

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 665.666.2

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ А.І.Жученко
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ 20 ” травня 2019 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології

(код і назва)

на тему: Керування хіміко-технологічною системою адсорбційного очищення олив та мастил

Виконала: студентка II курсу, групи ЛА-71мн

(шифр групи)

_____ Тюріна Євгенія Олександрівна

(прізвище, ім’я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник _____ доцент, к.т.н., доцент Ярощук Л.Д.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент

_____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ А.І.Жученко
(підпис) (ініціали, прізвище)

«14» березня 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Тюріній Євгенії Олександрівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Керування хіміко-технологічною системою адсорбційного очищення олив та мастил.

науковий керівник дисертації Ярошук Людмила Дем'янівна, к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «13» 03 2019 р. № 881-с

2. Термін подання студентом дисертації 20 травня 2019 р.

3. Об'єкт дослідження Хіміко-технологічна система адсорбційного очищення олив та мастил

4. Предмет дослідження Автоматизована система керування технологічним процесом адсорбційного очищення олив та мастил з урахуванням положень концепції сталого розвитку

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Дослідження хіміко-технологічної системи по очищенню олив та мастил адсорбентами як об'єкта автоматизації та з позиції документів сталого розвитку; аналіз існуючих систем керування процесами адсорбції, формування сукупності задач оптимального керування в режимі нормальної експлуатації та з урахуванням положень зазначеної концепції; створення бази даних нормативних документів, які стосуються відповідного виробництва в контексті сталого розвитку; створення аналітичної та імітаційної моделей процесу адсорбції; створення автоматизованої системи керування технологічним процесом

адсорбційного очищення олив та мастил з урахуванням положень концепції сталого розвитку; розроблення стартап-проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Технологічна схема процесу; схема бази даних; схема автоматизації технологічного процесу.

7. Орієнтовний перелік публікацій Спосіб автоматичного керування процесом очищення олив та мастил адсорбентами; Врахування стратегії сталого розвитку при автоматизації очищення олив та мастил адсорбентами; Аналіз процесів адсорбції та способи керування ними; Задачі керування процесом очищення масел адсорбентами в режимі нормальної експлуатації; Нечітка система керування технологічним процесом очищення олив і мастил адсорбентами; Структура бази даних документів сталого розвитку як елемента системи автоматизації технологічного процесу очищення олив та мастил.

8. Дата видачі завдання 18 березня 2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Дослідження процесу адсорбційного очищення олив та мастил як об'єкта автоматизації та з позиції документів сталого розвитку.	22.03.2019	
2	Формування сукупності задач оптимального керування виробництвом у режимі нормальної експлуатації та з урахуванням основних положень зазначеної концепції.	29.03.2019	
3	Створення бази даних нормативних документів, які стосуються положень концепції сталого розвитку	03.04.2019	
4	Створення математичних моделей статичного й динамічного режимів роботи адсорбера, а також імітаційних	09.04.2019	
5	Ідентифікація адсорбера шляхом проведення активного та пасивного експериментів	23.04.2019	
6.	Створення автоматизованої системи керування процесом очищення з урахуванням положень концепції сталого розвитку	25.04.2019	
7.	Розроблення систем керування процесом очищення з урахуванням декількох показників якості вихідного продукту	03.05.2019	
8	Розроблення стартап-проекту	13.05.2019	

Студент

_____ (підпис)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

Є. О. Тюріна
(ініціали, прізвище)

Л. Д. Ярошук
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація, виконана на тему «Керування хіміко-технологічною системою адсорбційного очищення олив та мастил», містить пояснювальну записку обсягом 133 сторінки, 62 рисунка, 22 таблиці, 1 креслення, 4 додатка й 37 літературних джерел.

Метою проекту є розроблення автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСКТП) адсорбційного очищення олив та мастил, яка забезпечить виконання вимог, встановлених до якості оливи або мастила, з урахуванням положень концепції сталого розвитку (СР) щодо припустимих концентрацій шкідливих речовин, які можуть утворюватися на виробництві та/або виділятися в атмосферу.

Об'єкт дослідження – хіміко-технологічна система (ХТС) адсорбційного очищення олив та мастил.

Предмет дослідження – система керування процесом очищення олив та мастил, призначена для врахування положень концепції сталого розвитку.

У магістерській дисертації досліджена ХТС по очищенню олив та мастил як об'єкт автоматизації та з позиції документів СР, сформовані задачі оптимального керування в режимі нормальної експлуатації та з урахуванням положень концепції СР. Розроблена структура бази даних документів СР, що стосуються зазначеного виробництва. Проаналізовано адсорбер як об'єкт моделювання й створені моделі аналітичні та імітаційні. Запропонована АСКТП адсорбційного очищення олив та мастил, яка дозволить отримати продукт належної якості з підвищенням економічної ефективності виробництва та забезпеченням стабілізації концентрацій шкідливих речовин в атмосфері на рівні, який запобігатиме небезпечному антропогенному їх впливу на кліматичну систему. Розроблений стартап-проект.

Відповідно до теми магістерської дисертації надруковано розроблено 1 патент, надруковано 1 статтю та 5 тез у матеріалах конференцій.

Ключові слова: оливи, мастила, сталий розвиток, шкідлива речовина, адсорбція, оптимізація, автоматизація, керування, математична модель, база даних, нечітка система.

ABSTRACT

A master's thesis is performed on the theme "Control of chemical-engineering system of oil and grease purification with adsorbents" and it contains an explanatory note in the volume of 133 pages, 62 figures, 22 tables, 1 drawing, 4 addendums and 37 literature sources.

The aim of the project is to develop an automated process control system (APCS) of adsorption oil and grease purification, which will ensure compliance with the requirements set for the quality of oil or grease, taking into account the provisions of the sustainable development (SD) concept regarding the permissible concentrations of harmful substances that can be produced in the production and/or stand out in the atmosphere.

The object of research is the chemical-technological system (CTS) of adsorption oil and grease purification.

The subject of research is a process control system of oil and grease purification, designed to take into account the provisions of SD concept.

In the master's thesis CTS for oil and grease purification was researched as an automation object and from the position of SD documents, also were formed the set of optimal control tasks in normal operation mode and taking into account the provisions of the SD concept. Structure of the database of sustainable development documents related to the specified production was developed. Adsorber was analyzed as an modeling object and were created analytical and simulation models. The APCS of adsorption oil and grease purification will allow to obtain the product of proper quality with increasing of the production economic efficiency and ensuring the stabilization of harmful substances concentrations in the atmosphere at a level that prevents dangerous anthropogenic impacts on the climate system. A startup project was designed.

In accordance with the master's thesis theme, 1 patent was developed, 1 article and 5 abstracts were published in the materials of the conferences.

Keywords: oil, grease, sustainable development, harmful substance, adsorption, optimization, automation, control, mathematical model, database, fuzzy system.

ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
1. ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА ПО ОЧИЩЕННЮ ОЛИВ ТА МАСТИЛ ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ	12
1.1. Опис технологічної схеми виробництва	12
1.2. Аналіз адсорбера як об'єкта керування	15
1.3. Аналіз існуючих систем автоматизації адсорберів	21
1.4. Постановка задачі дослідження	27
2. ВРАХУВАННЯ ПОЛОЖЕНЬ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ПРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ОЛИВ ТА МАСТИЛ	28
2.1. Особливості ХТС очищення олив та мастил адсорбентами з позиції документів сталого розвитку	28
2.2. Декомпозиція ХТС та постановка задач оптимального керування із врахуванням концепції сталого розвитку	33
2.3. Алгоритм керування технологічним процесом очищення олив та мастил адсорбентами в контексті сталого розвитку	46
2.4. Структура бази даних документів сталого розвитку як елемента системи автоматизації технологічного процесу очищення олив та мастил	48
Висновки до розділу 2	52
3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ОЛИВ ТА МАСТИЛ В АДСОРБЕРІ	53
3.1. Аналіз існуючих математичних моделей адсорберів	54
3.2. Особливості процесу адсорбції як об'єкта моделювання	59
3.2.1. Модель статичного режиму об'єкта керування	62
3.2.2. Модель динамічного режиму об'єкта керування	66
3.2.3. Імітаційне моделювання процесу адсорбції	72

3.3. Організація експериментальних досліджень для ідентифікації об'єкта керування	74
Висновки до розділу 3	87
4. СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ОЧИЩЕННЯ ОЛИВ ТА МАСТИЛ З УРАХУВАННЯМ ПОЛОЖЕНЬ КОНЦЕПЦІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТА ПОТОЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ	88
4.1. Структура АСКТП адсорбційного очищення олив та мастил	88
4.2. Локальні САК як елементи системи автоматизації технологічного процесу очищення олив та мастил	89
4.2.1. Система керування адсорбером з типовими законами керування	95
4.2.2. Нечітка система керування процесом адсорбції	97
Висновки до розділу 4	104
5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	105
5.1. Ідея та опис стартапу	105
5.2. Аудит динаміки й основних тенденцій ринку мастильних матеріалів	107
5.3. Аналіз маркетингового середовища підприємства	108
5.3.1. Аналіз внутрішнього середовища	109
5.3.2. Аналіз зовнішнього маркетингового середовища	112
5.3.3. Аналіз факторів мікроринкового середовища	115
5.3.4. Формування управлінської проблеми	118
5.4. Конкурентний аналіз компанії	120
5.5. Ринкові стратегії стартап-проекту	124
Висновки до розділу 5	125
ВИСНОВКИ	126
ЛІТЕРАТУРА	128
ДОДАТКИ	134
Додаток 1. Основні параметри статичного режиму	135
Додаток 2. Лінеаризація системи нелінійних диференціальних рівнянь моделі динамічного режиму об'єкта керування	138

Додаток 3. Лістинг програми, що реалізує побудову моделей динамічного режиму за каналами керування	145
Додаток 4. Експериментальні дані процесу адсорбції при зміні витрати адсорбенту від 2,33 кг/с до 3,33 кг/с	150

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ООН – Організація Об'єднаних Націй;

СР – сталий розвиток;

ВМ – відпрацьовані мастила;

АСКТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

ХТС – хіміко-технологічна система;

ДЕСТ – державний стандарт;

ГДК – граничнодопустима концентрація;

ПГ – парникові гази;

КП – Кіотський протокол;

КП1 – перший період дії Кіотського протоколу;

КП2 – другий період дії Кіотського протоколу;

САК – система автоматичного керування;

ЕОМ – електронна обчислювальна машина;

БД – база даних;

ОК – об'єкт керування;

ТОК – технологічний об'єкт керування.

ВСТУП

Нафтові оливи широко використовують у сучасній хімічній промисловості. З кожним роком збільшуються обсяги споживання мастильних матеріалів і, як наслідок, відпрацьованих олив. Разом з тим, у процесі їх адсорбційного очищення у навколишнє середовище виділяються небезпечні речовини, які негативно впливають на стан планети. Тому актуальними постають питання розроблення стратегії розвитку суспільства для його задовільного існування в майбутньому – концепції сталого розвитку. Задачами останньої є забезпечення належного ступеня очищення вихідного продукту від смолистих речовин, кислот та інших домішок, що утворилися в результаті старіння олив при їх експлуатації, підвищення економічної ефективності відповідного виробництва з багаторазовою регенерацією адсорбенту й розчинника [1] та стабілізації концентрацій забруднювачів в атмосфері на такому рівні, який запобігатиме небезпечному антропогенному їх впливу на кліматичну систему.

Концепція сталого розвитку системно поєднала три головні компоненти розвитку суспільства: економічну, екологічну та соціальну. У 1992 та 2002 роках всесвітніми самітами ООН (за участі понад 180 країн) були зроблені узагальнення цієї концепції. **Економічний підхід** передбачає функціонування змішаної економіки, оптимальне поєднання різних форм власності, конкурентне середовище та антимонопольне законодавство, наявність сукупності ринків (товарів і послуг, капіталів, нерухомості, та ін.). **Екологічна складова** СР має забезпечити коеволюцію людини і біосфери, розроблення практичних методів ефективного використання природних ресурсів, використання маловідходних та безвідходних технологій, широке впровадження біотехнологій і поступовий перехід від енергетики органічного палива до альтернативної (використання відновлюваних джерел). **Соціальна складова** сталого розвитку спрямована на забезпечення стабільності соціальних систем, збереження культурного спадку й різноманіття в

глобальних масштабах. Важливим є інформаційний аспект програми СР, який спрямований на матеріалізацію досягнень науки, широку інформатизацію суспільства, масове застосування електронних засобів зв'язку та обміну інформацією.

Впровадження концепції сталого розвитку розглянуто у численних публікаціях, зокрема їм присвятили свої дослідження Згуровський М. З. [2, 3], Костін А. І. [4], Урсул А. Д. [5], Урсул Т. А. [5], Стегней М. І. [6], Щукіна Л. В. [7], Гречаник Н. Ю. [8], Пакулін С. Л. [9], Тибінь А. М. [10], Смачило І. І. [10, 11], Зачиняєв Я. В. [12].

У працях [2–5] розглянуті основні теоретичні положення концепції сталого розвитку та шляхи їх реалізації з точки зору цивілізації. У [6, 7] запропоновані теоретичні основи досягнення СР на регіональному рівні. Реалізацію положень сталого розвитку на рівні підприємств розглянуто у працях [8–11].

Дослідження, описані у [12], дозволили автору вибрати оптимальні технології та методи очищення ВМ з точки зору впливу на оточуюче середовище, але без врахування економічної складової концепції сталого розвитку.

Отже, важливим є розроблення такої автоматизованої системи керування технологічним процесом очищення нафтових олив та мастил, яка б забезпечувала виконання умов, встановлених до них, як до продукту виробництва та багаторазову регенерацію адсорбенту з метою підвищення економічної ефективності виробництва в цілому.

1. ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА ПО ОЧИЩЕННЮ ОЛИВ ТА МАСТИЛ ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Адсорбційний метод очищення за неперервним циклом застосовують для очищення низькоплавких парафінів, виділених з дизельних палив, від ароматичних вуглеводнів. Цей метод прийнято до впровадження також і для очищення мастил. Значною перевагою такого методу очищення перед іншими є мінімальні виробничі втрати, які визначаються кількістю випалюваних з адсорбенту смол, і отримання нового продукту – високоароматизованого рафінату, що містить невелику кількість парафінових і нафтових вуглеводнів. Цей рафінат може бути використаний як сировина для нафтохімічної промисловості (пластифікатор, наповнювач для синтетичного каучуку та гумотехнічних виробів тощо) [13, 14].

При нагріванні трансформаторних олив 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 масел, оскільки потрібні додаткове обладнання та значні витрати робочої сили.

1.1. Опис технологічної схеми виробництва

Розглянемо технологічний процес адсорбційного очищення олив та мастил як об'єкт автоматизації, схема якого зображена на рис. 1.1. Надамо його опис.

Очищений продукт сировинним насосом направляють у діафрагмовий змішувач 1, де його змішують з необхідною кількістю розчинника. Розчин охолоджують у холодильнику 2 до 40 °С і направляють в адсорбер 3, по перетину якого розташований перфорований маточник, що забезпечує рівномірний розподіл 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.

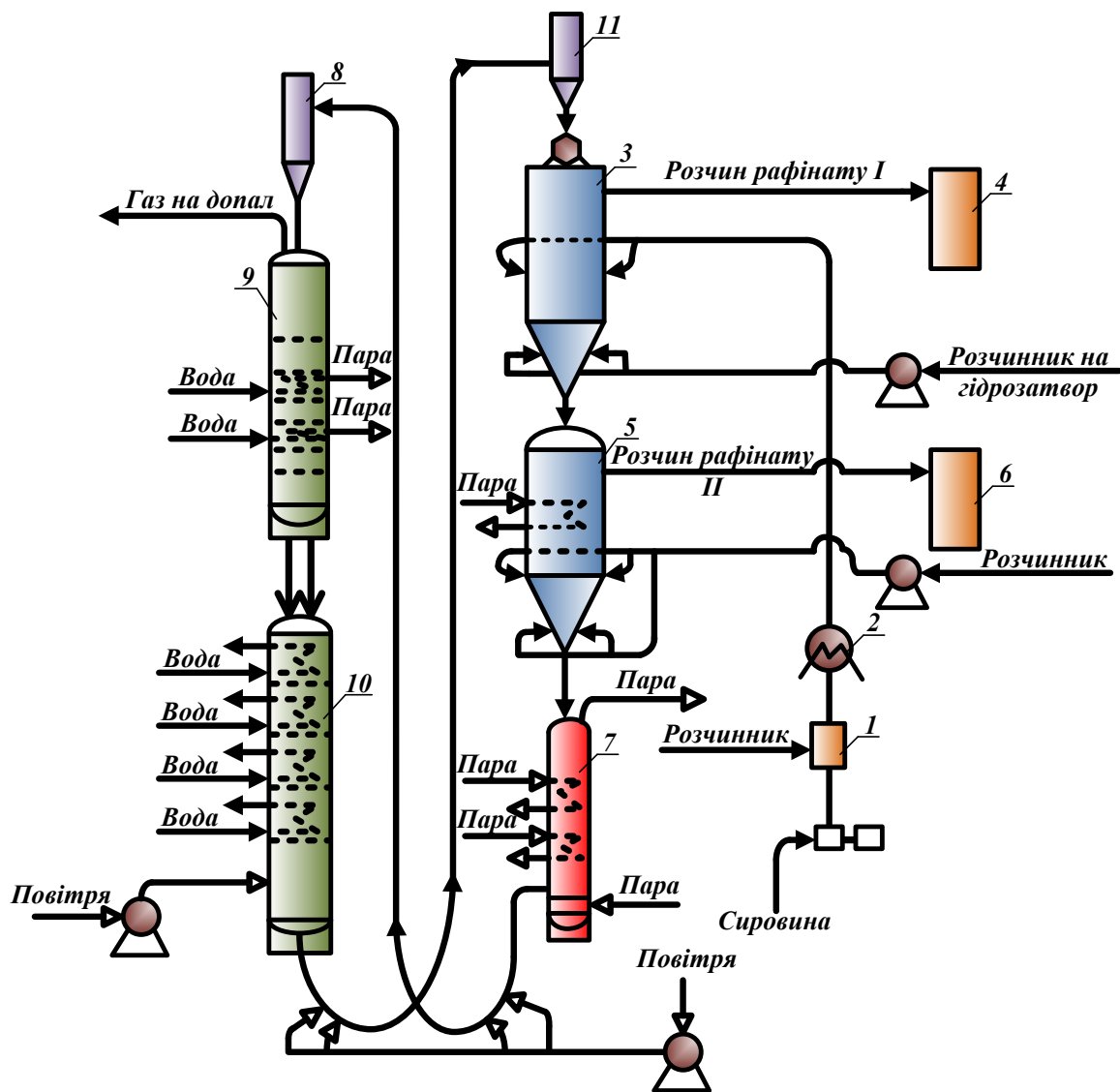


Рисунок 1.1 – Технологічна схема процесу очищення олив та мастил адсорбентами:
1 – діафрагмовий змішувач; 2 – холодильник; 3 – адсорбер; 4, 6 – резервуари; 5 – десорбер; 7 – сушарка; 8, 11 – бункери; 9 – регенератор; 10 – чотириступеневий холодильник

Адсорбент, насичений ароматичними вуглеводнями і смолами, виходить з адсорбера 3 через штуцер у кінці дна 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 вирівнюючим 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 парою.

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-протиструминну сушарку 7 з киплячим шаром, де адсорбент висушують у дві ступені при температурі 150 °С. Кипіння створюють парою під тиском 10 ат. Тепло для сушіння передають парою під тиском 18 ат через обігрівальні змійовики.

З сушарки 7 адсорбент подають пневмотранспортом у бункер 8 і звідти в регенератор 9, де смоли випалюють. Регенований адсорбент з температурою 650 °С направляють у нижче розташований чотириступеневий холодильник 10, де його охолоджують у киплячому шарі. Охолоджений адсорбент по системі пневмотранспорту спрямовують 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 [13].

1.2. Аналіз адсорбера як об'єкта керування

Адсорбція – процес поглинання газів, парів або рідин поверхнею пористих твердих тіл – адсорбентів. Процеси адсорбції є виборчими та оборотними, тобто адсорбент має здатність поглинати лише певні речовини й не поглинати (або в незначній кількості) інші речовини, що містяться в газовій суміші або розчині, а поглинена речовина може бути виділена з адсорбенту шляхом десорбції – процесу, зворотного адсорбції [15].

Показником ефективності процесу є концентрація Y компонента, що витягують зі збідненої газової суміші, а метою управління – досягнення певного (мінімально можливого для даних виробничих умов) значення цієї концентрації. Наведемо на рисунку 1.2 параметричну схему процесу.

В апарат надходять фаза G (газ) та фаза L (адсорбент). Компонент, що адсорбують, переходить з фази G у фазу L (його вилучають з газової суміші адсорбентом). Вміст цього компонента у фазі G зменшується з Y_1 (на вході в апарат) до Y_2 (на виході з апарату). Відповідно вміст цього ж компонента у фазі L збільшується з X_1 (на вході в апарат) до X_2 (на виході з апарату).

