Ю. (2012) Аналіз параметрів математичної моделі адсорбції тетрафторетану на цеоліті NaY. *Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку – КМХТ-2012 : збірник наукових статей Третьої міжнародної науково-практичної конференції*, 10-12 травня 2012 року, м. Київ, м. Рубіжне. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. С. 87 – 89.

42. Корж Є. О. Сорбція та біосорбція фармацевтичних речовин на активованому вугіллі для ефективного їх вилучення з води : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата хімічних наук: 21.06.01 – екологічна безпека. НАН України, Ін-т колоїд. хімії та хімії води ім. А. В. Думанського. Київ, 2017. 147 с.

43. Nimibofa Ayawei, Augustus Newton Ebelegi, Donbebe Wankasi, "Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms", *Journal of Chemistry*, vol. 2017, Article ID 3039817, 11 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>.

44. Полоз, О. Ю., Ніколенко, М. В. & Ебіч, Ю. Р. (2019). Особливості адсорбції олігомерних складових епоксидних композицій на порошку алюмінію. *Питання хімії та хімічної технології*, № 1. 49 – 60. DOI: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-49-60.

45. Myers, T. G., Font, F. & Hennessy, M. G. (2020). Mathematical modelling of carbon capture in a packed column by adsorption. *Applied Energy*, vol. 278, Article 115565. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115565.

46. Ortmann, Roman (2016): Untersuchungen zur Adsorption und Desorption von Aldehyden und Aminen im Spurenbereich. Online unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:464-20160606-150124-5>.

47. Guo, W., Zuo, L., Yu, R., Zhang, X., & Wang, L. (2017). Study of factors affecting shale gas adsorption by simplified local density-Peng–Robinson method. *Energy Exploration & Exploitation*, 35(4), 528 – 541. <https://www.jstor.org/stable/90010040>.

48. Петрик, М. Р., Бойко, І. В. & Петрик, О. Ю. (2023). Математичне моделювання компетитивної адсорбції та десорбції газів у нанопористих середовищах з використанням рівноваги Ленгмюра. *Буковинський математичний журнал*, 11 (2), 59 – 70. <https://doi.org/10.31861/bmj2023.02.06>.

49. Погребова, І. С. (2013). Моделювання процесів адсорбції органічних сполук на металах на основі концепції «жорстких» і «м'яких» кислот та основ. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, № 6, 116 – 126. http://nbuv.gov.ua/UJRN/NVKPI_2013_6_18

50. Герасимов, О. І., Софронков, А. Н. & Попова, Н. Д. (2016) Фізичне моделювання адсорбційних властивостей графену. *Матеріали доповідей міжнародної заочної мультимедійної (інтернет) конференції «Роль фізики в розвитку міждисциплінарних наукових і навчальних напрямків»*, Одеський державний екологічний університет, PhysIST-2016, 2-5 травня 2016, Одеса, с. 28 – 30.

51. Alagappan, Breetha (2013). Assessing Different Zeolitic Adsorbents for their Potential Use in Kr and Xe Separation. *UNLV Theses, Dissertations, Professional Papers, and Capstones*. 1967. DOI: 10.34917/5363849.

52. Wanigarathna, J. A. D. K. (2018). Adsorption-based fluorocarbon separation in zeolites and metal organic frameworks. Doctoral thesis, Nanyang Technological University, Singapore. DOI: 10.32657/10356/75807, URL: <http://hdl.handle.net/10356/75807>.

53. Петрик М. Р., Бойко І. В. Моделі та методи моделювання складних процесів в наноструктурах і нанопористих середовищах (на основі високопродуктивних обчислень) : монографія. Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 140 с.

54. Cerutti, M. L. M. N., Hackbarth, F. V., Maass, D. Sandra, S. X. Ch., Ricardo R. C. P., Mauri J. B. C., Pedro, A. A., Antonio, A. U. de S. & Selene, M. A. G. U. de S. (2019). Copper-exchanged Y zeolites for gasoline deep-desulfurization. *Adsorption*, 25(8), 1595 – 1609. <https://doi.org/10.1007/s10450-019-00153-y>.

55. Малько О., Малько А. Моделювання процесу адсорбції включень на поверхню розділу фаз. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання*: матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції (м. Івано-Франківськ, 14-19 травня 2018 року). Івано-Франківськ: п. Голіней О. М., 2018. С. 358–361. URL: <http://itcm.comp-sc.if.ua/2018/malko.pdf>.

56. Коган В. Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии. Л. : Химия, 1977. 592 с.

57. Law, Averill M. Simulation modeling and analysis. Fifth edition. Tucson, Arizona, USA : President Averill M. Law & Associates, Inc, 2013. 800 p.

58. Ahmed, Duraid & Ateya, Safa (2016). Modelling and Simulation of Fluid Catalytic Cracking Unit. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*. 07: 308. DOI: 10.4172/2157-7048.1000308.

59. Поджарський, М. А. (2023). Моделювання адсорбційного видалення води з дихлорметану з використанням програми Aspen Adsorption: стадія десорбції. *Journal of Chemistry and Technologies*, вип. 31(2). 279 – 288. doi: 10.15421/jchemtech.v31i2.279050.

60. Jacob Nyende, Isaac Enyogoi, John Mango, Henry Kasumba, "Numerical Simulation of a Two-Dimensional Groundwater Pollute Transport Problem Using Incompressible Steady-State Navier-Stokes Equations and Diffusion-Convection Equations", *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2022, Article ID 7419502, 20 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7419502>

61. Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Джерела нестационарностей в адсорбційному очищенні відпрацьованих олив. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2023: Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКИТ – 2023)*. м. Київ, 19 квітня 2023 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. С. 11 – 12.

62. Мовчан А. П., Степанець О. В. Адаптивні та параметрично-оптимальні системи управління : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 108 с.

63. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. V. Nonlinear and Adaptive Control Design. Wiley-Interscience, 1995. 563 p. ISBN 0-471-12732-9.

64. Liudmyla Yaroshchuk, Yevheniia Tiurina, "Simulation of the Industrial Oil Adsorption Purification Process for Automation Tasks", *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2022, Article ID 2738654, 13 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2738654>.

65. Крих, Г. Б., Матіко, Г. Ф. & Кріль Б. А. (2018). Ідентифікація об'єкта керування за перехідними функціями замкнутої системи автоматичного регулювання. *Науковий вісник НЛТУ України*, 28(1), 122 – 130. <https://doi.org/10.15421/40280125>.

66. Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Задачі моделювання процесу адсорбції олив та мастил. *VI Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студ. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2019*, Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019, с. 57 – 58.

67. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ президента України № 722/2019 від 30.09.2019. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Відомості про наукові публікації здобувача ступеня доктора філософії

Тюріної Євгенії Олександрівни

для захисту дисертації на тему «Моделювання та керування адсорбційним очищенням олив та мастил»

з галузі знань 15 – Автоматизація та приладобудування

за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Освітньо-наукова програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

№ з/п	Тип публікації і категорія видання з зазначенням вітчизняне чи іноземне	Бібліографічний опис	Рік	Ключові слова	ISSN/ISBN DOI	Посилання на публікацію
1	2	3	4	5	6	7
Праці, в яких представлені основні наукові результати						
1	Стаття (вітчизняне видання), категорія Б	Ярошук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2020). Вербальне моделювання мікропроцесів неперервної адсорбційної регенерації олив та мастил. <i>Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”</i> . Серія: <i>Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження</i> , (2), 78–88.	2020	адсорбція, олива, мастило, наносистема, вербальний, модель, керування	ISSN: 2617-9741 (Print) ISSN: 2664-1763 (Online) doi: 10.20535/2617-9741.2.2020.208058	http://chemengin.e.kpi.ua/article/view/208058/208250

1	2	3	4	5	6	7
2	Стаття (вітчизняне видання), категорія Б	Ярошук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2021). Ієрархія задач керування неперервним процесом адсорбційного відновлення мастильних матеріалів. <i>Вісник Черкаського державного технологічного університету</i> , (2), 49 – 62.	2021	утилізація, очищення, регенерація, олива, мастило, адсорбція, задачі керування	ISSN: 2306-4412 (Print) ISSN: 2306-4455 (Online) doi: 10.24025/2306-4412.2.2021.239200	http://vtn.chdtu.edu.ua/article/view/239200/241753
3	Стаття (іноземне видання), Scopus Q2, Web of Science	Liudmyla Yaroshchuk, Yevheniia Tiurina, "Simulation of the Industrial Oil Adsorption Purification Process for Automation Tasks", <i>Modelling and Simulation in Engineering</i> , vol. 2022, Article ID 2738654, 13 pages, 2022.	2022	technological object, modeling, identification, simulation model, control	ISSN: 1687-5591 (Print) ISSN: 1687-5605 (Online) doi: 10.1155/2022/2738654	https://download.s.hindawi.com/journals/mse/2022/2738654.pdf?_gl=1*y1ym68*_ga*MjY0NTk0MTU1LjE3MTA0Mjc4ODk.*_ga_NF5QFMJT5V*MTCxMDQyNzg4OC4xLjAuMTcxMDQyNzg4OC42MC4wLjA
4	Стаття (вітчизняне видання), категорія Б	Ярошук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2022). Моделювання та керування адсорбційним очищенням олив та мастил у режимі зміни сировини. <i>Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”</i> . Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (3), 56 – 68.	2022	очищення, регенерація, олива, мастило, сировина, адсорбція, керування, статистика, моделювання	ISSN: 2617-9741 (Print) ISSN: 2664-1763 (Online) doi: 10.20535/2617-9741.3.2022.265361	http://chemengine.kpi.ua/article/view/265361/280431

1	2	3	4	5	6	7
5	Стаття (вітчизняне видання), категорія Б	Ярошук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2023). Керування адсорбційним відновленням відпрацьованих олив і мастил в умовах нестаціонарностей. <i>Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”</i> . Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (3), 63 – 73.	2023	олива, мастило, сировина, очищення, регенерування, адсорбція, керування, нестаціонарність, адаптування	ISSN: 2617-9741 (Print) ISSN: 2664-1763 (Online) doi: 10.20535/2617-9741.3.2023.288251	http://chemengin.e.kpi.ua/article/view/288251/281893
6	Стаття (вітчизняне видання), категорія Б	Ярошук, Л. Д., & Тюріна, Є. О. (2023). Експертні знання в системах автоматизації адсорбційного очищення олив і мастил. <i>Енергетика і автоматика</i> , 0(4), 116 – 131.	2023	очищення, олива, мастило, адсорбція, експерт, знання, експертна система, нечітка система, автоматизація, керування	ISSN: 2223-0858 (Online) doi: 10.31548/energiya4(68).2023.116	https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/48363
Патенти на винахід, патенти на корисну модель						
7	Авторське свідоцтво на твір	Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Науковий твір «Врахування показників сталого розвитку при автоматизації процесів відновлення ресурсів». № 93930, 13.11.2019	2019	—	—	—
8	Авторське свідоцтво на твір	Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Науковий твір «Спосіб визначення режимних параметрів при адсорбційному очищенні різних партій відпрацьованих олив та мастил». № 120987, 02.08.2023	2023	—	—	—

1	2	3	4	5	6	7
Праці, які підтверджують апробацію результатів дисертації						
9	Тези (вітчизняне видання)	Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Ідентифікація динаміки процесу адсорбції при очищенні олив та мастил. Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної Internet-конференції; Київ 20 листопада 2019. К.: НУХТ, 2019. С. 91 – 92	2019	—	ISBN: 978-966-612-234-9	https://drive.google.com/file/d/1HRpBoS22Y5bmLmonSmW-NUZ_JP7Zwp0u/view
10	Тези (вітчизняне видання)	Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Розвиток моделювання в сучасних технологіях екологічної безпеки (адсорбційне очищення). Філософія і науково-технічна творчість у хронотопі технічного університету: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. К.: Ліра-К, 2020. 410 с.	2020	—	ISBN: 978-617-7910-42-7	—
11	Тези (вітчизняне видання)	Tiurina Y. O., Yaroshchuk L. D. Knowledge formalization for the expert system in oil regeneration process control. Інформаційні технології і автоматизація – 2020 : Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2020», (Одеса, 22 – 23 жовтня 2020 р.). Одеська нац. акад. харч. технологій. Одеса: ОНАХТ, 2020. С. 142 – 145.	2020	—	—	https://ontu.edu.ua/download/konfi/2020/Collection-of-abstracts-ITA-2020.pdf