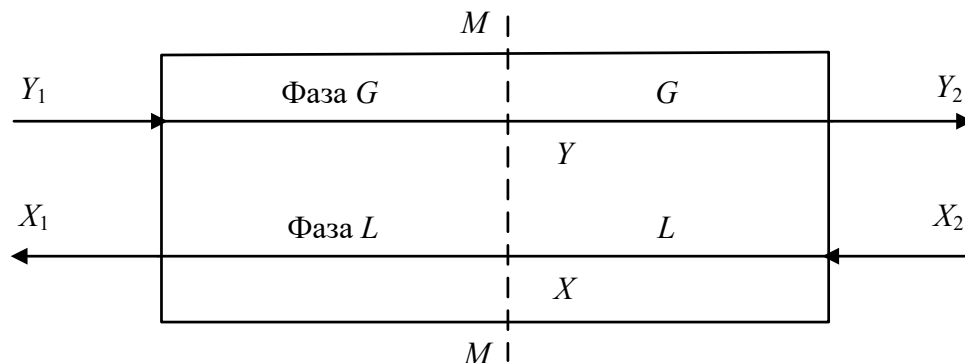


Рисунок 1.2 – Параметрична схема процесу адсорбції

Основні фактори, що впливають на адсорбцію, – властивості адсорбенту та речовин, що поглинають, склад фази, з якої речовини адсорбують, витрата адсорбенту, температура та тиск в апараті.

Незалежно від природи сил, які діють у процесі адсорбції, при достатньому часі зіткнення фаз і постійній температурі настає адсорбційна (статична) рівновага і встановлюється певне рівноважне співвідношення між

концентрацією речовини, яку адсорбують, у твердій і газовій (рідинній) фазах [16].

У загальному ця залежність має вигляд:

$$\bar{X} = f(\bar{Y}, T), \quad (1.1)$$

де \bar{X} – рівноважна концентрація речовини, яку адсорбують, у твердій фазі; \bar{Y} – рівноважна концентрація речовини, яку адсорбують, у газовій фазі, T – температура адсорбції.

Часто рівноважну залежність виражають у вигляді функції \bar{X} від парціального тиску P речовини, яку адсорбують, у газі:

$$\bar{X} = f(P, T). \quad (1.2)$$

При постійній температурі рівняння (1.1) і (1.2) мають вигляд:

$$\bar{X} = f(\bar{Y}), \quad (1.3)$$

$$\bar{X} = f(P), \quad (1.4)$$

Крива, що описує залежність (1.3) або (1.4) при досягненні рівноваги, називають ізотермою адсорбції.

Найбільш поширеною є хімічна теорія опису процесу адсорбції (рівняння Ленгмюра) [16].

Теорію Ленгмюра базують на таких основних положеннях [17]:

1. адсорбція відбувається на дискретних адсорбційних центрах (локалізована адсорбція);
2. при адсорбції дотримуються чітко стехіометричної умови – на одному центрі адсорбують одну молекулу;
3. адсорбційні центри енергетично еквівалентні й незалежні, тобто адсорбція на одному центрі не впливає на процес, який перебігає на інших;
4. процес адсорбції знаходиться в динамічній рівновазі з процесом десорбції.

Розрахункове рівняння ізотерми адсорбції Ленгмюра [16]:

$$a = \frac{ABP}{1 + AP}, \quad (1.5)$$

де a – кількість речовини (адсорбтива), яку поглинено одиницею маси або об'єму адсорбенту у стані рівноваги; A і B – постійні, що залежать від властивостей адсорбенту і речовини, яку адсорбують; їх визначають дослідним шляхом; P – парціальний тиск компонента, який адсорбують, у парогазовій фазі.

Залежно від величини парціального тиску P компонента, який адсорбують, у парогазовій фазі, ізотерму Ленгмюра розділяють на три області.

1. Область малих парціальних тисків P . У такому випадку величиною AP у знаменнику нехтують і залежність (1.5) має вигляд:

$$a = ABP, \quad (1.6)$$

2. Область високих парціальних тисків P . При великих значеннях величини AP одиницею в знаменнику можна знехтувати. Тоді формула (1.5) має вигляд:

$$a = B, \quad (1.7)$$

3. У проміжній області середніх парціальних тисків спрощень у формулі (1.5) провести не можна.

В основі рівняння Ленгмюра лежить припущення про наявність мономолекулярної адсорбції (на поверхні адсорбенту може створюватися лише один адсорбційний шар), тому воно задовільно охоплює експериментальні дані тільки для ізотерм першого типу (рис. 1.3), які характерні для мікропористих адсорбентів. При полімолекулярній адсорбції рівняння Ленгмюра непридатне.

У випадку малих ступенів покриття поверхні речовини, яку поглинають поверхнею адсорбенту (адсорбату), для математичного опису процесу адсорбції використовують рівняння Генрі:

$$X = AY, \quad (1.8)$$

де X – концентрація речовини, що адсорбують; Y – рівноважна концентрація речовини, яку поглинає адсорбент у газовій суміші; A – коефіцієнт, який визначають дослідним шляхом.

Концентрація речовини, яку адсорбують, у суміші при постійній температурі пропорційна його тиску. Тому рівняння (1.8) можна подати у такому вигляді:

$$X = A_1 P, \quad (1.9)$$

де A_1 – коефіцієнт пропорційності; P – рівноважний тиск речовини, яку поглинають, у парогазовій суміші.

У випадку середніх ступенів покриття поверхні адсорбату, для математичного опису ізотерми адсорбції використовують рівняння Фрейндліха. Через певний час з моменту взаємодії речовин настає рівновага, під час якої встановлюється певна залежність між концентрацією речовини, що адсорбують, X та її концентрацією Y у фазі, що стикається з адсорбентом [15]:

$$X = A_3 Y^{1/n}, \quad (1.10)$$

де Y – рівноважна концентрація речовини, яку поглинає адсорбент у газовій суміші; A_3, n – коефіцієнти, що визначають дослідним шляхом ($n \geq 1$).

Ця залежність відповідає певній температурі (причому при постійній температурі концентрація компонента у газовій суміші пропорційна його тиску) [15, 18].

Відповідно до попереднього методу математичного опису зазначеного процесу, рівняння (1.10) можна представити у вигляді:

$$X = A_4 P^{1/n}, \quad (1.11)$$

де A_4 – коефіцієнт пропорційності; P – рівноважний тиск речовини, яку поглинають, у парогазовій суміші.

Наведемо ізотерми адсорбції деяких речовин для рівноважних залежностей типу (1.3) і (1.4) на рис. 1.3 і 1.4 відповідно.

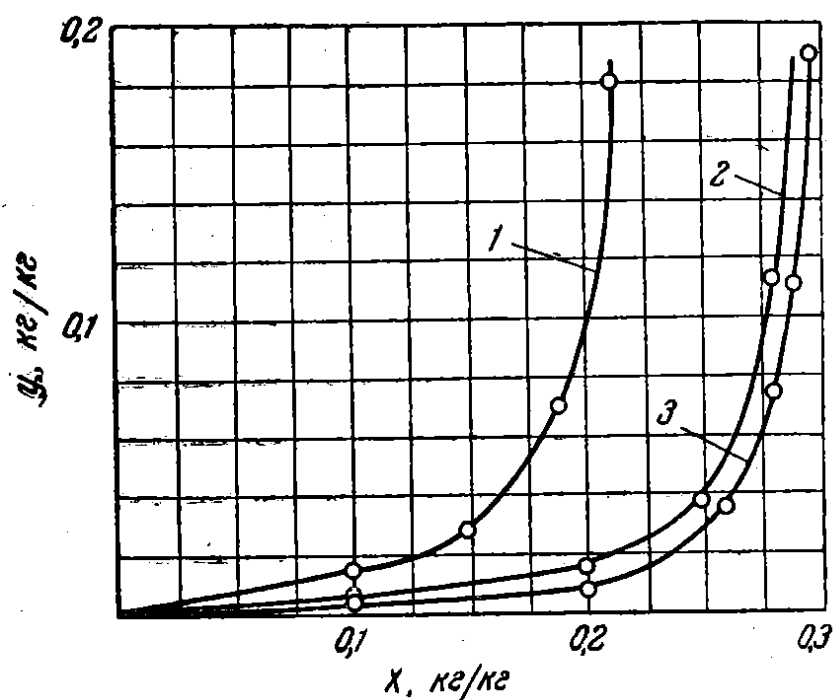


Рисунок 1.3 – Ізотерми адсорбції (при 20 °С):
1 – для етилового ефіру; 2 – для етилового спирту; 3 – для бензолу

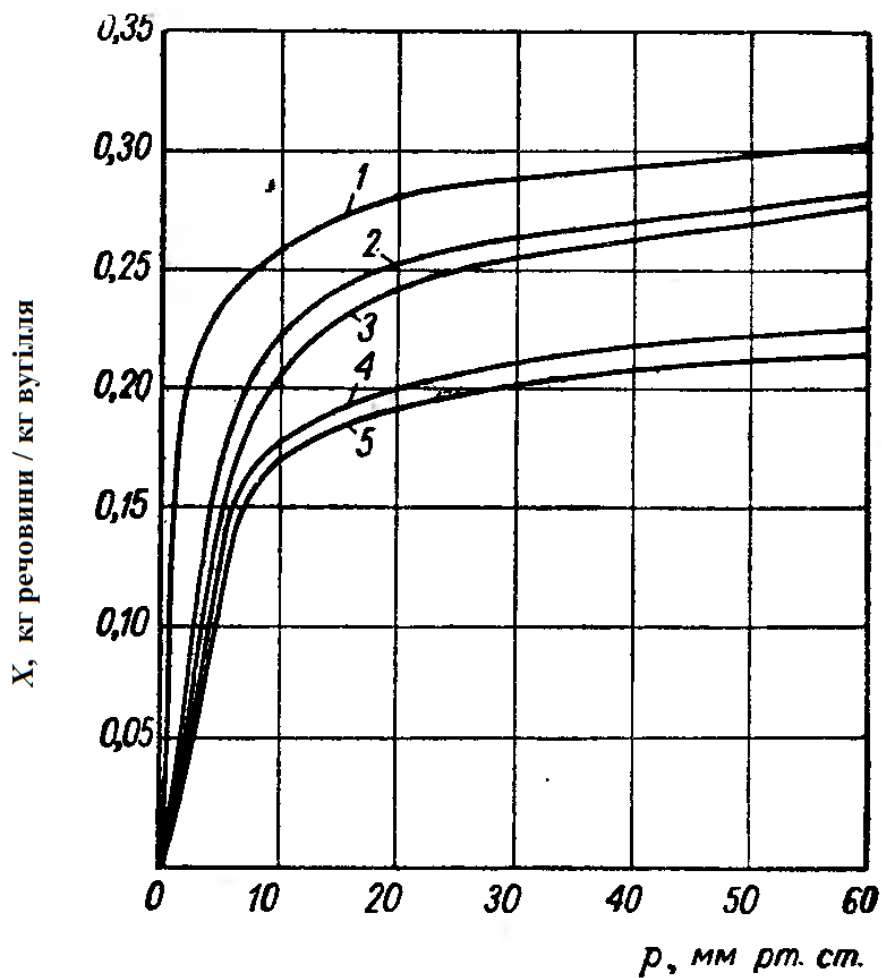


Рисунок 1.4 – Ізотерми адсорбції активованим вугіллям різних речовин:
1 – бензол, 20 °С; 2 – етиловий спирт, 20 °С; 3 – етиловий спирт, 25 °С; 4 – етиловий спирт (70 %) + діетиловий ефір (30 %), 20 °С; 5 – діетиловий ефір, 20 °С

У процесі очищення олив та мастил адсорбер належить [19] до малотонажних об'єктів керування, оскільки апарат орієнтований на випуск близько десяти тонн продукції за годину.

Зазначений об'єкт керування за характером часового режиму функціонування є апаратом неперервної дії – подачу розчину сировини й розчинника та адсорбенту на входи адсорбера й виведення очищеного матеріалу здійснюють неперервно; технологічний процес відбувається в усталеному режимі, тобто (при певних значеннях витрати адсорбента, яку подають на вхід апарату).

За ступенем важливості у виробництві апарат належить до основних ТОК, оскільки всередині відбувається очищення цільового продукту.

Для визначення керувального впливу в апараті використовують до 30 технологічних змінних. Наведемо декілька з них: витрати суміші сировини й розчинника та адсорбенту; початкові та кінцеві концентрації ароматичних вуглеводнів, сірки, смол у суміші сировини й розчинника та адсорбенті; густини суміші та адсорбенту; об'єми, які займають суміш та адсорбент в адсорбері, та ін.

За характером параметрів керування адсорбер є об'єктом з розподіленими параметрами (значення параметрів не є однаковими в різних точках об'єкта в конкретний момент часу).

З урахуванням шкідливих речовин, які вилучають з відпрацьованих олив та мастил (ароматичні вуглеводні, сірка та смоли), адсорбер є одним з основних апаратів, в якому порушення нормального режиму експлуатації може призвести до викидів цих речовин в атмосферу.

Вміст ароматичних вуглеводнів, сірки та смол на виході з апарату є критерієм його ефективності; задачею керування є зменшення вмісту цих речовин у вихідному продукті [20]. Таким чином забезпечують необхідну якість вихідного продукту (вміст ароматичних вуглеводнів, сірки та смол), а також зменшення витрати адсорбенту та викидів шкідливих речовин у повітря робочої зони.

1.3. Аналіз існуючих систем автоматизації адсорберів

Розглянемо протитечійний апарат неперервної дії 1 (рис. 1.5) з киплячим (псевдозрідженим) шаром дрібнозернистого адсорбенту на тарілках 2 як об'єкт керування. 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.

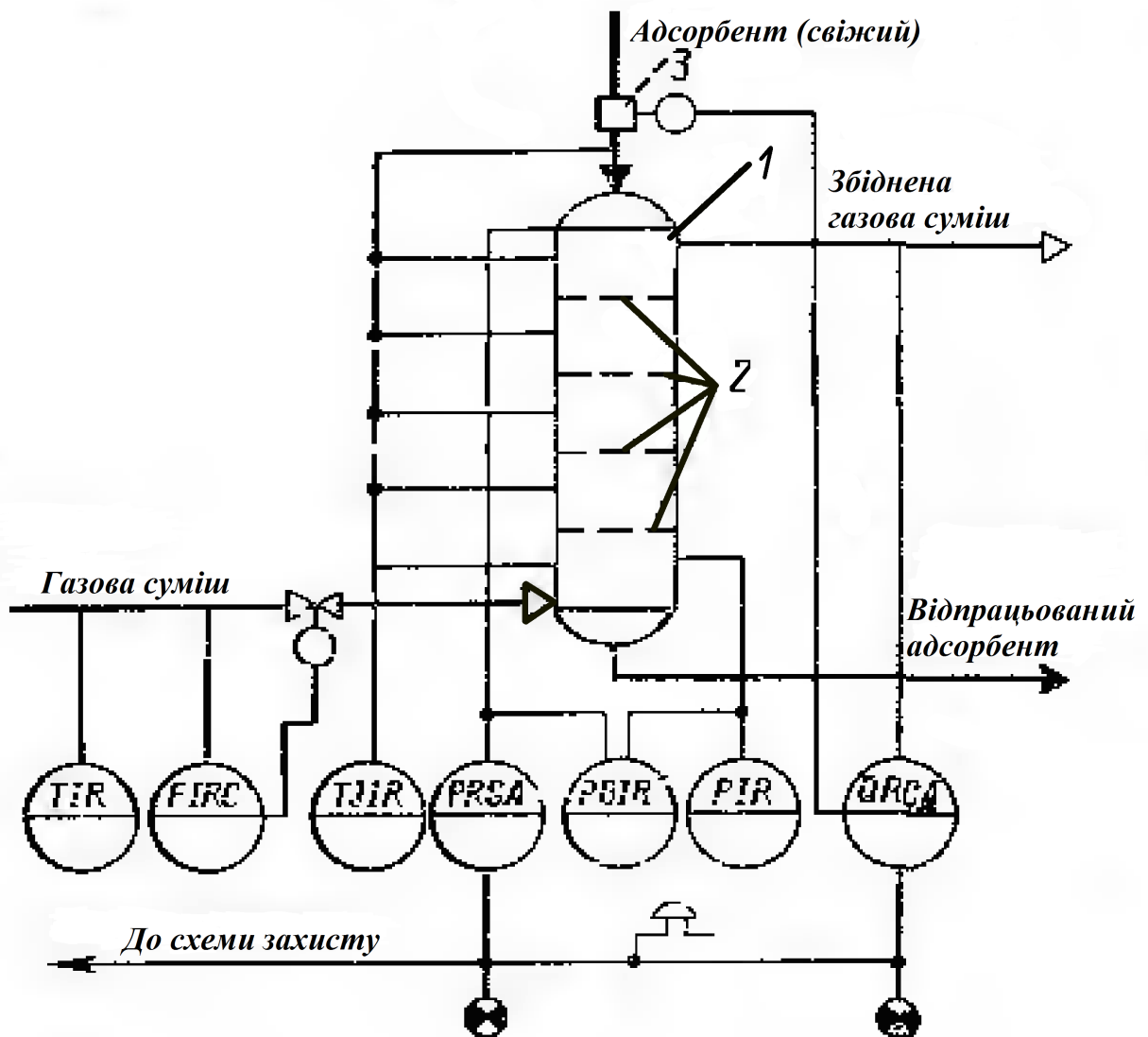


Рисунок 1.5 – Схема автоматизації процесу адсорбції:
1 – адсорбційна колона; 2 – тарілки; 3 – дозатор

Показник ефективності – концентрація компоненту, який вилучають зі збідненої газової суміші. Мета керування – досягнення заданого значення зазначеної концентрації. Основним контуром керування є регулятор

концентрації компонента, що адсорбують, у відпрацьованих газах, а керувальний вплив здійснюють зміною витрати адсорбенту (коригуванням роботи дозатора 3). Для усунення збурення по каналу витрати газової суміші, останню стабілізують.

Контролю підлягають витрата газової суміші, кінцева концентрація 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 коригуванням 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.

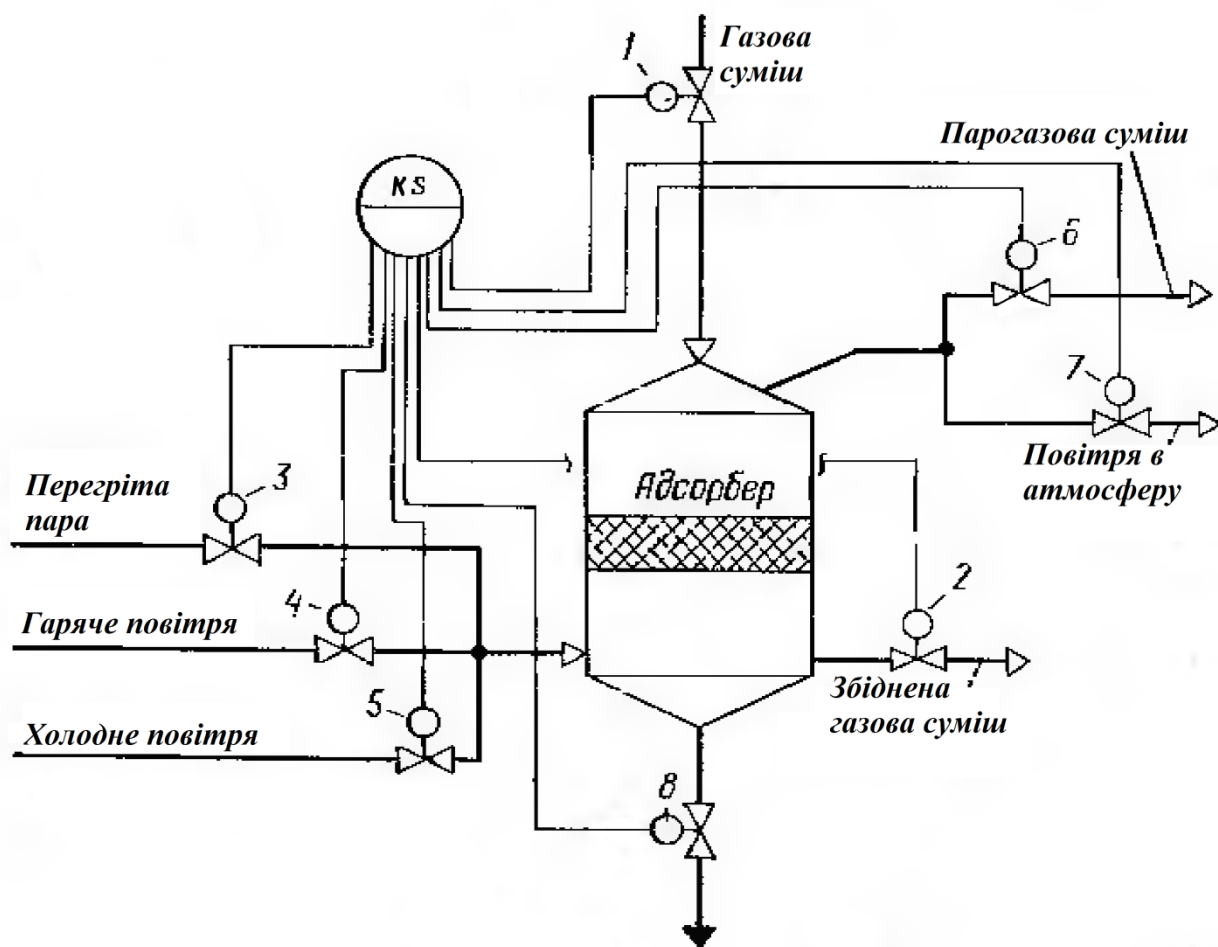


Рисунок 1.6 – Регулювання адсорберів з нерухомим шаром адсорбенту:
1-8 – клапани

Адсорбери з нерухомим шаром адсорбенту (рис. 1.6) належать до апаратів періодичної дії. Для керування ними встановлюють програмний пристрій, який за жорсткою часовою програмою здійснює такі операції: відкриває клапани 1, 2 і закриває клапани 3–8 (операція адсорбції); відкриває клапани 3,

6 і закриває клапани 1, 2, 4, 5, 7, 8 (операція десорбції); відкриває клапани 4, 7 і закриває клапани 1–3, 5, 6, 8 (операції висушування адсорбенту), відкриває клапани 5, 7 і закриває клапани 1–4, 6, 8 (операція охолодження адсорбенту); відкриває клапан 8 і закриває клапани 1–7 (операція зливу конденсату).

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 [20].

У [21] 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 рис. 1.7 наведено блок-схему пристрою, що реалізує зазначений спосіб автоматичного керування процесами очищення.

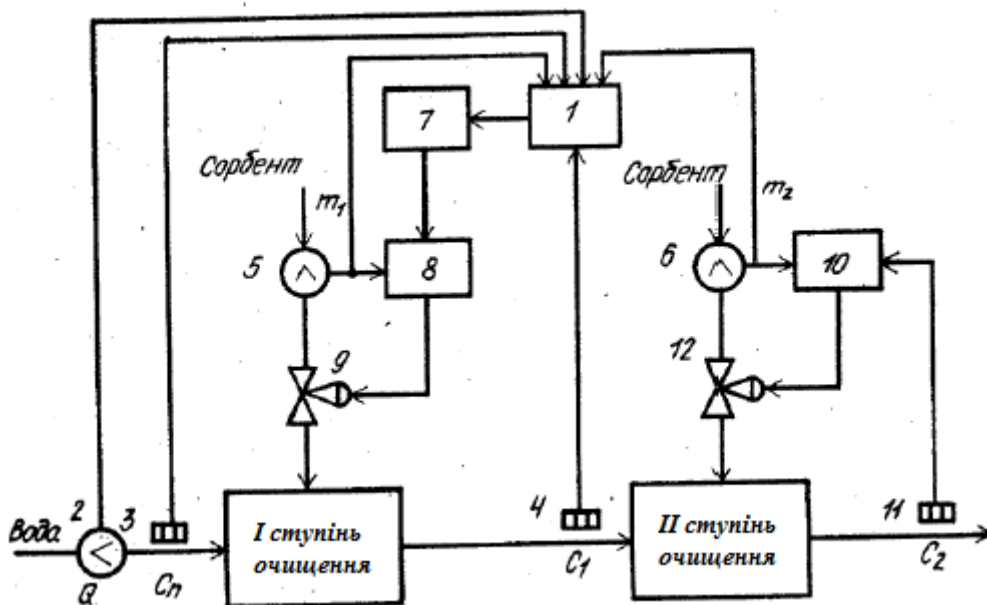


Рисунок 1.7 – Блок-схема пристрою, який реалізує спосіб автоматичного керування процесами очищення:

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

Спосіб здійснюють таким чином.

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 в 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 8 витрати сорбенту на першу ступінь очищення, який за допомогою виконавчого механізму 9 змінює подачу сорбенту на першу ступінь очищення. Задану ступінь очищення забезпечує регулятор 10 витрати сорбенту, який від вимірювача концентрації 11 отримує сигнал, пропорційний концентрації речовини, яку адсорбують (сорбата), на виході установки C_0 , і в залежності від

його величини за допомогою виконавчого механізму 12 змінює подачу активованого вугілля на другу ступінь очищення.

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 у ньому 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 [22]. 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.

1.4. Постановка задачі дослідження

Завданням магістерської дисертації є розроблення АСКТП адсорбційного очищення олив та мастил, яка забезпечить належний ступінь очищення вихідного продукту від смолистих речовин, кислот та інших домішок, що утворилися в результаті старіння олив при їх експлуатації, із застосуванням сучасних технічних засобів автоматизації, підвищення економічної ефективності відповідного виробництва з багаторазовою регенерацією адсорбенту й розчинника та підтримання концентрацій шкідливих речовин у повітрі робочої зони на припустимому рівні. Наведемо основні напрямки досліджень.

1. Дослідження процесу адсорбційного очищення олив та мастил як об'єкта автоматизації та з позиції документів сталого розвитку.
2. Формування сукупності задач оптимального керування виробництвом у режимі нормальної експлуатації та з урахуванням основних положень зазначеної концепції.
3. Створення бази даних нормативних документів, яка буде відслідковувати їх чинність на рівнях підприємства, державному, а також світовому.
4. Створення математичних моделей статичного та динамічного режимів, а також імітаційну для одного з основних об'єктів керування – адсорбера.
5. Створення АСКТП адсорбційного очищення олив та мастил з урахуванням положень концепції сталого розвитку.
6. Розроблення систем керування процесом очищення, які будуть враховувати декілька показників якості вихідного продукту.
7. Розроблення стартап-проекту.

2. ВРАХУВАННЯ ПОЛОЖЕНЬ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ПРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ОЛИВ ТА МАСТИЛ

2.1. Особливості ХТС очищення олив та мастил адсорбентами з позиції документів сталого розвитку

Розглянемо вплив ХТС очищення олив та мастил адсорбентами на оточуюче середовище та міжнародні документи, які регулюють викиди шкідливих речовин в атмосферу.

В біогеохімічному впливі нафти на екосистеми беруть участь безліч вуглеводневих і неуглеводневих компонентів, зокрема мінеральні солі та мікроелементи. Забруднення ґрунтів, поверхневих вод різними за хімічним складом твердими відходами та стічними водами призводять до погіршення їх санітарно-гігієнічного стану й зниження біологічної продуктивності. До причин виділення викидів шкідливих речовин з технологічного обладнання (резервуарів і апаратів) відносять негерметичність фланцевих з'єднань, аварії внаслідок корозії, прориви трубопроводів, витіки при проведенні ремонтних і профілактичних робіт.

Основними компонентами забруднювачів, що виділяються в атмосферу на нафтогазовидобувних та переробних підприємствах, є: сірководень, сірчистий ангідрид, окис вуглецю, ароматичні вуглеводні (бензол) та інші, що являють собою токсиканти 3–4 класів небезпеки. Найбільш згубними і агресивними забруднювачами в числі вищевказаних компонентів з санітарної точки зору є сполуки сірки, а серед вуглеводневих компонентів – бензол.

Відповідно до ДЕСТ 12.1.007-76 «Небезпечні речовини. Класифікація і загальні вимоги безпеки» (*Occupational safety standards system. Noxious substances. Classification and general safety requirements*), який поширюється на небезпечні речовини, що містяться в сировині, продуктах, напівфабрикатах, відходах виробництва, встановлюють загальні вимоги безпеки під час їх виробництва, застосування і зберігання.

ДЕСТ 12.1.005-88 «Система стандартів безпеки праці. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги, встановлені до повітря робочої зони» (*Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air*) встановлює

критерії безпечного вмісту забруднюючих речовин у повітрі робочої зони, вимоги до санітарного контролю за станом повітря робочої зони та визначає гранично припустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони. За ступенем дії на організм шкідливі речовини відповідно до ДЕСТ 12.1.007-88 поділяють на 4 класи небезпеки: I клас – надзвичайно небезпечні; II клас – високо небезпечні; III клас – помірно небезпечні; IV клас – малонебезпечні.

ГДК шкідливих речовин у повітрі робочої зони відповідно до ДЕСТ 12.1.005-88 наведені в табл. 2.1 (якщо в графі «Значення ГДК» наведено дві величини, то це означає, що в чисельнику максимальна, а в знаменнику – середньозмінна ГДК).

Таблиця 2.1 – Значення ГДК шкідливих речовин у повітрі робочої зони

№	Речовина	Значення ГДК, мг/м ³	Клас небезпеки	Назва апарату
1	2	3	4	5
1.	Бензол (C_6H_6)	15/5	II	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
2.	Толуол (метилбензол) (C_7H_8)	150/50	III	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
3.	Ксилоли (диметилбензоли) ($C_6H_4(CH_3)_2$)	150/50	III	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
4.	Кумол (ізопропілбензол) ($C_6H_5CH(CH_3)_2$)	50	IV	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
5.	Нафталін ($C_{10}H_8$)	20	IV	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
6.	Метилнафталіни	20	IV	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
7.	Фенантрен ($C_{14}H_{10}$)	0,8	II	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
8.	Антрацен	0,2	II	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор

Закінчення таблиці 2.1

1	2	3	4	5
9.	Диізопропілбензол ($C_{12}H_{18}$)	50	IV	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
10.	Дифеніл (біфеніл) ($C_{12}H_{10}$)	1	II	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор

11.	Диетилбензол	10	III	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
12.	Додецилбензол ($C_{18}H_{30}$)	30/10	III	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
13.	Псевдокумол (1,2,4-триметилбензол)	30/10	III	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
14.	Пірен ($C_{16}H_{10}$)	0,03	I	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
15.	3,4-бензпірен	0,00015	I	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
16.	Бензин	100	IV	Холодильник, адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
17.	Окис вуглецю (CO)	20	IV	Регенератор
18.	Двоокис вуглецю (CO_2)	27000/9000	IV	Холодильні апарати, регенератор
19.	Двоокис азоту NO_2	2	III	Регенератор
20.	Окиси азоту NO_x (у перерахунку на NO_2)	5	III	Регенератор
21.	Сірководень (H_2S)	10	II	Регенератор
22.	Сірчистий ангідрид (SO_2)	10	III	Регенератор
23.	Осад з нафтопродуктів	5	III	Адсорбер, десорбер, сушарка, регенератор
24.	Сажа (кіптява)	4	III	Регенератор

У червні 1988 р на міжнародній конференції в Торонто індустріально розвиненим країнам було рекомендовано скоротити викиди CO в атмосферу до 2005 р. як мінімум на 20 %, використовуючи атомні електростанції, а також альтернативні джерела енергії: вітру, сонця і т. ін. У 1992 р. на конференції ООН з навколишнього середовища і розвитку в Ріо-де-Жанейро було прийнято конвенцію про зміну клімату (Рамкова конвенція) [23], мета якої – досягнути стабілізації концентрацій парникових газів в атмосфері на рівні, який запобігатиме небезпечному антропогенному їх впливу на кліматичну систему. Сторони домовилися до 2000 р. стабілізувати емісію цих газів на рівні 1990 р. [24]. Головною особливістю Конвенції є диференційовані зобов'язання її учасників, оскільки країни з різним рівнем економічного розвитку роблять різний внесок у світове накопичення парникових газів.

У 1996 р. прийнято Директиву 96/61/ЕС, яка полягає в інтегрованому запобіганні та, якщо це неможливо, зменшенні забруднення, спричиненого виробничою діяльністю [25].

У грудні 1997 р. в Кіото була проведена міжнародна конференція з глобальної зміни клімату на планеті, на якій був прийнятий заключний протокол, що передбачав загальне скорочення викидів в атмосферу парникових газів на 5,2 %. До 2008–2012 рр. країни Європейського Союзу (ЄС-15), Болгарія, Чехія, Естонія, Латвія, Ліхтенштейн, Литва, Монако, Румунія, Словаччина, Словенія та Швейцарія повинні були скоротити викиди ПГ (від рівня 1990 р.) на 8 %, США – на 7 %, Японія, Канада, Угорщина та Польща – на 6 %, Хорватія – на 5 %. Нова Зеландія, Росія і Україна до 2012 р. могли виробляти парникові гази на рівні 1990 р. через зменшення їх промислового виробництва на той час. Норвегії, Австралії та Ісландії дозволено було збільшити викиди ПГ на 1,8 % та 10 % відповідно [24]. Пункт про зобов'язання країн, що розвиваються, включаючи Китай та Індію, у підсумковий документ не увійшов. Можлива торгівля квотами на емісію парникових газів (ті держави, де емісія мала, можуть продати свою квоту державам, де ця емісія велика). Однак у листопаді 1998 р. Кіотський протокол був ратифікований тільки Фіджі – острівною державою в Тихому океані. Зазначений протокол став першою глобальною угодою, що базувався на ринкових підходах при вирішенні проблем, пов'язаних зі зміною клімату; він передбачав можливість придбання встановлених величин скорочення викидів ПГ у інших країн, де їх рівень не перевищує рівня 1990 р., якщо державі-учасниці не вдається самостійно виконати зобов'язання зі скорочення викидів. Зменшення викидів парникових газів має відношення до всіх секторів економіки, включно з енергетикою, транспортом, промисловими процесами, відходами, лісовим господарством та змінами у використанні землі. До шести парникових газів, що регулюють КП, входять: діоксид вуглецю CO_2 , метан CH_4 , закис азоту N_2O , гексафторид сірки SF_6 , перфторвуглеці $PFCs$ та гідрофторвуглеці $HFCs$.

На вісімнадцятій Конференції Сторін РКЗК ООН та восьмій зустрічі Сторін КП, що відбулася у м. Доха (Катар) наприкінці 2012 р., було прийнято рішення 1/СМР.8 «Поправка до Кіотського протоколу на виконання пункту 9 його статті 3», відповідно до якого тривалість другого періоду дії зобов'язань за КП була з 1 січня 2013 р. до 31 грудня 2020 р. Цим рішенням зазначено, що кожна Сторона КП2, яка входить до Додатку I (37 промислово розвинених країн і Європейський Союз, в тому числі й Україна), повернеться до розгляду її кількісного зобов'язання з обмеження і скорочення викидів парникових газів на другий період дії зобов'язань, але не пізніше, ніж до 2014 р. Кожна Сторона з метою підвищення амбіційності її зобов'язання може понизити на 25–40% нижче рівня 1990 р. відсоткову частку її кількісного зобов'язання з обмеження і скорочення викидів парникових газів до 2020 р., яка була зафіксована раніше. Відповідно до нових домовленостей Україна має кількісне зобов'язання щодо обмеження чи скорочення викидів на 2013–2020 рр., яке становить 76 % (кумулятивно за вказаний період, а в 2020 р. не перевищувати 80 %) від базового 1990 р. Крім того, країна заявила про готовність скоротити викиди парникових газів на 50 % до 2050 р., порівняно з рівнем викидів 1990 р. Через те, що в Україні за період 2008–2012 рр. було здійснено викидів 1970 млн т CO₂-екв. на 57,6 % менше припустимої границі, то цілі щодо скорочення викидів ПГ, які ставлять до 2020 р., фактично припускають зростання таких викидів відносно КП1, а щодо 2050 р. позиція не є юридично затвердженою і строки її прийняття не визначені [24].

У загальносвітовому масштабі концентрація діоксиду сірки досягла піку в 1973 р., тому, внаслідок проведення в 1972 р. Стокгольмської конференції ООН з проблем навколишнього середовища, було розроблено низку міжнародних програм з обмеження використання шкідливих речовин (стійких органічних забруднювачів). У 1979 р. була прийнята конвенція про транскордонне забруднення повітря на великі відстані (Женевська конвенція), яка набула чинності в 1983 р. й стала першим міжнародним документом, що мав обов'язковий характер і був прийнятий з метою скорочення викидів

шкідливих речовин. За нею розробили Гельсінський протокол 1985 р. про скорочення викидів сірки щонайменше на 30 %, потім у 1988 р. прийняли Софійський протокол про контроль за викидами оксидів вуглецю [26].

2.2. Декомпозиція ХТС та постановка задач оптимального керування із врахуванням концепції сталого розвитку

Сформуємо сукупність задач керування [1], які забезпечать задані показники якості вихідного продукту. З огляду на енергоємність процесу й значну вартість виробництва адсорбентів, які в ході експлуатації потребують періодичної регенерації, основною задачею процесу очищення олив будемо вважати мінімізацію прямих виробничих втрат з отриманням заданої якості вихідної продукції. Авторами запропоновано виконати декомпозицію процесу адсорбційного очищення олив та мастил на основні етапи й визначити задачі керування для кожного з них.

Розглянемо структурну схему технологічного процесу, що зображена на рис. 2.1.

Основними показниками перебігу технологічного процесу виступають якість вихідного продукту, а отже, й адсорбенту. Тому найбільшу увагу при формулюванні задач керування слід приділяти забезпеченню мінімальної концентрації компонентів, що вилучають з продукту, в зоні очищення, а також мінімального вологовмісту адсорбенту в зоні висушування [20].

Визначимо задачі автоматизації кожного з етапів виробництва.

Зона змішування. Для пониження в'язкості очищуваного продукту, його змішують з необхідною кількістю розчинника. Це полегшує проникнення масел у внутрішні пори адсорбенту, а, отже, забезпечується більш ефективна ступінь очищення. Тому, задача керування для зони змішування полягає в забезпеченні заданої в'язкості.

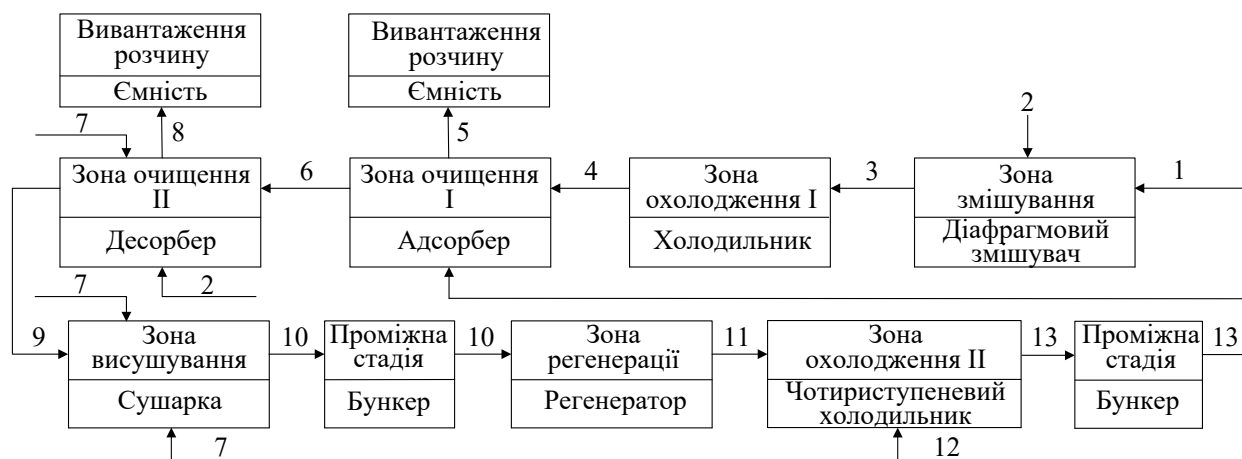


Рисунок 2.1 – Структурна схема технологічного процесу очищення масел:

1 – вихідна сировина; 2 – розчинник; 3 – розчин; 4 – охолоджений розчин; 5 – розчин рафінату; 6 – адсорбент; 7 – пара; 8 – розчин високоароматизованого рафінату; 9, 10, 11, 13 – вологий, висушений, регенований та охолоджений адсорбент відповідно; 12 – холодне повітря

Зона охолодження I. Охолодження розчину необхідно для забезпечення наступного етапу – процесу адсорбції, – який повинен відбуватися при низькій температурі, оскільки підвищення останньої призводить до зменшення кількості адсорбованої речовини. Отже, задачею керування для зони охолодження I є підтримання температури адсорбції до 40 °С.

Зона очищення I. У цій зоні відбувається процес адсорбції. Розчин сировини піднімається вгору і безперервно контактує з потоком адсорбенту, що рухається вниз і витягує з сировини небажані компоненти (важкі ароматичні вуглеводні, смоли, сірчисті з'єднання). Задачею керування для цієї зони є досягнення мінімально можливої концентрації вказаних компонентів у вихідному продукті.

Зона очищення II. Десорбція відбувається при температурі 90–95 °С. На даному етапі ароматичні вуглеводні, що знаходяться у порах адсорбенту, десорбуються нагрітим розчинником. Отже, задача керування для зони очищення II полягає у підтриманні температури десорбції у вказаних межах.

Зона висушування. Висушування адсорбенту відбувається в киплячому шарі у два етапи. Ефективність цього процесу залежить від ступеня видалення вологи з адсорбенту. Отже, задачею керування для зони висушування є забезпечення мінімального вологовмісту адсорбенту на виході з сушарки.

Зона регенерації. Смоли, що знаходяться в адсорбенті, випалюються в регенераторі при температурі 650 °С, тому задачею керування для зони регенерації виступає підтримання заданої температури в апараті й досягнення мінімально можливої концентрації фактичних смол в адсорбенті.