1	2	3	4	5	6	7
12	Тези (вітчизняне видання)	Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Задачі керування адсорбційним очищенням нафтових олив. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2021 : Матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студ. (АКІТ – 2021), м. Київ, 21–22 квітня 2021 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. С. 46 – 47.	2021	–	ISBN: 978-966-990-021-0	https://tpza.kpi.ua/conferences/proceedings/AKIT-2021.pdf
13	Тези (вітчизняне видання)	Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Структурна ідентифікація процесу адсорбції як об'єкта керування. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2021. К: НУХТ, 2021. С. 147.	2021	–	ISBN: 978-966-612-267-7	https://drive.google.com/file/d/1F_XOymRYbUgyH5-T49VPYyTCel2YsH2W/view
14	Тези (вітчизняне видання)	Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Інформаційне забезпечення імітаційного моделювання адсорбційного очищення олив і мастил. Інформаційні технології і автоматизація – 2022 : Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2022», (Одеса, 20 – 21 жовтня 2022 р.). Одеська нац. акад. харч. технологій. Одеса: ОНАХТ, 2022. С. 48 – 50.	2022	–	–	https://ontu.edu.ua/download/konfi/2022/Collection-of-abstracts-of-the-conference-ITIA-2022.pdf
15	Тези (вітчизняне видання)	Тюріна Є. О., Ярошук Л. Д. Джерела нестаціонарностей в адсорбційному очищенні відпрацьованих олив. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2023: Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ – 2023). м. Київ, 19 квітня 2023 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. С. 11 – 12.	2023	–	ISBN: 978-966-990-066-1	https://tpza.kpi.ua/conferences/proceedings/AKIT-2023.pdf

1	2	3	4	5	6	7
16	Тези (вітчизняне видання)	Тюріна Є. О., Ярощук Л. Д. Особливості алгоритмічного забезпечення системи керування очищенням олив і мастил. Матеріали X Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 24 листопада 2023. К: НУХТ, 2023. С. 57.	2023	—	ISBN: 978-966-612-306-3	https://drive.google.com/file/d/19dkao0HSOgMIVIGQg1iASv6R0m5zVkcU/view
Праці, які додатково відображають результати дисертації						
17	Розділ у колективній монографії (вітчизняне видання)	Ярощук Л. Д., Тюріна Є. О. Формалізація знань для експертної системи при керуванні процесом регенерації мастил. На шляху до Індустрії 4.0: інформаційні технології, моделювання, штучний інтелект, автоматизація : монографія / за заг. ред. С. В. Котлика. Одеса : Астропринт, 2021. С. 459 – 469.		—	ISBN: 978–966–927–702–2	—

Здобувач

*(підпис)*Євгенія ТЮРІНА

(власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчено:

Науковий керівник

*(підпис)*Людмила ЯРОЩУК

(власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

В. о. завідувача кафедри ТПЗА ІХФ

*(підпис)*Віталій ЦАПАР

(власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

ДОДАТОК Б

Алгоритм пошуку аналогів сировини

Блок 1 – Уведення концентрацій C_{AH} , C_S , C_r (робочі ідентифікатори C_1 , C_2 , C_3).

Блок 2 – Уведення коефіцієнтів k для розрахунку початкових нижньої та верхньої меж діапазонів порівняння при поточному пошуку по AH , S , r (робочі ідентифікатори $k_{1,l} := k_{AH,l}$; $k_{1,h} := k_{AH,h}$; $k_{2,l} := k_{S,l}$; $k_{2,h} := k_{S,h}$; $k_{3,l} := k_{r,l}$; $k_{3,h} := k_{r,h}$).

Блок 3 – Уведення гранично припустимих меж діапазонів порівняння концентрацій для кожного забруднювача (робочі ідентифікатори $C_{1,min} := C_{AH,min}$; $C_{1,max} := C_{AH,max}$; $C_{2,min} := C_{S,min}$; $C_{2,max} := C_{S,max}$; $C_{3,min} := C_{r,min}$; $C_{3,max} := C_{r,max}$). При їх перевищенні вважається недоцільним продовжувати пошук.

Блок 4 – Обчислення початкових верхньої та нижньої меж діапазонів порівняння C_{AH} , C_S , C_r за виразами системи (2.9), (робочі ідентифікатори $C_{AH,l}$, $C_{AH,h}$, $C_{S,l}$, $C_{S,h}$, $C_{r,l}$, $C_{r,h}$).

Блоки 5, 7, 8 – Послідовна перевірка входження поточних меж діапазонів порівняння C_{AH} (блок 5), C_S (блок 7), C_r (блок 8) у гранично припустимі межі цих діапазонів (за логічними операціями *AND*), задані в блоці 3.

Дії блоків 2 – 4 (початок алгоритму) передбачають відповідь «Ні» при виконанні блоків 5, 7, 8 і перехід до блоку 9.

Якщо умови в блоках 5, 7, 8 виконуються після пошуку в БД, то переходять до блоку 41.

Блок 6 – Статистичний розрахунок режимних параметрів $P_{ad,set}$, $\Theta_{ad,set}$ за аналогами нової сировини.

Блоки 9 – 17 – Виконання послідовного пошуку серед записів БД таких концентрацій забруднювачів, значення яких лежать у межах діапазонів порівняння.

Блок 9 – Початок циклічних дій для пошуку аналогів нової сировини в записах ($j = \overline{1, m}$) БД.

Блок 10 – Початок циклічних дій по наданню початкових значень елементам a_{ij} масиву **A**.

Блок 11 – Надання значень «0» елементам a_{ij} масиву **A** (i -го рядка ($i = \overline{1,4}$) j -го стовпця ($j = \overline{1,m}$) масиву **A**, див. табл. 2).

Блок 12 – Надання значення $i = 1$ (номер рядка в масиві **A**).

Блок 13 – Початок циклічних дій по заповненню 4-х рядків j -го стовпця масиву **A**: вказують, в яких полях z_j -го запису таблиці БД будуть виконувати пошук. Для прикладу, концентрації ароматичних вуглеводнів, сірки та смол записані у полях z : 2, 3, 4 таблиці *CONCORD* (рис. 3).

Блок 14 – Перевірка, чи входить у діапазон порівняння (6) концентрація забруднювача, вказана в z -му полі j -го запису БД ($C_{i,l} < C_{jz} < C_{i,h}$). Якщо умова виконується, то відбувається перехід на блок **15**, інакше – на блок **17**.

Блок 15 – Надавання значення «1» відповідному елементу a_{ij} масиву **A**.

Блок 16 – Додавання отриманого в блоці 15 значення a_{ij} до попереднього значення елемента a_{4j} масиву **A** (лічильник).

Блок 17 – Збільшення i на 1 (для виконання блоків **13** – **16** для іншого забруднювача).

Після завершення першої процедури пошуку аналогів нової сировини в БД (блоки **9** – **17**) переходять до аналізу результатів пошуку.