Зона охолодження II. Через високу температуру регенерації, адсорбент потрібно охолодити для повернення його в адсорбер. Тому, задача керування для зони охолодження II полягає у зниженні температури регенованого адсорбенту до температури адсорбції.

Вивантаження розчину та проміжна стадія. На цих етапах немає потреби формулювати задачі керування, оскільки в апаратах, які в них використовуються, відбуваються процеси, не пов'язані з метою дослідження.

Вибір критерію керування є складною задачею, яку не можна повністю формалізувати. За критерії використовують показники, які можуть вимірювати або розраховувати: технологічні та ті, що враховують положення концепції сталого розвитку – економічні, екологічні та соціальні.

Розглянемо *економічну складову положень СР* в задачах керування. Визначимо *економічні критерії*. Одними з видів таких критеріїв оптимізації для керування технологічним процесом адсорбційного очищення мастил та олив є прибуток підприємства або технологічної ланки, а також собівартість продукції. Прибуток підприємства або іншого виробничого підрозділу визначають за формулою:

$$K_e = CG - F,$$

де C – ціна продукції, що випускають, грн/кг; G – кількість (маса) продукції, кг; F – витрати на виробництво, грн.

Питомий прибуток на одиницю продукції

$$K_{e,s} = C - \frac{F}{G},$$

визначає зв'язок $K_{e,s}$ із заводською собівартістю продукції F/G , що є сумою загальнозаводських, цехових і прямих витрат.

Прямі питомі витрати K , які безпосередньо пов'язані з технологічним процесом очищення олив та мастил адсорбентами визначають таким чином:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i + S}{G},$$

де K_i – змінна частина витрат F_i , що залежить від режиму ведення i -го технологічного процесу, грн; n – кількість апаратів технологічної ланки; S – соціальна складова витрат, грн; індекси: $i = 1$ – холодильник; $i = 2$ – адсорбер; $i = 3$ – десорбер; $i = 4$ – сушарка; $i = 5$ – регенератор; $i = 6$ – чотириступеневий холодильник; $i = 7$ – діафрагмовий змішувач.

Прямі питомі витрати K_{ec} , які враховують екологічну складову концепції сталого розвитку у процесі очищення олив та мастил, визначають таким чином:

$$K_{ec} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i + \sum_{i=1}^n F_{c,i} + S}{G},$$

де $F_{c,i}$ – витрати, спрямовані на зменшення концентрацій шкідливих речовин у повітрі робочої зони.

$$F_{c,i} = V_i \sum_{j=1}^m C_{ij} P_j,$$

де m – кількість шкідливих речовин, які утворюються на виробництві; V_i – об'єм i -ої робочої зони, у повітря якої виділяються шкідливі речовини (навколо холодильника, адсорбера, десорбера, сушарки, регенератора, чотириступеневого холодильника та діафрагмового змішувача), м^3 ; C_{ij} – концентрація j -ої шкідливої речовини у повітрі i -ої робочої зони, $\text{мг}/\text{м}^3$; P_j – витрати на усунення 1 мг j -ої речовини, $\text{грн}/\text{мг}$.

Соціальна складова критерію витрат:

$$S = S_s + S_{sn} + S_o,$$

де S_s – витрати на оплату праці, грн; S_{sn} – витрати на соціальні потреби, грн; S_o – інші витрати, грн.

Усі складові S залежать від продуктивності виробництва і шкідливих викидів. На рівні невеликого підприємства наразі таку статистику майже не збирають, тому пропонуємо в задачах оптимального керування розглядати економічні та екологічні критерії з врахуванням технологічних показників.

Розглянемо витрати K_i , що забезпечують нормальну роботу кожного апарату окремо.

Показник, що враховує витрати на роботу холодильника:

$$K_1 = G_m P_m + G_{w1} P_w + Q_{e1} P_e + A_1,$$

де G_m – витрата суміші сировини й розчинника, що надходить у холодильник, м^3 ; P_m – ціна одиниці матеріалу (суміші сировини й розчинника), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; G_{w1} – витрата води, що подають на охолодження суміші, м^3 ; P_w – ціна одиниці матеріалу (води), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; Q_{e1} – кількість енергії, що витрачають, $\text{кВт}\cdot\text{с}$; P_e – ціна одиниці енергії, що витрачають, $\text{грн}/(\text{кВт}\cdot\text{с})$, A_1 – витрати на амортизацію основних фондів, необхідних для забезпечення процесу охолодження суміші сировини й розчинника, грн .

Показник, що враховує витрати на роботу адсорбера:

$$K_2 = G_a P_a + G_{sol1} P_{sol} + Q_{e2} P_e + A_2,$$

де G_a – витрата адсорбенту, що подають в адсорбер, м^3 ; P_a – ціна одиниці матеріалу (адсорбенту), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; G_{sol1} – витрата розчинника на гідрозатвор, що подають в апарат, м^3 ; P_{sol} – ціна одиниці матеріалу (розчинника на гідрозатвор), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; Q_{e2} – кількість енергії, що витрачають, $\text{кВт}\cdot\text{с}$; P_e – ціна одиниці енергії, що витрачають, $\text{грн}/(\text{кВт}\cdot\text{с})$, A_2 – витрати на амортизацію основних фондів, необхідних для перебігу процесу адсорбції, грн .

Показник, що враховує витрати на роботу десорбера:

$$K_3 = G_{ahr} P_{ahr} + G_{sol2} P_{sol} + G_{st1} P_{st} + Q_{e3} P_e + A_3,$$

де G_{ahr} – витрата адсорбенту, насиченого вуглеводнями і смолами, що подають у десорбер, м^3 ; P_{ahr} – ціна одиниці матеріалу (адсорбенту, який насичений вуглеводнями і смолами), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; G_{sol2} – витрата розчинника для десорбування ароматичних вуглеводнів, що знаходяться у порах

адсорбенту, і подальшого його промивання, м^3 ; P_{sol} – ціна одиниці матеріалу (розчинника), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; G_{st1} – витрата пари для підтримання температури десорбції, м^3 ; P_{st} – ціна одиниці матеріалу (пари), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; Q_{e3} – кількість енергії, що витрачають, $\text{кВт}\cdot\text{с}$; P_e – ціна одиниці енергії, що витрачають, $\text{грн}/(\text{кВт}\cdot\text{с})$, A_2 – витрати на амортизацію основних фондів, необхідних для забезпечення процесу десорбції, грн .

Показник, що враховує витрати на роботу сушарки:

$$K_4 = G_{ars}P_{ars} + (G_{st2} + G_{st3})P_{st} + G_{air1}P_{air} + Q_{e4}P_e + A_4,$$

де G_{ahr} – витрата адсорбенту, що містить смоли і розчинник, на вході в сушарку, м^3 ; P_{ahr} – ціна одиниці матеріалу (адсорбенту, що містить смоли і розчинник), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; G_{st2} – витрата пари для створення киплячого шару, м^3 ; G_{st3} – витрата пари у зміювиках для висушування адсорбенту, м^3 ; P_{st} – ціна одиниці матеріалу (пари), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; G_{air1} – витрата повітря, що подають на пневмотранспорт, м^3 ; P_{air} – ціна одиниці матеріалу (повітря), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; Q_{e4} – кількість енергії, що витрачають, $\text{кВт}\cdot\text{с}$; P_e – ціна одиниці енергії, що витрачають, $\text{грн}/(\text{кВт}\cdot\text{с})$, A_4 – витрати на амортизацію основних фондів, необхідних для забезпечення процесу висушування, грн .

Показник, що враховує витрати на роботу регенератора:

$$K_5 = G_{ar}P_{ar} + G_{w2}P_w + G_{air2}P_{air} + Q_{e5}P_e + A_5,$$

де G_{ar} – витрата адсорбенту, що містить смоли, на вході в регенератор, м^3 ; P_{ar} – ціна одиниці матеріалу (адсорбенту, що містить смоли), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; G_{w2} – витрата води, що подають у регенератор, м^3 ; P_w – ціна одиниці матеріалу (води), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; G_{air2} – витрата повітря, що подають на регенерацію адсорбенту, м^3 ; P_{air} – ціна одиниці матеріалу (повітря), що витрачають, $\text{грн}/\text{м}^3$; Q_{e5} – кількість енергії, що витрачають, $\text{кВт}\cdot\text{с}$; P_e – ціна одиниці енергії, що витрачають, $\text{грн}/(\text{кВт}\cdot\text{с})$, A_5 – витрати на амортизацію основних фондів, необхідних для забезпечення процесу регенерування, грн .

Показник, що враховує витрати на роботу чотириступеневого холодильника:

$$K_6 = G_a P_a + G_{w3} P_w + G_{air3} P_{air} + Q_{e6} P_e + A_6,$$

де G_{w3} – витрата води у змішувачах, що подають для охолодження регенованого адсорбенту, м³; P_w – ціна одиниці матеріалу (води), що витрачають, грн/м³; G_{air3} – витрата повітря, що подають для створення киплячого шару, м³; P_{air} – ціна одиниці матеріалу (повітря), що витрачають, грн/м³; Q_{e6} – кількість енергії, що витрачають, кВт·с; P_e – ціна одиниці енергії, що витрачають, грн/(кВт·с), A_6 – витрати на амортизацію основних фондів, необхідних для забезпечення процесу охолодження адсорбенту, грн.

Показник, що враховує витрати на роботу діафрагмового змішувача:

$$K_7 = G_{rm} P_{rm} + G_{sol3} P_{sol} + Q_{e7} P_e + A_7,$$

де G_{rm} , G_{sol3} – відповідно витрати сировини й розчинника, що подають у діафрагмовий змішувач, м³; P_{rm} – ціна одиниці матеріалу (сировини), що витрачають, грн/м³; P_{sol} – ціна одиниці матеріалу (розчинника), що витрачають, грн/м³; Q_{e7} – кількість енергії, що витрачають, кВт·с; P_e – ціна одиниці енергії, що витрачають, грн/(кВт·с), A_7 – витрати на амортизацію основних фондів, необхідних для забезпечення процесу змішування, грн.

Наведемо також показники, які враховують екологічну складову для кожного апарату окремо.

Холодильник:

$$K_{ec1} = G_m P_m + G_{w1} P_w + Q_{e1} P_e + A_1 + F_{c1}.$$

Адсорбер:

$$K_{ec2} = G_m P_m + G_a P_a + G_{sol1} P_{sol} + Q_{e2} P_e + A_2 + F_{c2}.$$

Десорбер:

$$K_{ec3} = G_{ahr} P_{ahr} + G_{sol2} P_{sol} + G_{st1} P_{st} + Q_{e3} P_e + A_3 + F_{c3}.$$

Сушарка:

$$K_{ec4} = G_{ars} P_{ars} + (G_{st2} + G_{st3}) P_{st} + G_{air1} P_{air} + Q_{e4} P_e + A_4 + F_{c4}.$$

Регенератор:

$$K_{ec5} = G_{ar} P_{ar} + G_{w2} P_w + G_{air2} P_{air} + Q_{e5} P_e + A_5 + F_{c5}.$$

Чотириступеневий холодильник:

$$K_{ec6} = G_a P_a + G_{w3} P_w + G_{air3} P_{air} + Q_{e6} P_e + A_6 + F_{c6}.$$

Діафрагмовий змішувач:

$$K_{ec7} = G_{rm}P_{rm} + G_{sol3}P_{sol} + Q_{e7}P_e + A_7 + F_{c7}.$$

Прямі питомі витрати $K_{opt, i}$ та ті, які враховують екологічну складову $K_{ec, opt, i}$ відповідно визначають таким чином:

$$K_{opt, i} = \frac{K_i}{E\tau}, \quad K_{ec, opt, i} = \frac{K_{ec, i}}{E\tau}.$$

Холодильник:

$$K_{opt1} = \frac{K_1}{E\tau}, \quad K_{ec, opt1} = \frac{K_{ec1}}{E\tau}.$$

Адсорбер:

$$K_{opt2} = \frac{K_2}{E\tau}, \quad K_{ec, opt2} = \frac{K_{ec2}}{E\tau}.$$

Десорбер:

$$K_{opt3} = \frac{K_3}{E\tau}, \quad K_{ec, opt3} = \frac{K_{ec3}}{E\tau}.$$

Сушарка:

$$K_{opt4} = \frac{K_4}{E\tau}, \quad K_{ec, opt4} = \frac{K_{ec4}}{E\tau}.$$

Регенератор:

$$K_{opt5} = \frac{K_5}{E\tau}, \quad K_{ec, opt5} = \frac{K_{ec5}}{E\tau}.$$

Чотириступеневий холодильник:

$$K_{opt6} = \frac{K_6}{E\tau}, \quad K_{ec, opt6} = \frac{K_{ec6}}{E\tau}.$$

Визначимо спосіб урахування *екологічної складової положень СР* в задачах керування. При розв'язанні задачі оптимального керування процесами очищення олив та мастил адсорбентами слід враховувати той факт, що на деякі технологічні змінні накладають обмеження. Також, для забезпечення виконання умов концепції сталого розвитку при використанні економічних критеріїв екологічну складову пропонуємо відображати в обмеженнях напівжирним шрифтом.

Охолодження розчину необхідно для забезпечення наступного етапу – процесу адсорбції, – який повинен відбуватися при низькій температурі, оскільки підвищення останньої призводить до зменшення кількості адсорбованої речовини. Тому у холодильнику необхідно підтримувати температуру води у діапазоні $\Theta_{w1,\min} \leq \Theta_{w1} \leq \Theta_{w1,\max}$. При цьому необхідно врахувати, що при великих витратах води різко зростають енергетичні витрати, а, навпаки, якщо значення G_{w1} нижче за необхідне, то можливе неприпустиме підвищення температури води, що може призвести до випадіння солей на поверхні труб, і, як наслідок, значного погіршення умов теплопередачі.

Задача оптимального керування холодильником:

$$K_{opt1}(U) = f(\Theta_{w1}, G_{w1}) \rightarrow \min;$$

$$\Theta_{w1,\min} \leq \Theta_{w1} \leq \Theta_{w1,\max};$$

$$G_{w1,\min} \leq G_{w1} \leq G_{w1,\max};$$

$$C_{1j} \leq C_{1j,\max},$$

де C_{1j} – концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони навколо холодильника відповідно до табл. 2.1.

В адсорбері необхідно забезпечити задані значення показників якості очищеної оливи або мастила (рафінату I): $CN1$ – цетанове число, $FC1$ – фракційний склад, $Visc1$ – в'язкість, $S1$ – сірка, $AH1$ – ароматичні вуглеводні $R1$ – фактичні смоли.

Таким чином, задача оптимального керування адсорбером:

$$K_{opt2}(U) = f(C_{FC1}, C_{S1}, C_{AH1}, C_{R1}, \Theta_a, G_a) \rightarrow \min;$$

$$C_{CN1,\min} \leq C_{CN1} \leq C_{CN1,\max};$$

$$C_{FC1,\min} \leq C_{FC1} \leq C_{FC1,\max};$$

$$C_{Visc1,\min} \leq C_{Visc1} \leq C_{Visc1,\max};$$

$$C_{S1} \leq C_{S1,\max};$$

$$C_{AH1} \leq C_{AH1,\max};$$

$$C_{R1} \leq C_{R1,\max};$$

$$\Theta_{a,\min} \leq \Theta_a \leq \Theta_{a,\max};$$

$$C_{2j} \leq C_{2j,\max},$$

де C_{2j} – концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони навколо адсорбера відповідно до табл. 2.1.

В десорбері необхідно підтримувати температуру десорбції в діапазоні $\Theta_{des,\min} \leq \Theta_{des} \leq \Theta_{des,\max}$ за рахунок витрати пари, що подається у змішувачі. Також необхідно забезпечити задані значення показників якості розчину ароматичних вуглеводнів (рафінату II): $AH2$ – ароматичні вуглеводні, $S2$ – сірка, $R2$ – фактичні смоли, $Visc2$ – в'язкість.

Задача оптимального керування десорбером:

$$K_{opt3}(U) = f(C_{S2}, C_{R2}, \Theta_{des}, G_{sol2}) \rightarrow \min;$$

$$C_{Visc2,\min} \leq C_{Visc2} \leq C_{Visc2,\max};$$

$$C_{AH2} \geq C_{AH2,\min};$$

$$C_{S2} \leq C_{S2,\max};$$

$$C_{R2} \leq C_{R2,\max};$$

$$G_{sol2,\min} \leq G_{sol2} \leq G_{sol2,\max};$$

$$\Theta_{des,\min} \leq \Theta_{des} \leq \Theta_{des,\max};$$

$$C_{3j} \leq C_{3j,\max},$$

де C_{3j} – концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони навколо десорбера відповідно до табл. 2.1.

Висушування адсорбенту відбувається в киплячому шарі у два етапи. Ефективність цього процесу залежить від ступеня видалення вологи з адсорбенту. Отже, в сушарці необхідно підтримувати вологовміст адсорбенту і температуру в апараті в діапазонах $\omega_{a,\min} \leq \omega_a \leq \omega_{a,\max}$ і $\Theta_{d,\min} \leq \Theta_d \leq \Theta_{d,\max}$ відповідно за рахунок витрати пари, що подається у змішувачі.

Задача оптимального керування сушаркою:

$$K_{opt4}(U) = f(\omega_a, \Theta_d, G_{st3}) \rightarrow \min;$$

$$\Theta_{d,\min} \leq \Theta_d \leq \Theta_{d,\max};$$

$$\omega_{ar,\min} \leq \omega_{ar} \leq \omega_{ar,\max};$$

$$C_{4j} \leq C_{4j,\max},$$

де C_{4j} – концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони навколо сушарки відповідно до табл. 2.1.

Смоли, що знаходяться в адсорбенті, випаляють в регенераторі при температурі близької до $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, тому необхідно підтримувати останню в межах $\Theta_{r,\min} \leq \Theta_r \leq \Theta_{r,\max}$ за рахунок витрати повітря. Оскільки повітря подають за рахунок електропідігрівача, то на цьому етапі потрібно мінімізувати витрати електроенергії. Також задачею оптимального керування на цьому етапі є зменшення концентрації фактичних смол C_R в адсорбенті.

Задача оптимального керування регенератором:

$$K_{opt5}(U) = f(C_R, \Theta_r, G_{w2}, G_{air2}, Q_{e6}) \rightarrow \min;$$

$$G_{w2,\min} \leq G_{w2} \leq G_{w2,\max};$$

$$\Theta_{r,\min} \leq \Theta_r \leq \Theta_{r,\max};$$

$$C_R \leq C_{R,\max};$$

$$C_{5j} \leq C_{5j,\max},$$

де C_{5j} – концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони навколо регенератора відповідно до табл. 2.1.

Через високу температуру регенерації, адсорбент потрібно охолодити для повернення його в адсорбер. Тому в чотириступеневому холодильнику необхідно знизити температуру регенованого адсорбенту до температури адсорбції в межах $\Theta_{a,\min} \leq \Theta_a \leq \Theta_{a,\max}$ за рахунок витрати води.

Задача оптимального керування чотириступеневим холодильником:

$$K_{opt6}(U) = f(\Theta_a, G_{w3}) \rightarrow \min;$$

$$G_{w3,\min} \leq G_{w3} \leq G_{w3,\max};$$

$$\Theta_{a,\min} \leq \Theta_a \leq \Theta_{a,\max};$$

$$C_{6j} \leq C_{6j,\max},$$

де C_{6j} – концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони навколо чотириступеневого холодильника відповідно до табл. 2.1.

Роботу діафрагмового змішувача немає необхідності оптимізувати, оскільки відсутня потреба в мінімізації витрат, безпосередньо пов'язаних з технологічним процесом.

Оскільки шкідливі речовини, які можуть утворюватися та виділятися у повітря робочих зон у процесах адсорбції, десорбції, висушування та регенерації, можуть призвести до аварійних ситуацій, сформуємо для них задачу оптимального керування з врахуванням екологічної складової концепції сталого розвитку.