Блок 18 – Пошук фактів: « $a_{4j} = 3$ » в масиві **A** (фактів збігу всіх C_{AH} , C_S , C_r у записах $j = 1, \dots, m$ БД). Якщо такі факти є, то переходять до блоку **19**, інакше – до блоку **20**.

Блок 19 – Формування запиту (інформації) **Зп-3** («Зп» – запит) про знайдені за 3-ма забруднювачами аналоги нової сировини.

Блок 20 – Вибір способу прийняття рішення (після автоматичного пошуку – за результатами аналізу останнього запиту) щодо визначення $P_{ad,set}$, $\Theta_{ad,set}$:

1) за експертним висновком (блок **21**); 2) шляхом автоматизованого пошуку в БД з розширенням діапазону порівняння.

Блок 21 – Проведення експертизи стосовно $P_{ad,set}$, $\Theta_{ad,set}$ та перехід на блок **43**.

Блок 22 – Пошук збігів за 2-ма концентраціями, тобто пошук фактів: « $a_{4j} = 2$ » в масиві **A**. Якщо такі факти є, то переходять до блоку **30**, інакше – до блоку **23**.

Блок 23 – Пошук збігів за C_{AH} , тобто пошук фактів: « $a_{1j} > 0$ » в масиві **A**. Якщо такі факти є, то переходять до блоку **27**, інакше – до блоку **24**.

Блок 24 – Формування запиту (інформації) **Зп-1NotAH** із записами, в яких відсутні збіги з C_{AH} , а збіги з C_S або з C_r можливі.

Блок 25 – Уведення коригувального коефіцієнта $k_{AH,cor}$ для розширення діапазону порівняння за вуглеводнями (C_{AH}).

Блок 26 – Перерахунок верхньої та нижньої меж діапазону порівняння за C_{AH} за формулою (2.15) та перехід до блоку **5**.

Блок 27 – Формування запиту (інформації) **Зп-1S-r** із записами, в яких є аналоги нової сировини за 1-м забруднювачем – AH , а збіги з C_S або C_r відсутні.

Блок 28 – Уведення коригувальних коефіцієнтів $k_{S,cor}$ і $k_{r,cor}$ для розширення діапазонів порівняння за C_S і C_r .

Блок 29 – Перерахунок верхньої та нижньої меж діапазонів порівняння за C_S і C_r за формулами (2.16), (2.17) та перехід до блоку **7**.

Блок 30 – Пошук збігів за C_{AH} і C_S , тобто, пошук фактів $a_{1j} > 0 \cap a_{2j} > 0$. Якщо такі збіги є, то – перехід до блоку **31**, інакше – до блоку **34**.

Блок 31 – Формування запиту (інформації) **Зп-2AH-S** із записами, в яких є аналоги нової сировини за 2-ма забруднювачами – AH та S .

Блок 32 – Уведення коригувального коефіцієнта $k_{r,cor}$ для розширення діапазону порівняння за смолою (C_r).

Блок 33 – Перерахунок верхньої та нижньої меж діапазону порівняння за C_r за формулою (2.17) та перехід до блоку **8**.

Блок 34 – Пошук збігів за C_{AH} і C_r , тобто пошук фактів $a_{1j} > 0 \cap a_{3j} > 0$. Якщо такі збіги є, то – перехід до блоку **35**, інакше – до блоку **38**.

Блок 35 – Формування запиту (інформації) **Зп-2АН- r** із записами, в яких є аналоги нової сировини за 2-ма забруднювачами – $АН$ та r .

Блок 36 – Уведення коригувального коефіцієнта $k_{S,cor}$ для розширення діапазону порівняння за сіркою (C_S).

Блок 37 – Перерахунок верхньої та нижньої меж діапазону порівняння за C_S за формулою (2.16) та перехід до блоку **7**.

Блок 38 – Формування запиту (інформації) **Зп-2S- r** із записами, в яких є аналоги нової сировини за 2-ма забруднювачами – S та r .

Блок 39 – Уведення коригувального коефіцієнта $k_{АН,cor}$ для розширення діапазону порівняння за вуглеводнями ($C_{АН}$).

Блок 40 – Перерахунок верхньої та нижньої меж діапазону порівняння по $C_{АН}$ за формулою (2.15) та перехід до блоку **5**.

Блок 41 – Вибір способу прийняття рішення (після аналізу останнього запиту) щодо визначення $P_{ad,set}$, $\Theta_{ad,set}$: 1) за експертним висновком (на блок **42**); 2) за статистичним розрахунком (на блок **6**).

Блок 42 – Проведення експертизи стосовно $P_{ad,set}$, $\Theta_{ad,set}$.

Блок 43 – Реалізація $P_{ad,set}$, $\Theta_{ad,set}$ в АСК.