У такому випадку, задача оптимального керування холодильником:

$$K_{ec, opt1}(U) = f(\Theta_{w1}, G_{w1}, C_{1j}) \rightarrow \min;$$

$$\Theta_{w1,min} \leq \Theta_{w1} \leq \Theta_{w1,max};$$

$$G_{w1,min} \leq G_{w1} \leq G_{w1,max};$$

$$C_{1j} \leq C_{1j,max}.$$

Задача оптимального керування адсорбером:

$$K_{ec, opt2}(U) = f(C_{FC1}, C_{S1}, C_{AH1}, \Theta_a, C_{R1}, G_a, C_{2j}) \rightarrow \min;$$

$$C_{CN,min} \leq C_{CN} \leq C_{CN,max};$$

$$C_{FC1} \leq C_{FC1,max};$$

$$C_{Visc1,min} \leq C_{Visc1} \leq C_{Visc1,max};$$

$$C_{S1} \leq C_{S1,max};$$

$$C_{AH1} \leq C_{AH1,max};$$

$$C_{R1} \leq C_{R1,max};$$

$$\Theta_{a,min} \leq \Theta_a \leq \Theta_{a,max};$$

$$C_{2j} \leq C_{2j,max}.$$

Задача оптимального керування десорбером:

$$K_{ec, opt3}(U) = f(C_{AH2}, C_{S2}, C_{R1}, \Theta_{des}, G_{sol2}, C_{3j}) \rightarrow \min;$$

$$C_{Visc2,min} \leq C_{Visc2} \leq C_{Visc2,max};$$

$$C_{AH2} \geq C_{AH2,min};$$

$$C_{S2} \leq C_{S2,max};$$

$$C_{R2} \leq C_{R2,max};$$

$$G_{sol2,min} \leq G_{sol2} \leq G_{sol2,max};$$

$$\Theta_{des,min} \leq \Theta_{des} \leq \Theta_{des,max};$$

$$C_{3j} \leq C_{3j,max}.$$

Задача оптимального керування сушаркою:

$$K_{ec, opt4}(U) = f(\omega_a, \Theta_d, G_{st3}, C_{4j}) \rightarrow \min;$$

$$\Theta_{d, \min} \leq \Theta_d \leq \Theta_{d, \max};$$

$$\omega_{ar, \min} \leq \omega_{ar} \leq \omega_{ar, \max};$$

$$C_{4j} \leq C_{4j, \max}.$$

Задача оптимального керування регенератором:

$$K_{ec, opt5}(U) = f(\Theta_r, C_R, G_{w2}, G_{air2}, Q_{e6}, C_{5j}) \rightarrow \min;$$

$$G_{w2, \min} \leq G_{w2} \leq G_{w2, \max};$$

$$\Theta_{r, \min} \leq \Theta_r \leq \Theta_{r, \max};$$

$$C_R \leq C_{R, \max};$$

$$C_{5j} \leq C_{5j, \max}.$$

Задача оптимального керування чотириступеневим холодильником:

$$K_{opt6}(U) = f(\Theta_a, G_{w3}, C_{6j}) \rightarrow \min;$$

$$G_{w3, \min} \leq G_{w3} \leq G_{w3, \max};$$

$$\Theta_{a, \min} \leq \Theta_a \leq \Theta_{a, \max};$$

$$C_{6j} \leq C_{6j, \max}.$$

2.3. Алгоритм керування технологічним процесом очищення олив та мастил адсорбентами в контексті сталого розвитку

З урахуванням документів зі сталого розвитку та розроблених критеріїв оптимізації технологічного процесу адсорбційного очищення олив та мастил, запропоновано такий алгоритм оцінювання виробництва, в якому зазначений процес розділяють на етапи, що передбачають оптимізацію роботи зазначених у них апаратів. Розглянемо окремо ці етапи.

1. Технологічні ланки адсорбування оливи або мастила, десорбування та висушення адсорбенту. Розглянемо зазначені процеси окремо.

1. Оптимізація процесу адсорбції оливи або мастила.

Зазначений процес передбачає видалення з оливи або мастила небажаних компонентів (важких ароматичних вуглеводнів, смол, сірчистих з'єднань) з

досягненням заданих показників якості. Оскільки до складу забруднювачів оливи або мастила входять горючі речовини, а також всі вони здійснюють шкідливий вплив на навколишнє середовище, екологічна складова концепції сталого розвитку ставить за мету суттєве зменшення викиду цих речовин в атмосферу. При цьому також досягають економічних цілей, оскільки підвищення ступеня очищення оливи або мастила призводить до збільшення вартості вихідного продукту. З метою встановлення єдиного порядку організації та здійснення робіт, пов'язаних з контролюванням якості товарної нафти та нафтопродуктів, а також на підставі Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» був виданий наказ «Про затвердження Інструкції з контролювання якості нафти і нафтопродуктів на підприємствах і організаціях України» 2007 р. Технологічні нормативи припустимих викидів забруднюючих речовин зі стаціонарних джерел встановлюють відповідно до наказу Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27 червня 2006 року «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел». На рівні підприємства діють ДЕСТ 12.1.007-76 та ДЕСТ 12.1.005-88, в яких визначені гранично припустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони.

Таким чином, оптимізація процесу адсорбції полягає в мінімізації вмісту шкідливих домішок в оливі або мастилі з врахуванням обмежень на режимні параметри.

2. Оптимізація процесу десорбції забрудненого адсорбенту.

Оскільки адсорбент є коштовним матеріалом та після процесу адсорбції містить у собі речовини, які є небезпечними для оточуючого середовища, необхідно забезпечити повне його відновлення із запобіганням можливого виносу з технологічної ланки. Оптимізація цього процесу передбачає мінімізацію витрати пари, що подають у змішувачі.

3. Оптимізація процесу висушування також передбачає мінімізацію витрати пари, яку подають у змішувачі. При цьому необхідно забезпечити

використання пари на виході з сушарки в інших технологічних процесах для запобігання її викиду в оточуюче середовище.

II. Процеси охолодження та регенерування адсорбенту. Розглянемо їх окремо.

1. Оптимізація процесів охолодження суміші сировини й розчинника й адсорбенту.

Згідно з Водним кодексом України необхідно забезпечити раціональне використання водних ресурсів, зокрема, стратегія сталого розвитку України до 2030 р. передбачає зниження водоємності ВВП на 50 %. Також великі витрати води призводять до збільшення витрат енергетичних, які є непрямыми джерелами викидів CO_2 в атмосферу. Їх регулює Кіотський протокол 1997 р. (ратифікований Україною в 2004 р.). Рамковою конвенцією ООН зі зміни клімату встановлені вимоги до ведення реєстру викидів парникових газів, і в 2008 р. прийнято відповідну постанову «Про формування і ведення Національного електронного реєстру антропогенних викидів та абсорбції парникових газів».

Таким чином, у процесах охолодження суміші сировини й розчинника й адсорбенту необхідно мінімізувати витрату води, оскільки її збільшення призводить до різкого зростання енергетичних витрат.

2. Оптимізація процесу регенерації адсорбенту.

Зазначений процес вимагає мінімізації електроенергії, оскільки повітря подають за рахунок електропідігрівача. При цьому необхідно забезпечити використання газу на допал на виході з апарата в інших технологічних процесах. Через високу температуру регенерації адсорбенту, у процесі його подальшого охолодження використовують велику кількість води, тому задачею оптимізації цього процесу виступає її мінімізація.

Основними джерелами виникнення аварійних ситуацій можуть бути процеси адсорбції, десорбції, висушування та регенерації. У випадку виникнення таких ситуацій, коли вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони перевищує гранично припустимі значення, задача оптимального

керування полягає в застосуванні екологічних критеріїв, які передбачають мінімізацію концентрацій речовин, перелік яких зазначено в табл. 2.1, згідно з критеріями, що наведені в п. 2.2 для відповідних апаратів.

2.4. Структура бази даних документів сталого розвитку як елемента системи автоматизації технологічного процесу очищення олив та мастил

Наявність шкідливих речовин, які можуть утворюватися та/або виділятися у навколишнє середовище у процесах очищення олив та мастил, вимагає створення інформаційного забезпечення, яке дозволить з'ясовувати поточний стан справ по напрямкам державних і міжнародних обмежень на ГДК таких речовин у повітрі робочої зони.

Розглянемо структуру БД нормативних документів, які стосуються зазначеного виробництва з точки зору сталого розвитку. Предметну область для цієї БД визначено таку – СТАЛИЙ РОЗВИТОК НА ВИРОБНИЦТВІ.

При створенні моделей даних були запропоновані такі сутності [27]: ДОКУМЕНТ ООН, ДОКУМЕНТ УКРАЇНИ, ДЕСТ ВИРОБНИЦТВА, АПАРАТ, РЕЧОВИНА.

Сутність ДОКУМЕНТ ООН має містити інформацію про документи сталого розвитку, які були розроблені організаціями світового рівня з метою зменшення антропогенного впливу на кліматичну систему, а також відомості про їх ратифікацію Україною. У цьому випадку існує можливість проектування автоматизованої системи керування технологічним процесом очищення олив та мастил адсорбентами з врахуванням документів, в яких встановлені вимоги до зменшення або повного усунення викидів небезпечних та отруйних речовин, що можуть утворюватися на виробництві.

Сутність ДОКУМЕНТ УКРАЇНИ має містити інформацію про документи, які несуть правовий характер на території України. За допомогою цього інформаційного об'єкту є можливість переглянути вміст відповідних документів, дати набуття чинності та зміни, які були внесені в їх зміст.

Сутність ДЕСТ ВИРОБНИЦТВА має містити інформацію про державні стандарти, санітарні норми і правила, які мають бути дотримані на зазначеному виробництві та терміни їх чинності.

Сутність АПАРАТ має містити загальну інформацію про установки, які беруть участь у відповідних технологічних процесах, місце їх розташування, обсяг виробництва кожної з них та наявні шкідливі речовини.

Сутність РЕЧОВИНА має містити інформацію про припустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони, клас небезпеки та характер їх дії на організм.

Між наведеними сутностями існують такі зв'язки [27]:

1. «1:M» («один до багатьох») – ДОКУМЕНТ ООН ↔ ДОКУМЕНТ УКРАЇНИ, ДЕСТ ВИРОБНИЦТВА ↔ РЕЧОВИНА;
2. «N:M» («багато до багатьох») – ДОКУМЕНТ УКРАЇНИ ↔ ДЕСТ ВИРОБНИЦТВА, ДЕСТ ВИРОБНИЦТВА ↔ АПАРАТ, ДОКУМЕНТ ООН ↔ РЕЧОВИНА, АПАРАТ ↔ РЕЧОВИНА.

Схему даних всіх сутностей з відображенням зв'язків між ними, виконану в середовищі *MS Access*, наведено на рис. 2.3.

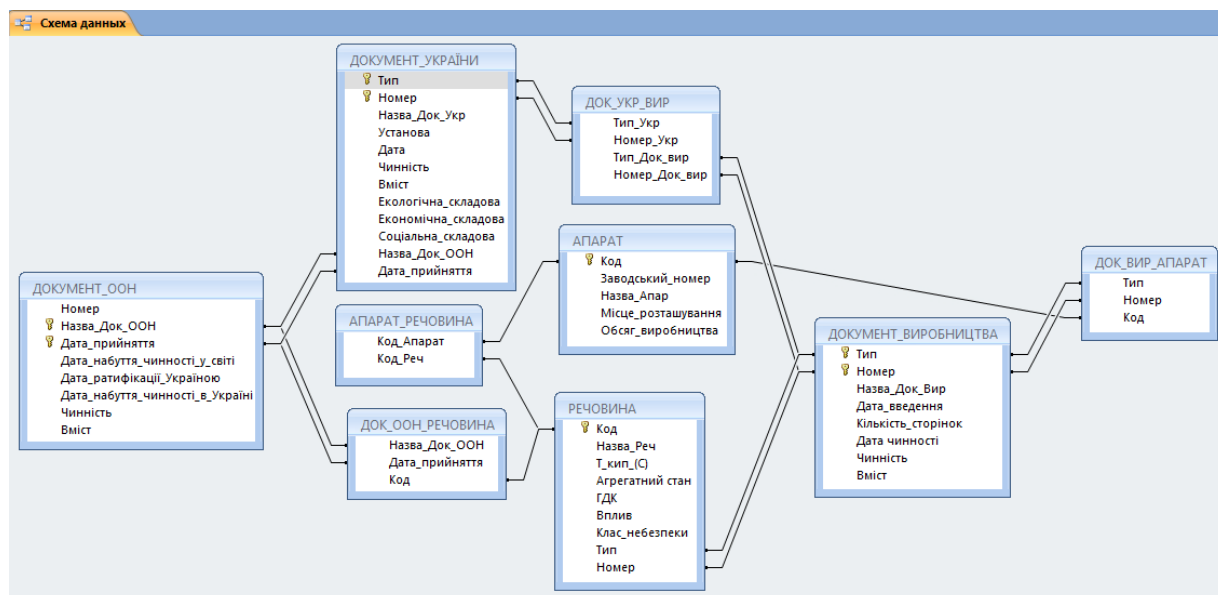


Рисунок 2.3 – Схема даних для ПО «СТАЛИЙ РОЗВИТОК»

Наведемо на рис. 2.4 – 2.6 відповідно такі зв'язки між сутностями: «РЕЧОВИНА» й «ДОКУМЕНТ ООН»; «РЕЧОВИНА» й «АПАРАТ»; «ДОКУМЕНТ УКРАЇНИ» й «ДЕСТ ВИРОБНИЦТВА».

РЕЧОВИНА									
Код	Назва_Реч	Т_кип_(С)	Агрегатний стан	ГДК	Вплив	Клас_небезпеки	Тип	Номер	Добавить поле
76	Сірчистий ангідрид	п		10		III	ДЕСТ	12.1.005-88	
127	Бензин	80 п		100		IV	ДЕСТ	12.1.005-88	
131	Бензол	80,1 п		15/5	К	II	ДЕСТ	12.1.005-88	
Назва_Док_ООН									
Конвенція про захист від небезпеки отруєння бензолом № 136								02.06.1971	131
Конвенція про боротьбу з небезпекою, спричинюваною канцерогенними речовинами й аг								24.06.1974	131
*									131
136	Бензпирен	495 а		0,00015	К	I	ДЕСТ	12.1.005-88	
486	Кумол	152,39 п		50		IV	ДЕСТ	12.1.005-88	
852	Прен	400 а		0,03		I	ДЕСТ	12.1.005-88	
915	Сірководень	п		10	О	II	ДЕСТ	12.1.005-88	
1032	Толуол	110,6 п		150/50		III	ДЕСТ	12.1.005-88	
1110	Фенантрен	340,1 а		0,8		II	ДЕСТ	12.1.005-88	
14817	Двоокис вуглецю	п		27000/9		IV	ДСТУ	4817:2007	
Назва_Док_ООН									
Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату								09.05.1992	14817
*									14817

Рисунок 2.4 – Зв'язок сутностей «РЕЧОВИНА» й «ДОКУМЕНТ ООН»

РЕЧОВИНА									
Код	Назва_Реч	Т_кип_(С)	Агрегатний	ГДК	Вплив	Клас_небе.	Тип	Номер	Добавить поле
76	Сірчистий ані	п		10		III	ДЕСТ	12.1.005-88	
Код_Апара									
5									
*									
127	Бензин	80 п		100		IV	ДЕСТ	12.1.005-88	
Код_Апара									
1									
2									
3									
4									
5									
*									
131	Бензол	80,1 п		15/5	К	II	ДЕСТ	12.1.005-88	
Код_Апара									
3									
4									
5									
*									
136	Бензпирен	495 а		0,00015	К	I	ДЕСТ	12.1.005-88	
486	Кумол	152,39 п		50		IV	ДЕСТ	12.1.005-88	
852	Прен	400 а		0,03		I	ДЕСТ	12.1.005-88	
915	Сірководень	п		10	О	II	ДЕСТ	12.1.005-88	
1032	Толуол	110,6 п		150/50		III	ДЕСТ	12.1.005-88	
1110	Фенантрен	340,1 а		0,8		II	ДЕСТ	12.1.005-88	
14817	Двоокис вугл	п		27000/9000		IV	ДСТУ	4817:2007	

Рисунок 2.5 – Зв'язок сутностей «РЕЧОВИНА» й «АПАРАТ»

ДОКУМЕНТ УКРАЇНИ									
Тип	Номер	Назва_Док_Укр	Установа	Дата	Чинність	Вміст	Екологічна	Економічна	Соці
Закон	№ 1268-XII	Про охорону навколишнього середовища ВР		26.06.1991	✓	http://zakon.u	✓	✓	✓
Тип_Док_е									
ДЕСТ									
Номер_Док_е									
12.1.005-88									
*									
Закон	№ 1956-VI	Про ратифікацію Конвенції Міжнародної ох ВР		10.03.2010	✓	https://zakon	✓	✓	✓
Закон	№ 435/96	Про ратифікацію Рамкової конвенції ООН і ВР		29.10.1996	✓	https://zakon	✓	✓	✓
Кодекс	№ 214/95	Водний кодекс України	ВР	06.06.1995	✓	http://zakon.u	✓	✓	✓

Рисунок 2.6 – Зв'язок сутностей «ДОКУМЕНТ УКРАЇНИ» й «ДЕСТ ВИРОБНИЦТВА»

Створимо запит БД до таблиць «ДОКУМЕНТ ООН» і «РЕЧОВИНА», який буде відображати розроблені світовими організаціями документи СР, що регулюють види та властивості шкідливих речовин, які можуть утворюватися у повітрі робочої зони, і статус цих документів на території України. Результат запиту наведено на рис. 2.7.

Назва_Док_ООН	Дата_прийняття	Чинність	Назва_Реч	ГДК	Клас_небезпеки	Вплив
Конвенція про захист від небезпеки отруєння бензолом № 136	02.06.1971	<input type="checkbox"/>	Бензол	15/5	II	К
Конвенція про боротьбу з небезпекою, спричинюваною канцерогенами	24.06.1974	<input checked="" type="checkbox"/>	Бензол	15/5	II	К
Конвенція про боротьбу з небезпекою, спричинюваною канцерогенами	24.06.1974	<input checked="" type="checkbox"/>	Бензпірен	0,00015	I	К
Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату	09.05.1992	<input checked="" type="checkbox"/>	Двоокис вуглецю	27000/9000	IV	

Рисунок 2.7 – Запит БД до таблиць «ДОКУМЕНТ ООН» і «РЕЧОВИНА»

Висновки до розділу 2

У даному розділі була проаналізована ХТС по очищенню олив та мастил адсорбентами як об'єкта автоматизації та її особливості з позиції документів сталого розвитку. Також були визначені шкідливі речовини, їх вплив на оточуюче середовище й етапи, на яких вони можуть утворюватися та/або виділятися в атмосферу у процесах очищення.

Виконана декомпозиція зазначеної ХТС з визначенням задач керування кожного етапу технологічної ланки. Відповідно до цих задач сформовані критерії оптимального керування з урахуванням економічної та екологічної складових концепції СР й запропонований алгоритм керування процесами очищення олив та мастил у контексті сталого розвитку.

Також у даному розділі запропонована БД нормативно-правових документів СР виробництва, яка дозволить отримувати інформацію про обмеження на показники якості оливи або мастила, вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони тощо.

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ОЛИВ ТА МАСТИЛ В АДСОРБЕРІ

З огляду на вимоги, встановлені до якості олив та мастил, та негативний вплив речовин, що можуть утворюватися та виділятися в атмосферу у процесі їх очищення, актуальним є створення таких засобів інформаційного та математичного забезпечень, які дозволять у режимі нормальної експлуатації обладнання розв'язувати задачі оптимального керування, пов'язані відповідно з якістю готового продукту та зменшенням забруднення довкілля.

Таким чином, постає необхідність формування сукупності задач та створення моделей процесу очищення олив та мастил, у тому числі імітаційних, для підвищення ефективності автоматичних систем керування, врахування положень концепції сталого розвитку щодо викидів шкідливих речовин на виробництві та забезпечення вимог, встановлених до якості вихідного продукту [28].

Концепція сталого розвитку передбачає розв'язання задач оптимального керування за економічним, екологічним та соціальним критеріями (див. розділ

2). Для цієї задачі необхідні моделі статичних режимів технологічних процесів. Моделюванню підлягають функції мети, пов'язані з критеріями, й такі, що мають місце при використанні обмежувальних виразів у задачах умовної оптимізації, зокрема, залежностей показників якості від технологічних змінних.

Для підвищення ефективності роботи систем керування необхідні також моделі динаміки каналів керування та збурення, які використовують для налаштування параметрів регуляторів та часового узгодження сигналів. Зазначені моделі повинні давати можливість коригувати їх у режимі неперервної роботи обладнання [28].

Імітаційна модель потрібна для порівняння систем керування.

3.1. Аналіз існуючих математичних моделей адсорберів

У статті [29] розглянуто випадок процесу масообміну з нерухомим шаром твердої фази – силікагелем, – коли в масопереносі бере участь лише один компонент – водяна пара, концентрація якої у вихідній суміші з повітрям невелика (можна знехтувати зміною витрати останньої) і коли процес протікає в приблизно ізотермічних умовах; крім того, обмежилися системами, для яких ізотерми адсорбції не мають точок перегину, тобто можливе застосування теорії Ленгмюра.

Динаміка сорбційних процесів відображає просторово-часові розподіли компонентів між фазами системи (одна з яких тверда), що виникають при переміщенні цих фаз один відносно одного [29].

Завданням динамічного моделювання процесу адсорбції є отримання функцій розподілу адсорбату, для чого в статті використаний феноменологічний метод, який встановлює функціональні залежності між величинами, що характеризують процес з макроскопічної точки зору (без пояснень молекулярно-кінетичного або мікроскопічного явищ).

При моделюванні були прийнято такі спрощення:

1. адсорбують лише один компонент потоку – водяну пару;
2. концентрація речовини, яку адсорбують, (адсорбату) в адсорбенті до початку процесу дорівнює нулю;
3. концентрація речовини, яку адсорбують з вихідної суміші, (адсорбтиву) у вхідному потоці постійна;
4. рухома фаза нестислива, і концентрація речовини, яку адсорбують, в ній так мала, що можна знехтувати змінами щільності потоку внаслідок спаду адсорбтиву;
5. рух потоку здійснюють в одному напрямку з постійною швидкістю при відсутності поздовжнього перемішування (тобто приймають модель ідеального витіснення).