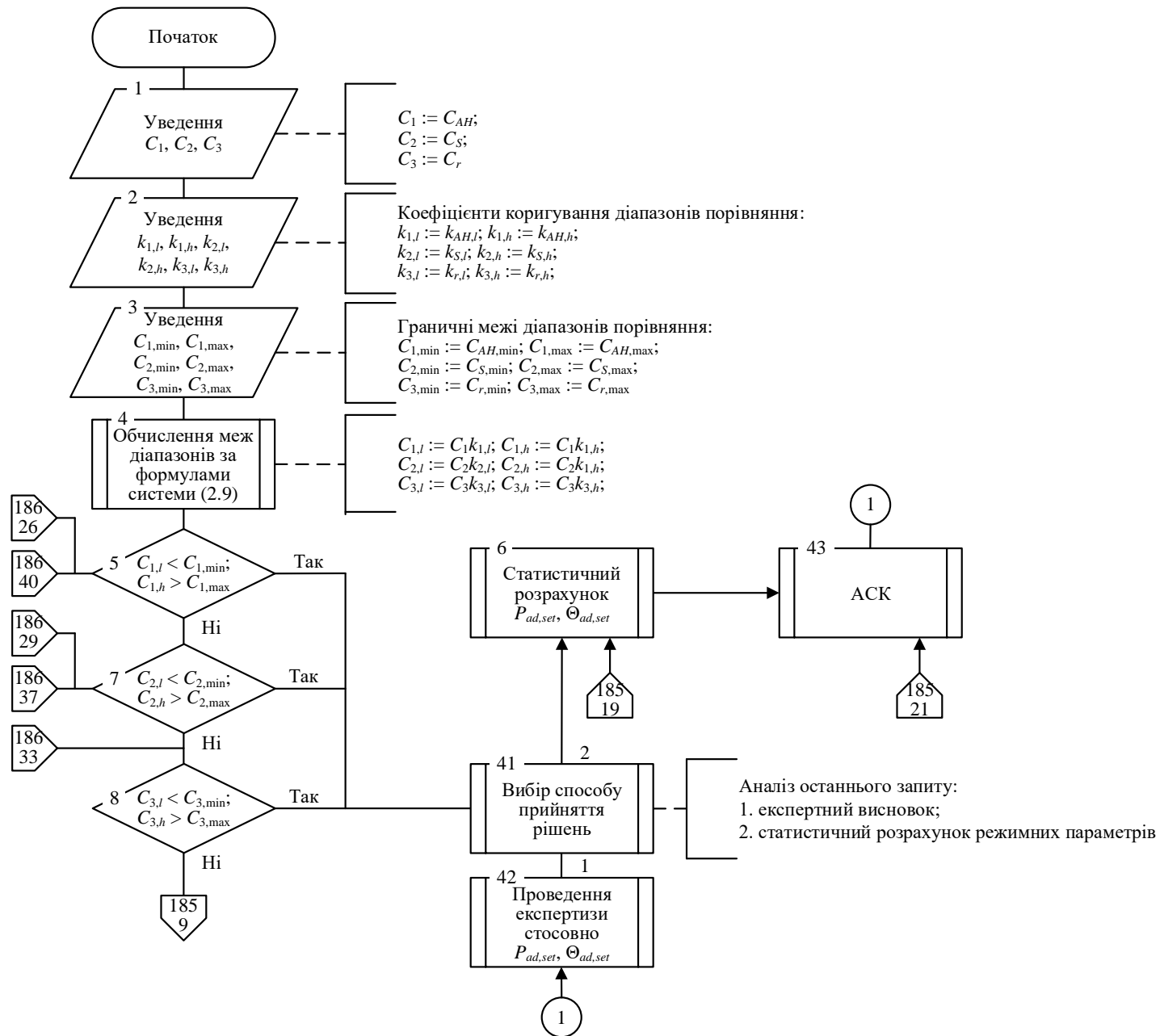


Рисунок Б.1 – Схема алгоритму пошуку аналогів сировини

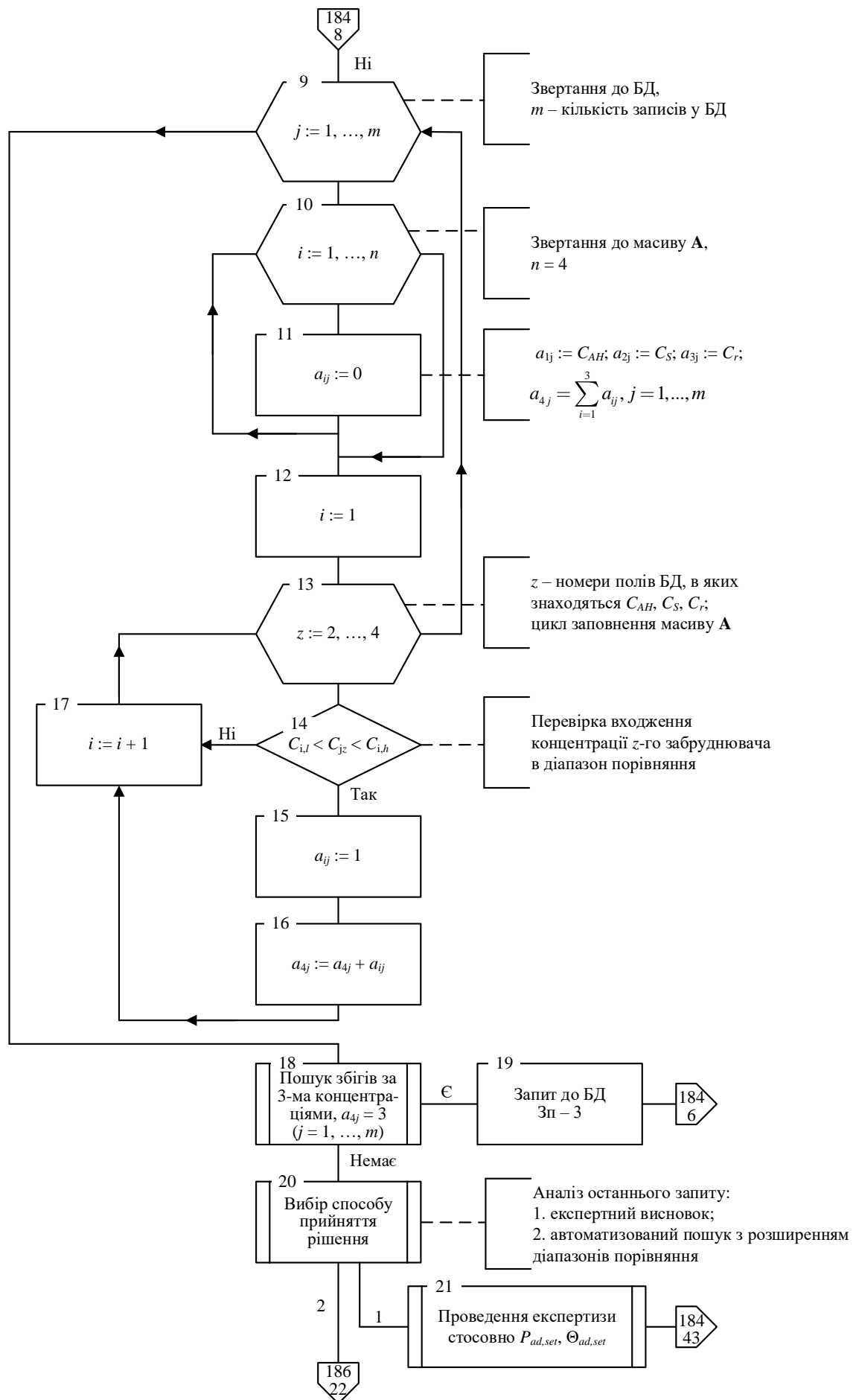


Рисунок Б.1, аркуш 2

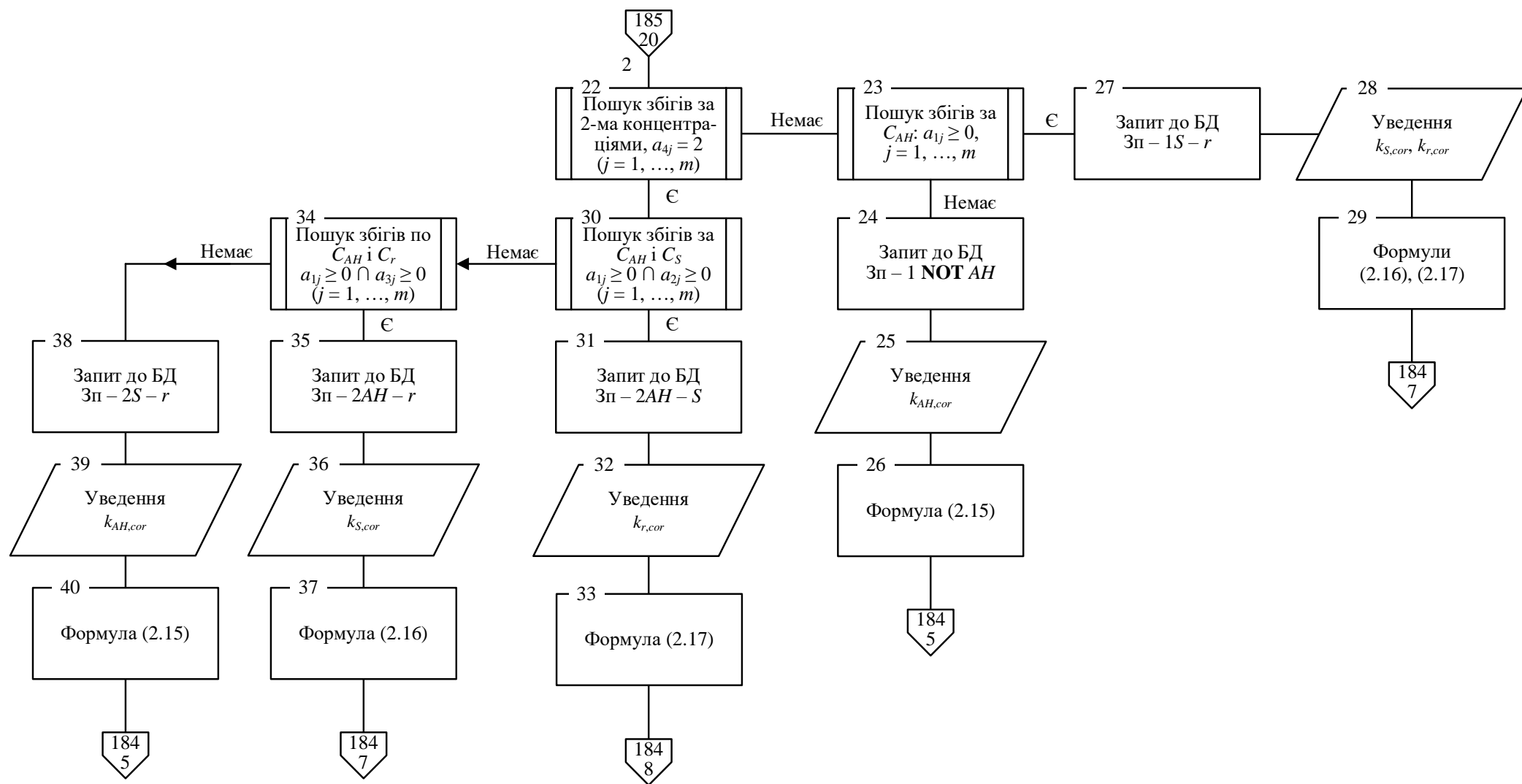


Рисунок Б.1, аркуш 3

ДОДАТОК В

Таблиця В.1 – База знань параметрів процесу очищення олив та мастил адсорбентами

№	Назва змінної	Ідент. змінної	Реєстрація потoku	Реєстрація попереднього апарату	Реєстрація наступного апарату	Місце спостереження	Одиниці вимірювання	Спосіб вимірювання	Періодичність вимірювання	Припустимі границі	Показник якості	Перелік пов'язаних показників якості	Змінна – причина аварії?	Ознаки порушення (аварії)	Наслідки порушення (аварії)	Імовірність порушення (аварії)	Визначення придатності змінної для прогнозування аварії
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Витрата сировини RM	F_{rm}	RM	Ємність	DM	Трубопровід	кг/с	Авт.	Неперервно	2,6 – 4	Ні	–	Так	Неприпустима витрата RM	Неприпустима температура $MS2$ Значення рівня $Ad < 3,5$ м	0,2 0,1	–
2	Температура сировини RM	Θ_{rm}	RM	Ємність	DM	Трубопровід	°C	Авт.	Неперервно	70 – 80	Так	V_{rm}	Так	Неприпустима температура RM	Неприпустима температура $MS2$	0,4	–
3	В'язкість сировини RM	V_{rm}	RM	Ємність	DM	Трубопровід	мм ² /с	Авт.	Неперервно	2 – 8	Так	Θ_{rm}	Ні	–	–	–	–
4	Вміст ароматичних вуглеводнів $AH0$	C_{ah0}	RM	Ємність	DM	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	60 – 70	Так	C_{ah1}, C_{r1}	Так	Вміст $AH > 70$ %	Неприпустима в'язкість $MS1$	0,4	–
5	Вміст сірки $S0$	C_{s0}	RM	Ємність	DM	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	4 – 5	Так	C_{ah1}, C_{r1}	Так	Вміст $S > 5$ %	Неприпустима в'язкість $MS1$	0,4	–
6	Вміст смол $r0$	C_{r0}	RM	Ємність	DM	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	7,7 – 8,1	Так	C_{ah1}, C_{s1}	Так	Вміст $r > 8,1$ %	Неприпустима в'язкість $MS1$	0,4	–
7	Колір CO	C_{c0}	RM	Ємність	DM	Трубопровід	од. ЦНТ	Авт.	Неперервно	6,0 – 6,5	Так	C_{c1}, C_{r1}	Ні	–	–	–	–
8	Витрата розчинника $SOL1$	F_{sol1}	$SOL1$	Ємність	DM	Трубопровід	м ³ /с	Авт.	Неперервно	3,9 – 3,948	Ні	–	Так	Неприпустима витрата $SOL1$	Неприпустима температура $MS2$ Неприпустима в'язкість $MS1$	0,2 0,2	–
9	Температура розчинника $SOL1$	Θ_{sol1}	$SOL1$	Ємність	DM	Трубопровід	°C	Авт.	Неперервно	80 – 120	Ні	–	Так	Неприпустима температура $SOL1$	Неприпустима температура $MS2$	–	–
10	Витрата суміші сировини й розчинника $MS1$	F_{ms1}	$MS1$	DM	$R1$	Вихід DM	кг/с	Авт.	Неперервно	7,8 – 8,88	Ні	–	Ні	–	–	–	–
11	Температура суміші сировини й розчинника $MS1$	Θ_{ms1}	$MS1$	DM	$R1$	Вихід DM	°C	Авт.	Неперервно	80 – 120	Так	–	Ні	–	–	–	–
12	В'язкість суміші сировини й розчинника $MS1$	V_{w1}	$MS1$	DM	$R1$	Вихід DM	мм ² /с	Авт.	Неперервно	6 – 16	Так	T_{M1}	Так	Неприпустима в'язкість $MS1$	Неприпустима в'язкість $MS2$	0,8	+
13	Витрата води $W1$	F_{w1}	$W1$	Ємність	$R1$	Трубопровід	кг/с	Авт.	Неперервно	7,1 – 7,3	Ні	–	Так	Неприпустима витрата $W1$	Неприпустима температура $MS2$ Неприпустима в'язкість $MS2$	1 0,7	–