Таким чином, у разі одновимірної задачі динаміку нерівноважної ізотермічної адсорбції описують рівняннями матеріального балансу, кінетики та ізотерми адсорбції:

$$\begin{cases} \varepsilon \frac{\partial c}{\partial \tau} + \rho_{\text{нас}} \frac{\partial X}{\partial \tau} + w \frac{\partial c}{\partial x} = 0; \\ \frac{\rho_{\text{нас}}}{a} \frac{\partial X}{\partial \tau} = K_y (c - c^*(X)) = K_y \frac{c_{\text{н}}}{X^*(c_{\text{н}})} (X^*(c) - X); \\ X^* = f(c), \end{cases} \quad (3.1)$$

де ε – пористість шару; $\rho_{\text{нас}}$ – насипна щільність сорбенту; w – фіктивна швидкість газового середовища, що рухають через шар; $c_{\text{н}}$ і c – відповідно початкова і поточна концентрації речовини, що адсорбують, в газовій фазі, кг/м³; X – концентрація речовини в сорбенті, яку вилучають, кг/(кг чистого сорбенту); K_y – коефіцієнт масопередачі (кількість речовини, яка адсорбувалася з газової суміші в сорбенті, на одиницю рушійної сили в газовій фазі); K_x – коефіцієнт масопередачі (кількість речовини, яка прийшла з газової суміші в адсорбент на одиницю рушійної сили у твердій фазі).

Концентрації c та X є функціями двох змінних: часу τ і поздовжньої координати x , відлік якої ведуть від входу суміші в шар сорбенту.

Систему диференціальних рівнянь (3.1) розв'язують з урахуванням таких початкових і граничних умов:

$$\tau = 0, c(0, x) = 0, X(0, x) = 0; \quad (3.2)$$

$$\tau > 0, x = 0, c(\tau, 0) = c_H; \quad (3.3)$$

Прийнята початкова умова (3.2) означає, що до початку процесу в газовій та у твердій фазах адсорбат відсутній, а гранична умова (3.3) відображає надходження в шар газового потоку з постійною концентрацією адсорбтиву.

Система (3.1) з початковими (3.2) і граничними умовами (3.3) в загальному випадку аналітичного рішення не має, тому використовували чисельний розв'язок. На основі такої математичної моделі розраховано процес адсорбції водяної пари з повітря нерухомим шаром силікагелю й отримано чисельне рішення системи (3.1) щодо функцій $c(\tau, x)$ і $X(\tau, x)$.

Отримана математична модель дозволяє проводити чисельні експерименти по визначенню впливу різних параметрів процесу (витрати, початкової концентрації) на вид (форму) вихідної кривої, але вона враховує лише один компонент, який вилучають з вихідної сировини, й може бути використана лише у випадку малих значень його концентрацій.

У [30] автори запропонували математичну модель динаміки адсорбції включень на поверхню розділу фаз рідина-газ у процесі молекулярної дифузії з метою визначення їх концентрації за капілярно-поверхневим методом, в основі якого лежить залежність зміни характеристик поверхні розділу фаз у процесі її формування від фізико-хімічних властивостей середовищ, які контактують між собою. При цьому, за рахунок вибіркового адсорбційно-десорбційних процесів у результаті молекулярної дифузії, співвідношення концентрацій контрольованого компонента у поверхневому шарі та в об'ємній фазі може складати декілька порядків, що дає можливість виявляти мікрровключення шуканого компонента.

Для методологічного обґрунтування такого методу необхідно встановити залежності між якісним і кількісним складом контрольованих включень у середовищі та зміною характеристик поверхні розділу фаз рідина-газ. Однею

з проміжних задач є визначення відповідностей між концентрацією включень у газовому або рідинному середовищах, їх надлишковою концентрацією у поверхневому шарі та динамікою поверхневих характеристик. Вирішення цієї задачі зводять до математичного моделювання процесу адсорбції на поверхні розділу фаз у процесі молекулярної дифузії.

Модель представляють граничною задачею, при формуванні якої вводять такі припущення:

1. надходження і видалення рідини є незначним у порівнянні з об'ємом водоймища, тому припускають ламінарний характер течій;
2. надходження і відтік рідини відбувається в обмежених областях на границі водоймища;
3. є дві граничні поверхні контакту рідини: з дном водоймища – S_1 і з повітрям – S_2 ;
4. припускають, що коефіцієнт молекулярної дифузії D по всьому об'єму є сталою величиною.

У деякій просторово-часовій точці (x, y, z, t) вводять позначення компонентів вектора швидкості руху рідини V по осях Ox, Oy, Oz через V_x, V_y, V_z , а коефіцієнтів дифузії у відповідних напрямках через D_x, D_y, D_z , тоді потоки речовини з концентрацією $c(x, y, z, t)$ визначають виразами

$$V_x c - D_x \frac{\partial c}{\partial x}, V_y c - D_y \frac{\partial c}{\partial y}, V_z c - D_z \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (3.4)$$

Виходячи з закону збереження маси речовини, рівняння балансу неконсервативної речовини (тобто такої, концентрація якої у вихідній сировині зменшується в результаті перебігу процесу адсорбції), що розповсюджується в рідині, можна представити у вигляді диференційного рівняння в частинних похідних:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} - V_x c \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} - V_y c \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} - V_z c \right) + f(x, y, z, t), \quad (3.5)$$

де $f(x, y, z, t)$ – функція, яка описує інтенсивність джерела забруднень.

Для визначеності рівняння (3.5) задають початкові та граничні умови.

В загальному процес масопереносу з об'ємної фази у поверхневий шар за рахунок молекулярної дифузії описують одномірним рівнянням дифузії:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} \quad (3.6)$$

з такими початковими і граничними умовами:

$$\begin{cases} c(x,0) = c_N, \\ x \neq 0, \end{cases} \quad c(0,0) = c_f, \quad c(\infty,t) = c_N, \quad (3.7)$$

$$\Delta \frac{\partial c(x,t)}{\partial t} \Big|_{x=0} = D \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (3.8)$$

де $c(x, t)$ – функція зміни концентрації включень у об'ємній фазі у просторі і часі; c_N – початкова концентрація включень у об'ємній фазі, моль/м; x, t – відповідно просторова і часова координати; c_f – приведена початкова концентрація включень у поверхневому шарі, моль/м; D – коефіцієнт молекулярної дифузії у напрямку x в об'ємній фазі; Δ – товщина поверхневого шару.

Вираз (3.8) описує процес накопичення включень у поверхневому шарі, й може мати додатний або від'ємний прирости, залежно від співвідношення початкових концентрацій у поверхневому шарі й об'ємній фазі.

Для розв'язання рівнянь (3.6) – (3.8), їх апроксимують різницевиими рівняннями по просторовій координаті і приводять до безрозмірної форми. Далі отриману систему лінійних диференційних рівнянь представляють як рівняння змінних стану у стандартній формі й вирішують задачу з крайовими умовами чисельними методами.

Наведені у цьому розділі, а також у пункті 1.2 методи моделювання процесів адсорбції дозволяють досліджувати їх динаміку, але вони враховують лише один компонент, який вилучають з вихідної сировини, та є складними з точки зору чисельного визначення коефіцієнтів моделі (масопередачі, рівноважних концентрацій тощо).

При створенні моделей процесу адсорбційного очищення олив та мастил необхідно окремо враховувати вміст декількох компонентів (ароматичних вуглеводнів, смол, сірчистих з'єднань) для розв'язання задач оптимального керування згідно з положеннями концепції сталого розвитку (моделі статичного режиму), створення систем керування (моделі динамічного режиму) та можливості їх порівняння (імітаційні моделі).

3.2. Особливості процесу адсорбції як об'єкта моделювання

Високоароматизований рафінат широко використовують як сировину для нафтохімічної промисловості, тому основною вимогою до очищуваних олив є отримання останніх з високим класом чистоти. Одним з основних апаратів, що забезпечує якість вихідного продукту, є адсорбер, технологічна схема якого зображена на рис. 3.1.

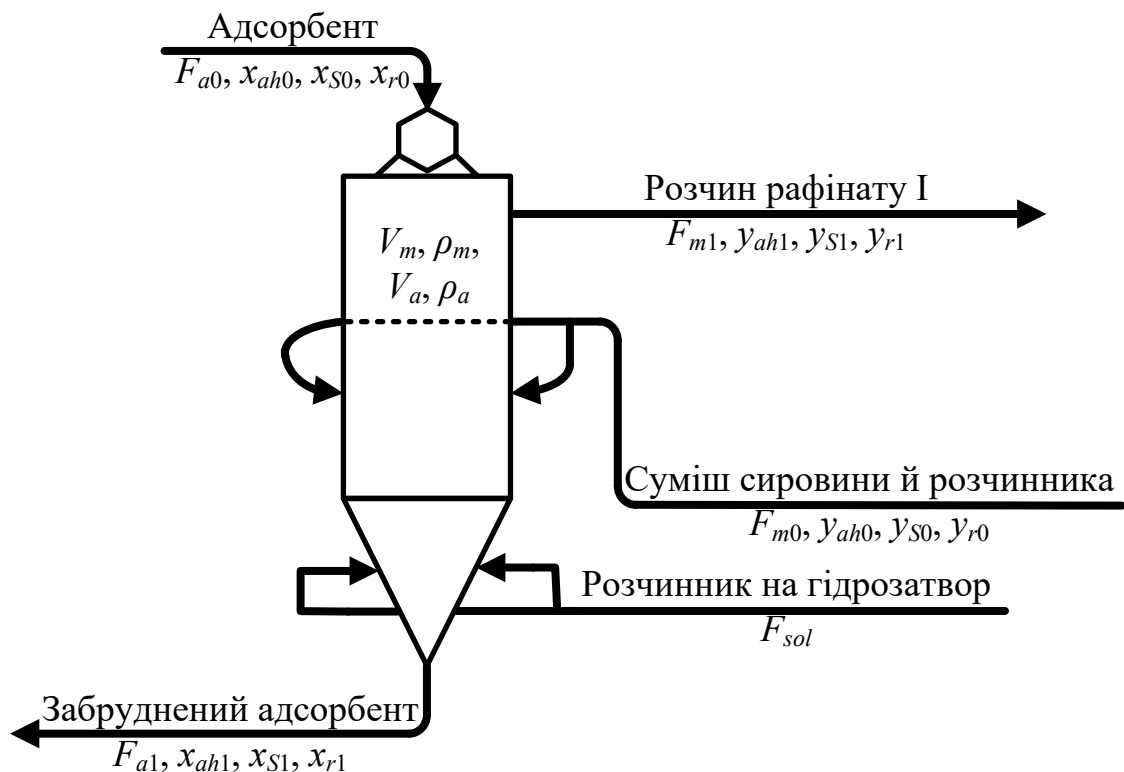


Рисунок 3.1 – Технологічна схема адсорбера:

F_{m0}, F_{m1} – відповідно початкова та кінцева витрати суміші сировини й розчинника; F_{a0}, F_{a1} – відповідно початкова та кінцева витрати адсорбенту; F_{sol} – витрата розчинника на гідрозатвор; y_{ah0}, y_{ah1} – відповідно початкова та кінцева концентрації ароматичних

вуглеводнів у суміші сировини й розчинника; y_{S0}, y_{S1} – відповідно початкова та кінцева концентрації сірки в суміші сировини й розчинника; y_{r0}, y_{r1} – відповідно початкова та кінцева концентрації смол у суміші сировини й розчинника; x_{ah0}, x_{ah1} – відповідно початкова та кінцева концентрації ароматичних вуглеводнів у адсорбенті; x_{S0}, x_{S1} – відповідно початкова та кінцева концентрації сірки в адсорбенті; x_{r0}, x_{r1} – відповідно початкова та кінцева концентрації смол в адсорбенті; V_m, V_a – об'єми, які займають відповідно суміш та адсорбент в апараті; ρ_m, ρ_a – густини суміші та адсорбенту відповідно

У верхню частину адсорбера неперервно подають адсорбент, протитечією якому направляють охолоджену суміш сировини й розчинника. Останню піднімають вгору, внаслідок чого 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.

Основні параметри статичного режиму наведені в додатку 1.

Розглянемо вхідні потоки адсорбера, розрахункова схема якого зображена на рис. 3.2. У вхідні трубопроводи потрапляють суміш сировини й розчинника й адсорбент.

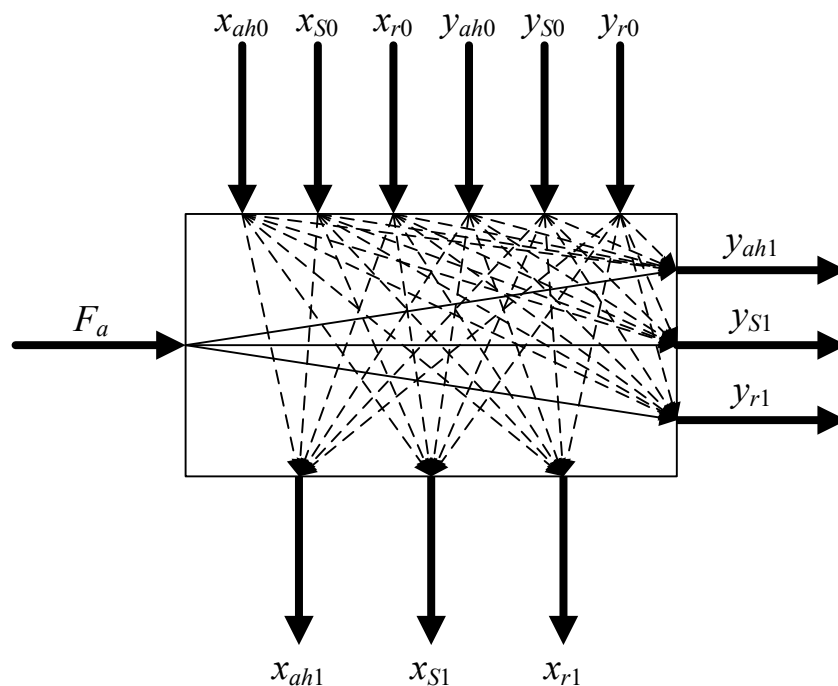


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема адсорбера:

F_a – керувальний вплив; $x_{ah0}, x_{s0}, x_{r0}, y_{ah0}, y_{s0}, y_{r0}$ – збурення; y_{ah1}, y_{s1}, y_{r1} – регульовані величини; x_{ah1}, x_{s1}, x_{r1} – контрольовані величини

Технологічними змінними, які характеризують робочий стан адсорбера, є вміст шкідливих речовин у вихідному продукті (розчині рафінату І): ароматичних вуглеводнів (y_{ah1}), сірки (y_{s1}) та смол (y_{r1}). Оскільки ці показники визначають ефективність процесу адсорбції, необхідно підтримувати їх у заданих межах (по можливості стабілізувати) [28].

Керувальним впливом обрано витрату адсорбенту (F_a) на вході в апарат. Основними збуреннями є вміст шкідливих речовин в адсорбенті та суміші сировини й розчинника на вході в адсорбер відповідно: ароматичних вуглеводнів (x_{ah0}, y_{ah0}), сірки (x_{s0}, y_{s0}) та смол (x_{r0}, y_{r0}).

Контрольованими змінними є вміст ароматичних вуглеводнів (x_{ah1}), сірки (x_{s1}) та смол (x_{r1}) в забрудненому адсорбенті.

В технологічному об'єкті керування накладені обмеження на вхідні змінні:

$$x_{ah0, \min} < x_{ah0} < x_{ah0, \max};$$

$$y_{ah0, \min} < y_{ah0} < y_{ah0, \max};$$

$$x_{s0, \min} < x_{s0} < x_{s0, \max};$$

$$y_{s0, \min} < y_{s0} < y_{s0, \max};$$

$$x_{r0, \min} < x_{r0} < x_{r0, \max};$$

$$y_{r0, \min} < y_{r0} < y_{r0, \max}.$$

При моделюванні статичного та динамічного режимів адсорбера були прийняті такі припущення:

1. витрати суміші сировини й розчинника та адсорбенту внаслідок перерозподілу ароматичних вуглеводнів, сірки та смол між ними, не змінюються: $F_{m0} = F_{m1} = F_m$, $F_{a0} = F_{a1} = F_a$;
2. розчинник на гідрозатвор, який подають в нижню частину адсорбера для попередження виносу сировини з апарату, не впливає на перебіг процесу адсорбції, тому цей технологічний потік в моделі не враховують;

3. температура адсорбенту на виході адсорбера дорівнює його температурі всередині апарату;
4. температура сировини, яку було вивантажено з апарата, дорівнює її температурі всередині адсорбера;
5. розподіл концентрацій ароматичних вуглеводнів, сірки та смол в суміші сировини й розчинника та адсорбенті є одномірним (у напрямку руху потоку сировини) лінійним.

3.2.1. Модель статичного режиму об'єкта керування

Система матеріальних балансів (рівняння 3.9 – 3.14) для ароматичних вуглеводнів, сірки та смол у суміші сировини й розчинника та адсорбенті [16]:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_m y_{ah0} - F_m y_{ah1} - SK_{m,ah} \frac{(y_{ah0} - y_m(x_{ah1})) + (y_{ah1} - y_m(x_{ah0}))}{2} = 0; \end{array} \right. \quad (3.9)$$

$$F_a x_{ah0} - F_a x_{ah1} + SK_{a,ah} \frac{(x_a(y_{ah1}) - x_{ah0}) + (x_a(y_{ah0}) - x_{ah1})}{2} = 0; \quad (3.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_m y_{S0} - F_m y_{S1} - SK_{m,S} \frac{(y_{S0} - y_m(x_{S1})) + (y_{S1} - y_m(x_{S0}))}{2} = 0; \end{array} \right. \quad (3.11)$$

$$F_a x_{S0} - F_a x_{S1} + SK_{a,S} \frac{(x_a(y_{S1}) - x_{S0}) + (x_a(y_{S0}) - x_{S1})}{2} = 0; \quad (3.12)$$

$$F_m y_{r0} - F_m y_{r1} - SK_{m,r} \frac{(y_{r0} - y_m(x_{r1})) + (y_{r1} - y_m(x_{r0}))}{2} = 0; \quad (3.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_a x_{r0} - F_a x_{r1} + SK_{a,r} \frac{(x_a(y_{r1}) - x_{r0}) + (x_a(y_{r0}) - x_{r1})}{2} = 0, \end{array} \right. \quad (3.14)$$

де $y_m(x_i)$, $x_a(y_i)$ – рівноважні концентрації ароматичних вуглеводнів, сірки та смол у суміші сировини й розчинника та адсорбенті відповідно; $i = ah1, ah0, S1, S0, r1, r0$ – відповідні індекси; K_m, K_a – коефіцієнти масообміну, подані через мольні частки компонента в суміші сировини й розчинника та адсорбенті; S – поверхня масообміну в адсорбері; 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.

Рівняння (3.9), (3.11), (3.13) є матеріальними балансами розподілу відповідно ароматичних вуглеводнів, сірки та смол у суміші сировини й розчинника. Рівняння (3.10), (3.12), (3.14) описують розподіл відповідно ароматичних вуглеводнів, сірки та смол в адсорбенті.