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
14	Температура води $W1$	Θ_{w1}	$W1$	Ємність	$R1$	Трубопровід	°C	Авт.	Неперервно	20 – 30	Ні	–	Так	Неприпустима температура $W1$	Неприпустима температура $MS2$	1	–
															Неприпустима в'язкість $MS2$	0,7	
15	Витрата води $W2$	F_{w2}	$W2$	$R1$	Ємність	Трубопровід	кг/с	Авт.	Неперервно	7,1 – 7,3	Ні	–	Ні	–	–	–	–
16	Температура води $W2$	Θ_{w2}	$W2$	$R1$	Ємність	Трубопровід	°C	Авт.	Неперервно	20 – 30	Ні	–	Ні	–	–	–	–
17	Витрата охолодженої суміші сировини й розчинника $MS2$	F_{ms}	$MS2$	$R1$	Ad	Трубопровід	кг/с	Авт.	Неперервно	7,8 – 8,88	Ні	–	–	–	–	–	–
18	Температура охолодженої суміші сировини й розчинника $MS2$	Θ_{ms2}	$MS2$	R	Ad	Трубопровід	°C	Авт.	Неперервно	35 – 45	Так	V_{M2}	Так	Неприпустима температура $MS2$	Неприпустима температура в адсорбері	1	–
19	В'язкість охолодженої суміші сировини й розчинника $MS2$	V_{ms}	$MS2$	R	Ad	Трубопровід	мм²/с	Авт.	Неперервно	4 – 14	Так	T_{SOL1}	Так	Неприпустима в'язкість $MS2$	Неприпустима в'язкість RS	0,8	+
20	Витрата розчинника на гідрозатор $SOL2$	F_{sol2}	$SOL2$	Ємність	Ad	Трубопровід	кг/с	Авт.	Періодично	4,875 – 4,935	Ні	–	Так	Витрата $SOL2 > 4,935$ кг/с	Рівень $L_2 > 1$ м	0,1	–
21	Температура розчинника на гідрозатор $SOL2$	Θ_{sol2}	$SOL2$	Ємність	Ad	Трубопровід	°C	Авт.	Періодично	30 – 40	Ні	–	Ні	–	–	–	–
22	Витрата розчину рафінату I RS	F_{rs}	RS	Ad	Ємність	Трубопровід	кг/с	Авт.	Неперервно	4,17 – 4,37	Ні	–	Так	Витрата $RS < 4,17$ кг/с	Порушення технологічного режиму	1	–
23	Температура розчину рафінату I RS	Θ_{rs}	RS	Ad	Ємність	Трубопровід	°C	Авт.	Неперервно	35 – 45	Так	T_{A1}	Ні	–	–	–	–
24	В'язкість розчину рафінату I RS	V_{rs}	RS	Ad	Ємність	Трубопровід	мм²/с	Авт.	Неперервно	4 – 14	Так	T_{A1}	Так	Неприпустима в'язкість RS	Брак продукту	1	+
25	Вміст ароматичних вуглеводнів AH	$C_{rs,ah}$	RS	Ad	Ємність	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	9 – 17	Так	T_{A1}	Так	Високий вміст AH	Брак продукту	1	+
26	Вміст сірки S	$C_{rs,s}$	RS	Ad	Ємність	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	0,1 – 0,5	Так	T_{A1}	Так	Високий вміст S	Брак продукту	1	+
27	Вміст смол RS, r	$C_{rs,r}$	RS	Ad	Ємність	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	1 – 3	Так	T_{A1}	Так	Високий вміст r	Брак продукту	1	+
28	Колір C	C_c	RS	Ad	Ємність	Трубопровід	од. ЦНТ	Авт.	Неперервно	1,0 – 1,5	Так	$C_{rs,s}, C_{rs,r}$	Так	Висока марка кольору	Брак продукту	1	–
29	Тиск Ad	P_{ad}	Ad	$R1$	Десорбер	Ad	МПа	Авт.	Неперервно	0,5 – 1,6	Ні	Θ_{ad}	Так	Високий тиск в адсорбері	Низька швидкість адсорбції	0,6	–
30	Температура адсорбції Ad	Θ_{ad}	Ad	$R1$	Десорбер	Ad	°C	Авт.	Неперервно	35 – 45	Так	Θ_{ms}, Θ_{ad}	Так	Неприпустима температура Ad	Вміст $AH > 17$ %	1	–
															Вміст $S > 0,5$ %		
															Вміст $r > 3$ %		
															Марка кольору $> 1,5$ од. ЦНТ		
															Неприпустима в'язкість RS		