Для рівноважних концентрацій прийнято:

$$y_m(x_i) = mx_i, x_a(y_i) = y_i/m.$$

З системи рівнянь (3.9) отримаємо моделі статичних режимів за каналами керування. Попередньо введемо такі позначення:

$$\begin{aligned} A_{ah1}^1 &= \frac{SK_{a,ah}}{2} \left(x_{ah0} + x_{ah1} - \frac{y_{ah0}}{m_{ah}} \right) - \frac{SK_{m,ah}}{2} (m_{ah}x_{ah0} - y_{ah0} + m_{ah}x_{ah1}); \\ A_{ah1}^2 &= \frac{SK_{a,S}}{2} \left(x_{S0} + x_{S1} - \frac{y_{S0}}{m_S} - \frac{y_{S1}}{m_S} \right) + \frac{SK_{m,S}}{2} (y_{S0} + y_{S1} - m_Sx_{S0} - m_Sx_{S1}); \\ A_{ah1}^3 &= \frac{SK_{a,r}}{2} \left(x_{r0} + x_{r1} - \frac{y_{r0}}{m_r} - \frac{y_{r1}}{m_r} \right) + \frac{SK_{m,r}}{2} (y_{r0} + y_{r1} - m_rx_{r0} - m_rx_{r1}); \\ A_{ah1}^4 &= -F_my_{ah0} - F_my_{S0} + F_my_{S1} - F_my_{r0} + F_my_{r1}; \\ A_{ah1}^5 &= -x_{ah0} + x_{ah1} - x_{S0} + x_{S1} - x_{r0} + x_{r1}; \\ A_{ah1}^6 &= F_m + \frac{SK_{m,ah}}{2} - \frac{SK_{a,ah}}{2m_{ah}}; \\ A_{S1}^1 &= \frac{SK_{a,ah}}{2} \left(x_{ah0} + x_{ah1} - \frac{y_{ah0}}{m_{ah}} - \frac{y_{ah1}}{m_{ah}} \right) + \frac{SK_{m,ah}}{2} (y_{ah0} + y_{ah1} - m_{ah}x_{ah0} - m_{ah}x_{ah1}); \\ A_{S1}^2 &= \frac{SK_{a,S}}{2} \left(x_{S0} + x_{S1} - \frac{y_{S0}}{m_S} \right) - \frac{SK_{m,S}}{2} (m_Sx_{S0} - y_{S0} + m_Sx_{S1}); \\ A_{S1}^3 &= \frac{SK_{a,r}}{2} \left(x_{r0} + x_{r1} - \frac{y_{r0}}{m_r} - \frac{y_{r1}}{m_r} \right) + \frac{SK_{m,r}}{2} (y_{r0} + y_{r1} - m_rx_{r0} - m_rx_{r1}); \\ A_{S1}^4 &= -F_my_{ah0} + F_my_{ah1} - F_my_{S0} - F_my_{r0} + F_my_{r1}; \\ A_{S1}^5 &= -x_{ah0} + x_{ah1} - x_{S0} + x_{S1} - x_{r0} + x_{r1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{S1}^6 &= F_m + \frac{SK_{m,S}}{2} - \frac{SK_{a,S}}{2m_s}; \\
A_{r1}^1 &= \frac{SK_{a,ah}}{2} \left(x_{ah0} + x_{ah1} - \frac{y_{ah0}}{m_{ah}} - \frac{y_{ah1}}{m_{ah}} \right) + \frac{SK_{m,ah}}{2} (y_{ah0} + y_{ah1} - m_{ah}x_{ah0} - m_{ah}x_{ah1}); \\
A_{r1}^2 &= \frac{SK_{a,S}}{2} \left(x_{S0} + x_{S1} - \frac{y_{S0}}{m_s} - \frac{y_{S1}}{m_s} \right) + \frac{SK_{m,S}}{2} (y_{S0} + y_{S1} - m_sx_{S0} - m_sx_{S1}); \\
A_{r1}^3 &= \frac{SK_{a,r}}{2} \left(x_{r0} + x_{r1} - \frac{y_{r0}}{m_r} \right) - \frac{SK_{m,r}}{2} (m_rx_{r0} - y_{r0} + m_rx_{r1}); \\
A_{r1}^4 &= -F_my_{ah0} + F_my_{ah1} - F_my_{S0} + F_my_{S1} - F_my_{r0}; \\
A_{r1}^5 &= -x_{ah0} + x_{ah1} - x_{S0} + x_{S1} - x_{r0} + x_{r1}; \\
A_{r1}^6 &= F_m + \frac{SK_{m,r}}{2} - \frac{SK_{a,r}}{2m_r}.
\end{aligned}$$

Математична модель статичного режиму за каналом керування «витрата адсорбенту \rightarrow вміст ароматичних вуглеводнів на виході з адсорбера»: $y_{ah1} = f(F_a)$:

$$\begin{aligned}
y_{ah1}(F_a) &= -\frac{A_{ah1}^1 + A_{ah1}^2 + A_{ah1}^3 + A_{ah1}^4 + A_{ah1}^5 F_a}{A_{ah1}^6}; \\
y_{ah1}(F_a) &= -5,641F_a + 30,804.
\end{aligned}$$

Графік статичної характеристики за вказаним каналом наведено на рис.

3.3.

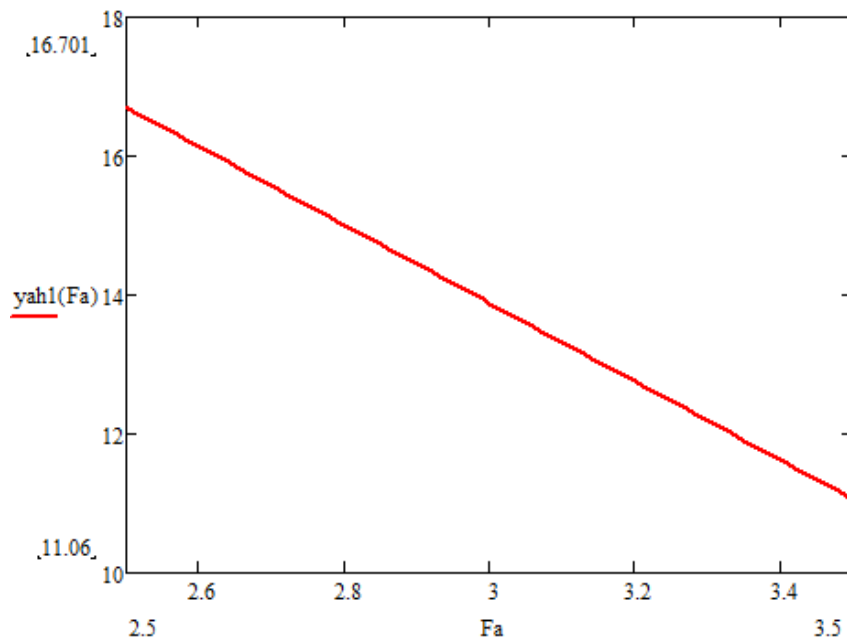


Рисунок 3.3 – Статична характеристика об'єкта за каналом керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$

Математична модель статичного режиму за каналом керування «витрата адсорбенту \rightarrow вміст сірки на виході з адсорбера»: $y_{S1} = f(F_a)$:

$$y_{S1}(F_a) = -\frac{A_{S1}^1 + A_{S1}^2 + A_{S1}^3 + A_{S1}^4 + A_{S1}^5 F_a}{A_{S1}^6};$$

$$y_{S1}(F_a) = -5,633F_a + 18,977.$$

Графік статичної характеристики за вказаним каналом наведено на рис.

3.4.

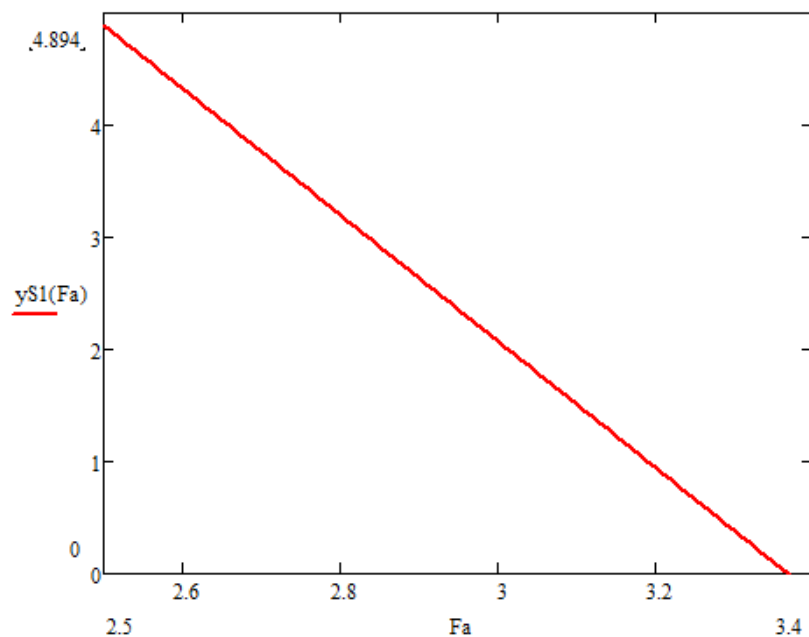


Рисунок 3.4 – Статична характеристика об'єкта за каналом керування $F_a \rightarrow y_{S1}$

Математична модель статичного режиму за каналом керування «витрата адсорбенту → вміст смол на виході з адсорбера»: $y_{r1} = f(F_a)$:

$$y_{r1}(F_a) = -\frac{A_{r1}^1 + A_{r1}^2 + A_{r1}^3 + A_{r1}^4 + A_{r1}^5 F_a}{A_{r1}^6};$$

$$y_{r1}(F_a) = -5,64F_a + 21,599.$$

Графік статичної характеристики за вказаним каналом наведено на рис.

3.5.

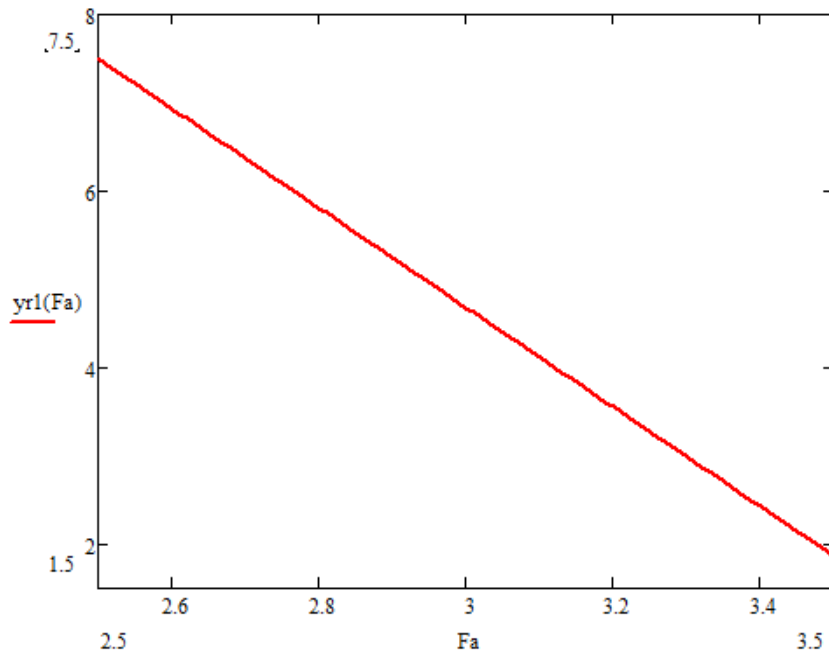


Рисунок 3.5 – Статична характеристика об'єкта за каналом керування $F_a \rightarrow y_{r1}$

3.2.2. Модель динамічного режиму об'єкта керування

Математичну модель динамічного режиму адсорбера отримано на основі матеріальних балансів у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь (3.15):

$$\left\{ \begin{aligned}
& F_m y_{ah0} - F_m y_{ah1} - SK_{m,ah} \frac{(y_{ah0} - y_m(x_{ah1})) + (y_{ah1} - y_m(x_{ah0}))}{2} = \\
& \quad = V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{y_{ah0} + y_{ah1}}{2} \right) + V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{x_{ah0} + x_{ah1}}{2} \right); \\
& F_a x_{ah0} - F_a x_{ah1} + SK_{a,ah} \frac{(x_a(y_{ah1}) - x_{ah0}) + (x_a(y_{ah0}) - x_{ah1})}{2} = \\
& \quad = V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{x_{ah0} + x_{ah1}}{2} \right) + V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{y_{ah0} + y_{ah1}}{2} \right); \\
& F_m y_{s0} - F_m y_{s1} - SK_{m,s} \frac{(y_{s0} - y_m(x_{s1})) + (y_{s1} - y_m(x_{s0}))}{2} = \\
& \quad = V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{y_{s0} + y_{s1}}{2} \right) + V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{x_{s0} + x_{s1}}{2} \right); \\
& F_a x_{s0} - F_a x_{s1} + SK_{a,s} \frac{(x_a(y_{s1}) - x_{s0}) + (x_a(y_{s0}) - x_{s1})}{2} = \\
& \quad = V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{x_{s0} + x_{s1}}{2} \right) + V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{y_{s0} + y_{s1}}{2} \right); \\
& F_m y_{r0} - F_m y_{r1} - SK_{m,r} \frac{(y_{r0} - y_m(x_{r1})) + (y_{r1} - y_m(x_{r0}))}{2} = \\
& \quad = V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{y_{r0} + y_{r1}}{2} \right) + V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{x_{r0} + x_{r1}}{2} \right); \\
& F_a x_{r0} - F_a x_{r1} + SK_{a,r} \frac{(x_a(y_{r1}) - x_{r0}) + (x_a(y_{r0}) - x_{r1})}{2} = \\
& \quad = V_a \rho_a \frac{d}{dt} \left(\frac{x_{r0} + x_{r1}}{2} \right) + V_m \rho_m \frac{d}{dt} \left(\frac{y_{r0} + y_{r1}}{2} \right).
\end{aligned} \right. \quad (3.15)$$

Система диференціальних рівнянь (3.15) є нелінійною. Така математична модель дає опис системи, але вона не придатна для подальшого аналізу й використання. Для отримання лінійної диференціальної системи, за допомогою якої можна встановити відповідні властивості адсорбера, лінеаризуємо систему нелінійних диференціальних рівнянь (3.15) в точках основного статичного режиму. Опис процесу лінеаризації рівнянь наведено в додатку 2.

Перетворення за Лапасом змінної часу. Для подання системи відповідними передатними функціями систему диференціальних рівнянь (Д2.3) необхідно записати в операційній формі, тобто після перетворення за Лапасом змінної часу $t \rightarrow p$ при нульових початкових умовах:

$$\Delta y_{ah1} \rightarrow y_{ah1}(p); \Delta y_{s1} \rightarrow y_{s1}(p); \Delta y_{r1} \rightarrow y_{r1}(p);$$

$$\Delta F_a \rightarrow F_a(p);$$

$$\Delta x_{ah0} \rightarrow x_{ah0}(p); \Delta x_{s0} \rightarrow x_{s0}(p); \Delta x_{r0} \rightarrow x_{r0}(p);$$

$$\Delta y_{ah0} \rightarrow y_{ah0}(p); \Delta y_{s0} \rightarrow y_{s0}(p); \Delta y_{r0} \rightarrow y_{r0}(p);$$

$$\Delta x_{ah1} \rightarrow x_{ah1}(p); \Delta x_{s1} \rightarrow x_{s1}(p); \Delta x_{r1} \rightarrow x_{r1}(p).$$

Отримаємо систему лінійних рівнянь відносно регульованих величин $y_{ah1}(p)$, $y_{s1}(p)$, $y_{r1}(p)$ та контрольованих змінних $x_{ah1}(p)$, $x_{s1}(p)$, $x_{r1}(p)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} (T_{y_{ah1}}p + 1) y_{ah1}(p) = (T_{y_{ah0}}p + K_{y_{ah0}y_{ah1}})y_{ah0}(p) + (T_{x_{ah1m}}p + K_{x_{ah1}y_{ah1}}) \times \\ \quad \times x_{ah1}(p) + (T_{x_{ah0m}}p + K_{x_{ah0}y_{ah1}})x_{ah0}(p); \\ (T_{x_{ah1}}p + 1) x_{ah1}(p) = K_{F_a x_{ah1}} F_a(p) + (T_{y_{ah1a}}p + K_{y_{ah1}x_{ah1}})y_{ah1}(p) + \\ \quad + (T_{y_{ah0a}}p + K_{y_{ah0}x_{ah1}})y_{ah0}(p) + (T_{x_{ah0a}}p + 1) x_{ah0}(p); \\ (T_{y_{s1}}p + 1) y_{s1}(p) = (T_{y_{s0}}p + K_{y_{s0}y_{s1}})y_{s0}(p) + (T_{x_{s1m}}p + K_{x_{s1}y_{s1}}) \times \\ \quad \times x_{s1}(p) + (T_{x_{s0m}}p + K_{x_{s0}y_{s1}})x_{s0}(p); \\ (T_{x_{s1}}p + 1) x_{s1}(p) = K_{F_a x_{s1}} F_a(p) + (T_{y_{s1a}}p + K_{y_{s1}x_{s1}})y_{s1}(p) + \\ \quad + (T_{y_{s0a}}p + K_{y_{s0}x_{s1}})y_{s0}(p) + (T_{x_{s0a}}p + 1) x_{s0}(p); \\ (T_{y_{r1}}p + 1) y_{r1}(p) = (T_{y_{r0}}p + K_{y_{r0}y_{r1}})y_{r0}(p) + (T_{x_{r1m}}p + K_{x_{r1}y_{r1}}) \times \\ \quad \times x_{r1}(p) + (T_{x_{r0m}}p + K_{x_{r1}y_{r1}})x_{r0}(p); \\ (T_{x_{r1}}p + 1) x_{r1}(p) = K_{F_a x_{r1}} F_a(p) + (T_{y_{r1a}}p + K_{y_{r1}x_{r1}})y_{r1}(p) + \\ \quad + (T_{y_{r0a}}p + K_{y_{r0}x_{r1}})y_{r0}(p) + (T_{x_{r0a}}p + 1) x_{r0}(p). \end{array} \right.$$

Виразимо $x_{ah1}(p)$, $x_{s1}(p)$, $x_{r1}(p)$ з другого, четвертого, шостого рівнянь даної системи та підставимо у перше, третє та п'яте відповідно. Отримаємо рівняння відносно $y_{ah1}(p)$, $y_{s1}(p)$, $y_{r1}(p)$:

$$\left\{ \begin{aligned} & [(T_{y_{ah1}}p + 1)(T_{x_{ah1}}p + 1) - (T_{x_{ah1m}}p + K_{x_{ah1}y_{ah1}})(T_{y_{ah1a}}p + K_{y_{ah1}x_{ah1}})]y_{ah1}(p) = \\ & = [(T_{y_{ah0}} + K_{y_{ah0}x_{ah1}})(T_{x_{ah1}}p + 1) + (T_{y_{ah0a}} + K_{y_{ah0}x_{ah1}})(T_{x_{ah1m}}p + K_{x_{ah1}y_{ah1}})] \times \\ & \quad \times y_{ah0}(p) + [(T_{x_{ah0m}}p + K_{x_{ah0}y_{ah1}})(T_{x_{ah1}}p + 1) + (T_{x_{ah1m}}p + K_{x_{ah1}y_{ah1}}) \times \\ & \quad \times (T_{x_{ah0a}}p + 1)]x_{ah0}(p) + (T_{x_{ah1m}}p + K_{x_{ah1}y_{ah1}})K_{F_a x_{ah1}}F_a(p); \\ & [(T_{y_{s1}}p + 1)(T_{x_{s1}}p + 1) - (T_{x_{s1m}}p + K_{x_{s1}y_{s1}})(T_{y_{s1a}}p + K_{y_{s1}x_{s1}})]y_{s1}(p) = \\ & = [(T_{y_{s0}} + K_{y_{s0}x_{s1}})(T_{x_{s1}}p + 1) + (T_{y_{s0a}} + K_{y_{s0}x_{s1}})(T_{x_{s1m}}p + K_{x_{s1}y_{s1}})]y_{s0}(p) + \\ & \quad + [(T_{x_{s0m}}p + K_{x_{s0}y_{s1}})(T_{x_{s1}}p + 1) + (T_{x_{s1m}}p + K_{x_{s1}y_{s1}})(T_{x_{s0a}}p + 1)] \times \\ & \quad \times x_{s0}(p) + (T_{x_{s1m}}p + K_{x_{s1}y_{s1}})K_{F_a x_{s1}}F_a(p); \\ & [(T_{y_{r1}}p + 1)(T_{x_{r1}}p + 1) - (T_{x_{r1m}}p + K_{x_{r1}y_{r1}})(T_{y_{r1a}}p + K_{y_{r1}x_{r1}})]y_{r1}(p) = \\ & = [(T_{y_{r0}} + K_{y_{r0}x_{r1}})(T_{x_{r1}}p + 1) + (T_{y_{r0a}} + K_{y_{r0}x_{r1}})(T_{x_{r1m}}p + K_{x_{r1}y_{r1}})]y_{r0}(p) + \\ & \quad + [(T_{x_{r0m}}p + K_{x_{r0}y_{r1}})(T_{x_{r1}}p + 1) + (T_{x_{r1m}}p + K_{x_{r1}y_{r1}})(T_{x_{r0a}}p + 1)] \times \\ & \quad \times x_{r0}(p) + (T_{x_{r1m}}p + K_{x_{r1}y_{r1}})K_{F_a x_{r1}}F_a(p). \end{aligned} \right.$$

Отже, передавальні функції за каналами керування: «витрата адсорбенту \rightarrow вміст ароматичних вуглеводнів на виході з адсорбера» ($F_a \rightarrow y_{ah1}$), «витрата адсорбенту \rightarrow вміст сірки на виході з адсорбера» ($F_a \rightarrow y_{s1}$) «витрата адсорбенту \rightarrow вміст смол на виході з адсорбера» ($F_a \rightarrow y_{r1}$) та збурення: «вміст ароматичних вуглеводнів на вході в адсорбер \rightarrow вміст ароматичних вуглеводнів на виході з адсорбера» ($y_{ah0} \rightarrow y_{ah1}$), «вміст сірки на вході в адсорбер \rightarrow вміст сірки на виході з адсорбера» ($y_{s0} \rightarrow y_{s1}$) «вміст смол на вході в адсорбер \rightarrow вміст смол на виході з адсорбера» ($y_{r0} \rightarrow y_{r1}$):

$$\left\{ \begin{aligned} W_{F_a \rightarrow y_{ah1}}(p) &= \frac{y_{ah1}}{F_a(p)}; \\ W_{F_a \rightarrow y_{s1}}(p) &= \frac{y_{s1}}{F_a(p)}; \\ W_{F_a \rightarrow y_{r1}}(p) &= \frac{y_{r1}}{F_a(p)}; \\ W_{y_{ah0} \rightarrow y_{ah1}}(p) &= \frac{y_{ah1}}{y_{ah0}(p)}; \\ W_{y_{s0} \rightarrow y_{s1}}(p) &= \frac{y_{s1}}{y_{s0}(p)}; \\ W_{y_{r0} \rightarrow y_{r1}}(p) &= \frac{y_{r1}}{y_{r0}(p)}. \end{aligned} \right.$$