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
31	Рівень Ad	L_1	Ad	$R1$	Десорбер	Ad	м	Авт	Неперервно	3,5 – 3,6	Ні	–	Так	Значення рівня $Ad > 3,6$ м	Захлинання адсорбера	1	–
														Значення рівня $Ad < 3,6$ м	Нераціональне використання енергоресурсів у зв'язку з розузгодженістю продуктивності апаратів у системі	1	–
32	Швидкість Ad	S_1	Ad	$R1$	Десорбер	Ad	м/год	Авт	Неперервно	1 – 2,5	Ні	–	Так	Низька швидкість адсорбції	Витрата $RS < 4,17$ кг/с	1	–
33	Рівень $SOL2$	L_2	$SOL2$	$R1$	Десорбер	Ad	м	Авт	Неперервно	0,8 – 1,0	Ні	–	Так	Рівень $L_2 > 1$ м	Втрата сировини RM з суспензії ($SOL1, A$)	1	–
34	Співвідношення витрат адсорбенту й сировини	$F_a:F_m$	Ad	Ad	Десорбер	Ad	кг/с	Авт.	Неперервно	1:1,5	Ні	–	Так	Порушення співвідношення витрат адсорбенту й сировини	Вміст $AH > 17$ %	0,5	+
															Вміст $S > 0,5$ %		
															Вміст $r > 2,6$ %		
															Марка кольору $> 1,5$ од. ЦНТ	0,5	+
35	Співвідношення витрат розчинника й сировини	$F_{sol1}:F_m$	$MS1$	Ємність	DM	Ad	кг/с	Авт.	Неперервно	0,8:1	Ні	–	Так	Порушення співвідношення витрат розчинника й сировини	Неприпустима в'язкість $MS1$	1	+
36	Витрата адсорбенту A	F_a	A	Бункер	Ad	Трубопровід	кг/с	Авт.	Неперервно	3 – 3,59	Ні	–	Так	Низька витрата A	Брак продукту	1	–
														Висока витрата A	Високий перепад тиску в адсорбері	0,9	–
37	Температура адсорбенту A	Θ_a	A	Бункер	Ad	Трубопровід	°C	Авт.	Неперервно	35 – 45	Так	Θ_{ad}	Так	Неприпустима температура A	Неприпустима температура в адсорбері	0,4	–
38	Вологовміст адсорбенту A	M_a	A	Бункер	Ad	Трубопровід	кг/кг	Авт.	Неперервно	0,08 – 0,1	Так	–	Ні	–	–	–	–

Закінчення таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
39	Вміст ароматичних вуглеводнів $AH2$	$C_{a,ah}$	A	Бункер	Ad	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	0	Так	$C_{a,s}, C_{a,r}$	Так	Присутні AH	Вміст $AH > 17$ %	0,9	+
															Вміст $S > 0,5$ %		
															Вміст $r > 3$ %		
															Марка кольору $> 1,5$ од. ЦНТ		
40	Вміст сірки $S2$	$C_{a,s}$	A	Бункер	Ad	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	0	Так	$C_{a,ahs}, C_{a,r}$	Так	Присутня S	Вміст $AH > 17$ %	0,9	+
															Вміст $S > 0,5$ %		
															Вміст $r > 3$ %		
															Марка кольору $> 1,5$ од. ЦНТ		
41	Вміст смол $r2$	$C_{a,r}$	A	Бункер	Ad	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	0	Так	$C_{a,ahs}, C_{a,s}$	Так	Присутні r	Вміст $AH > 17$ %	0,9	+
															Вміст $S > 0,5$ %		
															Вміст $r > 3$ %		
															Марка кольору $> 1,5$ од. ЦНТ		
42	Витрата забрудненого адсорбенту $CA1$	F_{ca}	CA1	Ad	Десорбер	Трубопровід	кг/с	Авт.	Неперервно	3,29 – 3,4	Ні	–	Ні	–	–	–	–
43	Температура забрудненого адсорбенту $CA1$	Θ_{ca}	CA1	Ad	Десорбер	Трубопровід	°C	Авт.	Неперервно	40 – 45	Так	M_{ca}	Ні	–	–	–	–
44	Вологовміст забрудненого адсорбенту $CA1$	M_{ca}	CA1	Ad	Десорбер	Трубопровід	кг/кг	Авт.	Неперервно	0,9 – 0,95	Так	Θ_{ca}	Ні	–	–	–	–
45	Вміст ароматичних вуглеводнів $AH3$	$C_{ca,ah}$	CA1	Ad	Десорбер	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	60 – 70	Так	$C_{ca,ahs}, C_{ca,r}$	Ні	Низький вміст $AH3$	Нераціональне використання адсорбенту	0,5	–
46	Вміст сірки $S3$	$C_{ca,s}$	CA1	Ad	Десорбер	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	0,5 – 0,6	Так	$C_{ca,ahs}, C_{ca,r}$	Ні	Низький вміст $S3$	Нераціональне використання адсорбенту	0,5	–
47	Вміст смол $r3$	$C_{ca,r}$	CA1	Ad	Десорбер	Трубопровід	%	Авт.	Неперервно	5,3 – 5,7	Так	$C_{ca,ahs}, C_{ca,s}$	Ні	Низький вміст $r3$	Нераціональне використання адсорбенту	0,5	–

ДОДАТОК Г

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан інженерно-хімічного факультету
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



Панов Є.М.

АКТ

про використання в навчальному процесі кафедри технічних і програмних засобів автоматизації ІХФ Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
результатів дисертаційної роботи Тюріної Є.О. на тему
«Моделювання та керування адсорбційним очищенням олив та мастил»

Комісія у складі в. о. завідувача кафедри ТПЗА ІХФ к.т.н, доц. Цапара В.С. (голова комісії) та викладачів кафедри: к.т.н, доц. Складанного Д.М., к.т.н., доц. Сазонова А.Ю. розглянула можливість використання результатів дисертаційної роботи Тюріної Є.О. у навчальному процесі для підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальностями 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

За результатами роботи комісії рекомендовано використовувати матеріали дисертаційної роботи Тюріної Є.О. при проведенні лекційних занять та практикумів таких дисциплін, як «Проектування інформаційних систем», «Адаптивні та інтелектуальні системи керування»; «Статистичні методи досліджень об'єктів та систем – керування»; «Математичні методи інтелектуального керування».

Результати досліджень Тюріної Є.О. вже використовуються у навчальному процесі у дисциплінах «Проектування інформаційних систем – 1. Бази даних» (використання бази даних при пошуку сировин – аналогів в режимі змінної сировини) та «Статистичні методи досліджень об'єктів та систем керування» (застосування статистичних методів при керуванні в режимі змінної сировини та ідентифікації моделей адсорбції в режимі сталої сировини).

Заплановано використання матеріалів дисертації в навчальному посібнику до курсу «Статистичні методи досліджень об'єктів та систем керування».

Голова комісії

К.Т.Н., доц.

(науковий ступінь, вчене звання)

Віталій ЦАПАР

Члени комісії

К.Т.Н., доц.

(науковий ступінь, вчене звання)

Артем САЗОНОВ

К.Т.Н., доц.

(науковий ступінь, вчене звання)

Денис СКЛАДАННИЙ