Введемо позначення:

$$A = (T_{x_{ah1m}}p + K_{x_{ah1}y_{ah1}})K_{F_a x_{ah1}} + (T_{x_{s1m}}p + K_{x_{s1}y_{s1}})K_{F_a x_{s1}} +$$

$$\begin{aligned}
& + (T_{x_{r1m}}p + K_{x_{r1}y_{r1}})K_{F_a x_{r1}}; \\
& \left\{ \begin{aligned}
W_{F_a \rightarrow y_{ah1}}(p) &= \frac{A}{(T_{y_{ah1}}p + 1)(T_{x_{ah1}}p + 1) - (T_{x_{ah1m}}p + K_{x_{ah1}y_{ah1}})(T_{y_{ah1a}}p + K_{y_{ah1}x_{ah1}})} \\
W_{F_a \rightarrow y_{S1}}(p) &= \frac{A}{(T_{y_{S1}}p + 1)(T_{x_{S1}}p + 1) - (T_{x_{S1m}}p + K_{x_{S1}y_{S1}})(T_{y_{S1a}}p + K_{y_{S1}x_{S1}})} \\
W_{F_a \rightarrow y_{r1}}(p) &= \frac{A}{(T_{y_{r1}}p + 1)(T_{x_{r1}}p + 1) - (T_{x_{r1m}}p + K_{x_{r1}y_{r1}})(T_{y_{r1a}}p + K_{y_{r1}x_{r1}})} \\
W_{y_{ah0} \rightarrow y_{ah1}}(p) &= \frac{(T_{y_{ah0}} + K_{y_{ah0}x_{ah1}})(T_{x_{ah1}}p + 1) + (T_{y_{ah0a}} + K_{y_{ah0}x_{ah1}})(T_{x_{ah1m}}p + K_{x_{ah1}y_{ah1}})}{(T_{y_{ah1}}p + 1)(T_{x_{ah1}}p + 1) - (T_{x_{ah1m}}p + K_{x_{ah1}y_{ah1}})(T_{y_{ah1a}}p + K_{y_{ah1}x_{ah1}})} \\
W_{y_{S0} \rightarrow y_{S1}}(p) &= \frac{(T_{y_{S0}} + K_{y_{S0}x_{S1}})(T_{x_{S1}}p + 1) + (T_{y_{S0a}} + K_{y_{S0}x_{S1}})(T_{x_{S1m}}p + K_{x_{S1}y_{S1}})}{(T_{y_{S1}}p + 1)(T_{x_{S1}}p + 1) - (T_{x_{S1m}}p + K_{x_{S1}y_{S1}})(T_{y_{S1a}}p + K_{y_{S1}x_{S1}})} \\
W_{y_{r0} \rightarrow y_{r1}}(p) &= \frac{(T_{y_{r0}} + K_{y_{r0}x_{r1}})(T_{x_{r1}}p + 1) + (T_{y_{r0a}} + K_{y_{r0}x_{r1}})(T_{x_{r1m}}p + K_{x_{r1}y_{r1}})}{(T_{y_{r1}}p + 1)(T_{x_{r1}}p + 1) - (T_{x_{r1m}}p + K_{x_{r1}y_{r1}})(T_{y_{r1a}}p + K_{y_{r1}x_{r1}})}
\end{aligned} \right. \\
& \left\{ \begin{aligned}
W_{F_a \rightarrow y_{ah1}}(p) &= \frac{-998,64s - 5,63}{1200s + 1}; \\
W_{F_a \rightarrow y_{S1}}(p) &= \frac{-964,16s - 5,44}{1199s + 1}; \\
W_{F_a \rightarrow y_{r1}}(p) &= \frac{-1058s - 5,97}{1200s + 1}.
\end{aligned} \right.
\end{aligned}$$

Перехідні характеристики об'єкта за каналами керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$, $F_a \rightarrow y_{S1}$, $F_a \rightarrow y_{r1}$ наведено на рис. 3.7 – 3.9 відповідно для точки статичного режиму $F_a = 3,33$ кг/с. Реалізацію виконували за допомогою *Mathcad*. Лістинг наведено в додатку 3.

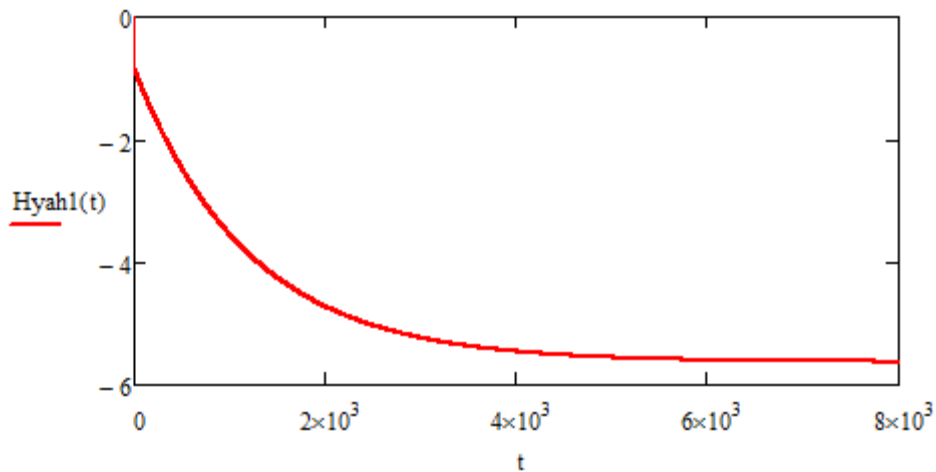


Рисунок 3.7 – Перехідна характеристика об'єкта за каналом керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$

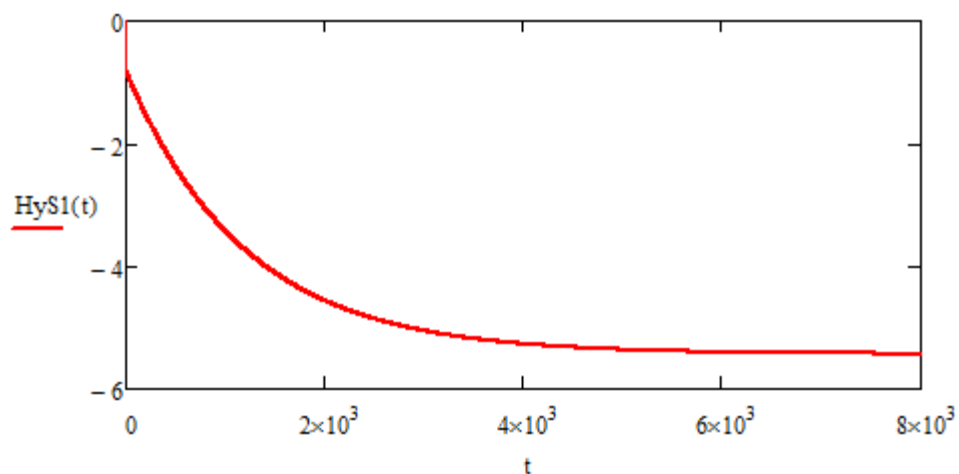


Рисунок 3.8 – Перехідна характеристика об'єкта за каналом керування $F_a \rightarrow y_{S1}$

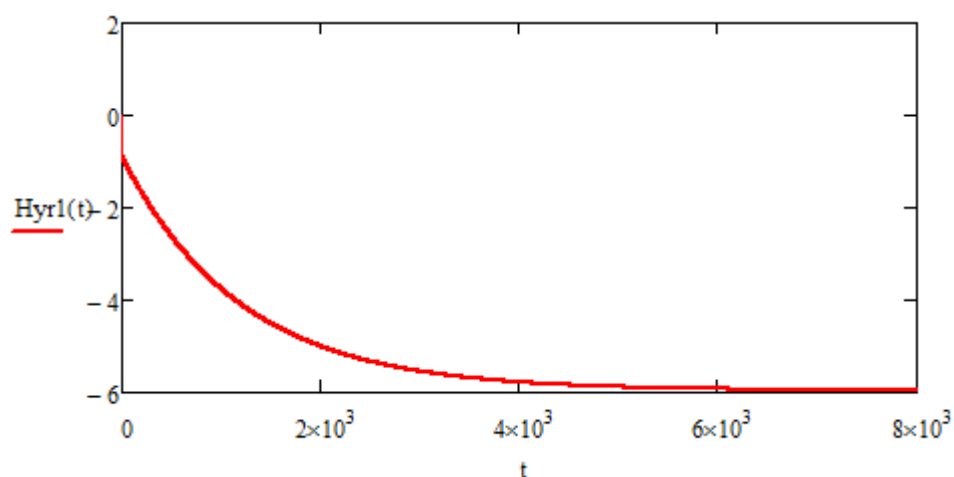


Рисунок 3.9 – Перехідна характеристика об'єкта за каналом керування $F_a \rightarrow y_{r1}$

Спотворення наведених перехідних характеристик можуть виникати внаслідок похибок моделей, що утворюються через спрощення, які приймали при їх створенні.

В об'єкті має місце запізнювання, значення якого, згідно з [30], приймемо $\tau = 60$ с. Передавальні функції ТОК із запізнюванням за каналами керування відповідно $F_a \rightarrow y_{ah1}$, $F_a \rightarrow y_{S1}$ та $F_a \rightarrow y_{r1}$:

$$W_{ah1e}(s) = W_{F_a \rightarrow y_{ah1}}(s)e^{-s\tau};$$

$$W_{S1e}(s) = W_{F_a \rightarrow y_{S1}}(s)e^{-s\tau};$$

$$W_{r1e}(s) = W_{F_a \rightarrow y_{r1}}(s)e^{-s\tau}.$$

де вираз $e^{-s\tau}$ представимо дробом Паде:

$$e^{-s\tau} = \frac{1 - \frac{\tau}{2}s + \frac{\tau^2}{12}s^2}{1 + \frac{\tau}{2}s + \frac{\tau^2}{12}s^2}$$

Отже, передавальні функції ТОК із запізнюванням за каналами керування відповідно $F_a \rightarrow y_{ah1}$, $F_a \rightarrow y_{s1}$ та $F_a \rightarrow y_{r1}$:

$$W_{ah1}(s) = \frac{-998,64s - 5,63}{1200s + 1} \cdot \frac{1 - \frac{\tau}{2}s + \frac{\tau^2}{12}s^2}{1 + \frac{\tau}{2}s + \frac{\tau^2}{12}s^2}; \quad (3.16)$$

$$W_{s1}(s) = \frac{-964,16s - 5,44}{1199s + 1} \cdot \frac{1 - \frac{\tau}{2}s + \frac{\tau^2}{12}s^2}{1 + \frac{\tau}{2}s + \frac{\tau^2}{12}s^2}; \quad (3.17)$$

$$W_{r1}(s) = \frac{-1058s - 5,97}{1200s + 1} \cdot \frac{1 - \frac{\tau}{2}s + \frac{\tau^2}{12}s^2}{1 + \frac{\tau}{2}s + \frac{\tau^2}{12}s^2}. \quad (3.18)$$

Для ОК із запізнюванням наведемо графіки перехідних характеристик за каналами $F_a \rightarrow y_{ah1}$, $F_a \rightarrow y_{s1}$ та $F_a \rightarrow y_{r1}$ (рис. 3.10 – 3.12 відповідно), побудовані за допомогою *Mathcad*. Лістинг наведено в додатку 3.

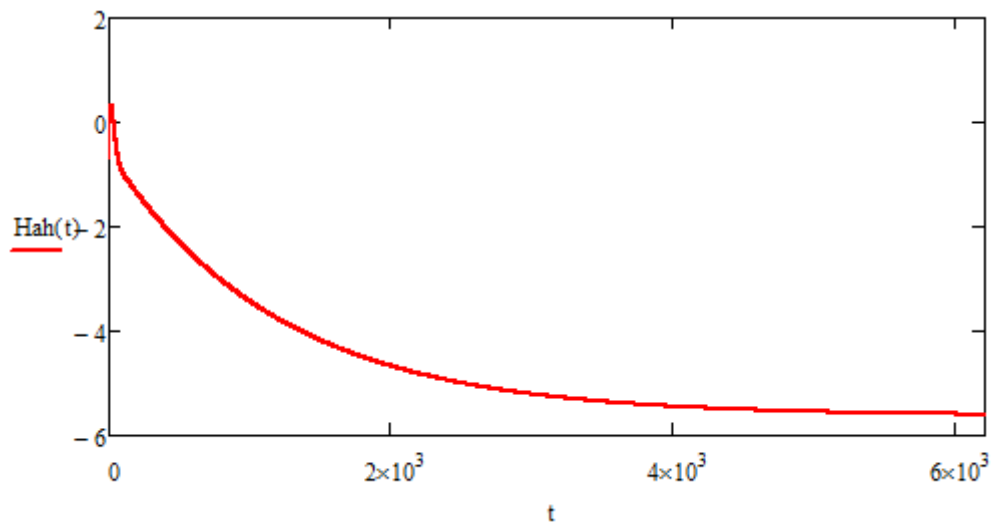


Рисунок 3.10 – Перехідна характеристика об'єкта із запізнюванням за каналом $F_a \rightarrow y_{ah1}$

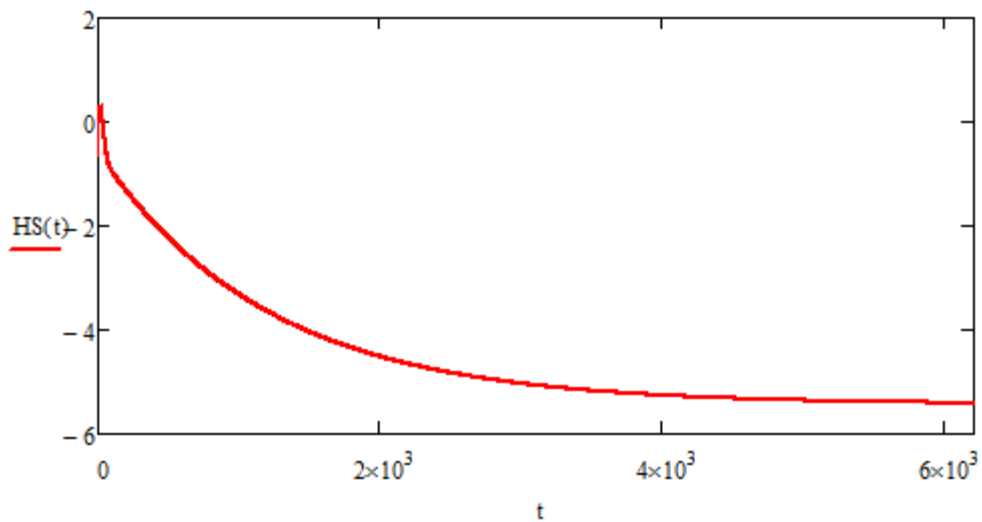


Рисунок 3.11 – Перехідна характеристика об'єкта із запізнюванням за каналом $F_a \rightarrow y_{s1}$

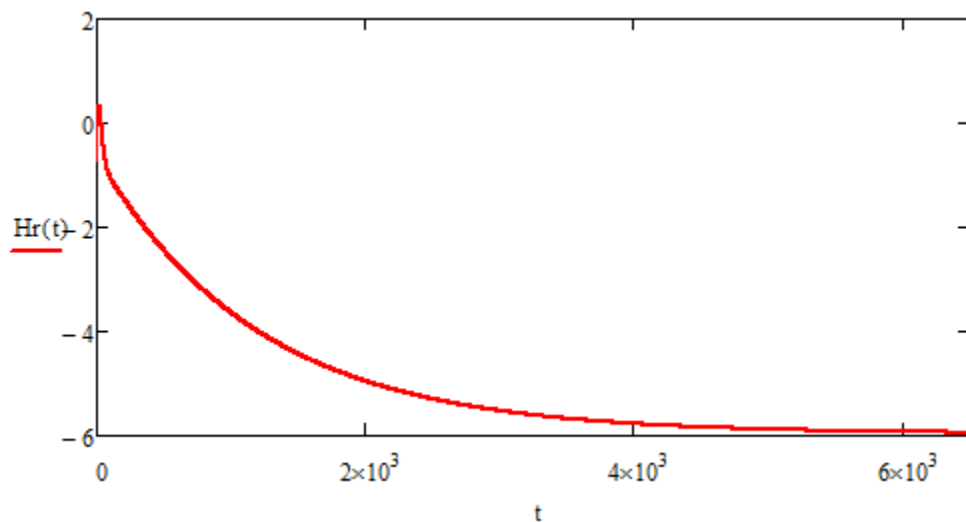


Рисунок 3.12 – Перехідна характеристика об'єкта із запізнюванням за каналом $F_a \rightarrow y_{r1}$

Включення у систему транспортного запізнення дозволяє враховувати його вплив на зазначені канали керування, оскільки, як видно з графіків, наведених на рис. 3.10 – 3.12, його наявність спричинює незначні «стрибки» у перехідних характеристиках.

3.2.3. Імітаційне моделювання процесу адсорбції

На основі розрахункової схеми (рис. 3.2) створено узагальнену структуру імітаційної моделі процесу адсорбції в середовищі *Matlab + Simulink* (рис. 3.13) [32]. Вона враховує вплив вхідних потоків на вихідні за відповідними каналами. У подальших дослідженнях таку модель можна взяти за основу при створенні різних систем керування для їх порівняння.

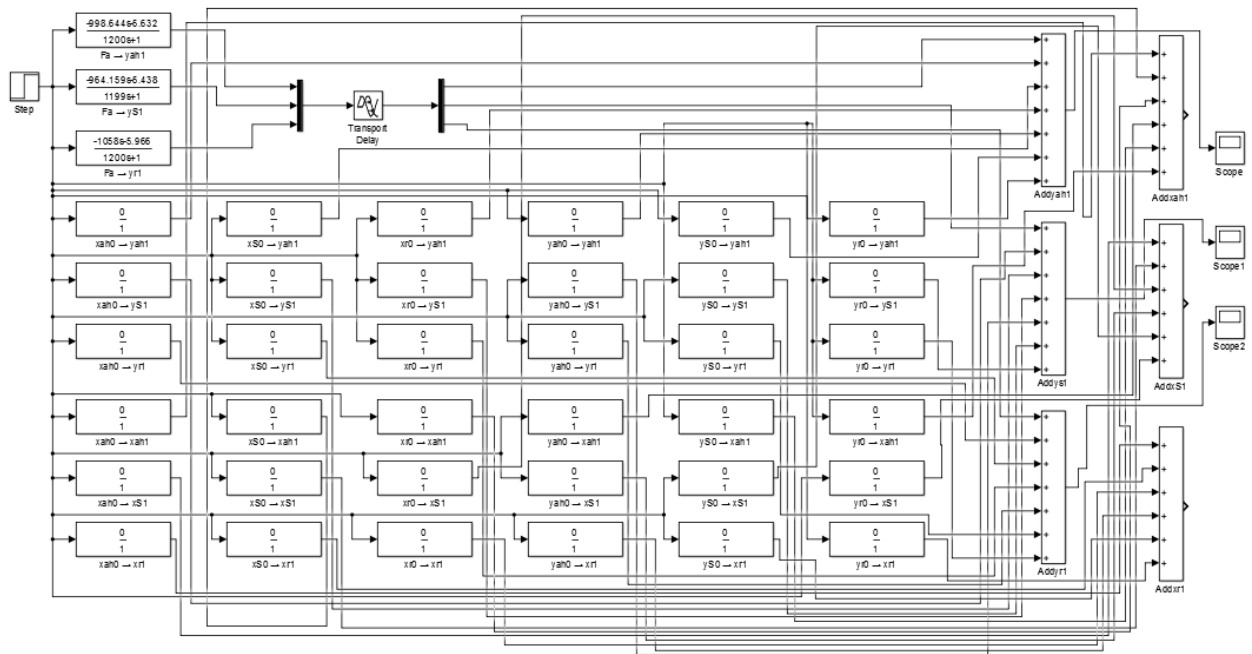


Рисунок 3.13 – Узагальнена структура імітаційної моделі процесу адсорбції

Опис функцій блоків, які використовують при імітаційному моделюванні [32]:

1. *Transfer Fcn* – задання передавальних функцій об'єкта керування у вигляді відношення поліномів;
2. *Transport Delay* – задання транспортного запізнювання;
3. *Step* – задання ступінчастого вхідного сигналу;
4. *Scope* – побудова графіків досліджуваних сигналів у часі, можливість спостереження за змінами сигналів у процесі моделювання.

Наведемо перехідні характеристики об'єкта за каналами керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$, $F_a \rightarrow y_{s1}$, $F_a \rightarrow y_{r1}$ на рис. 3.14 – 3.16 відповідно.

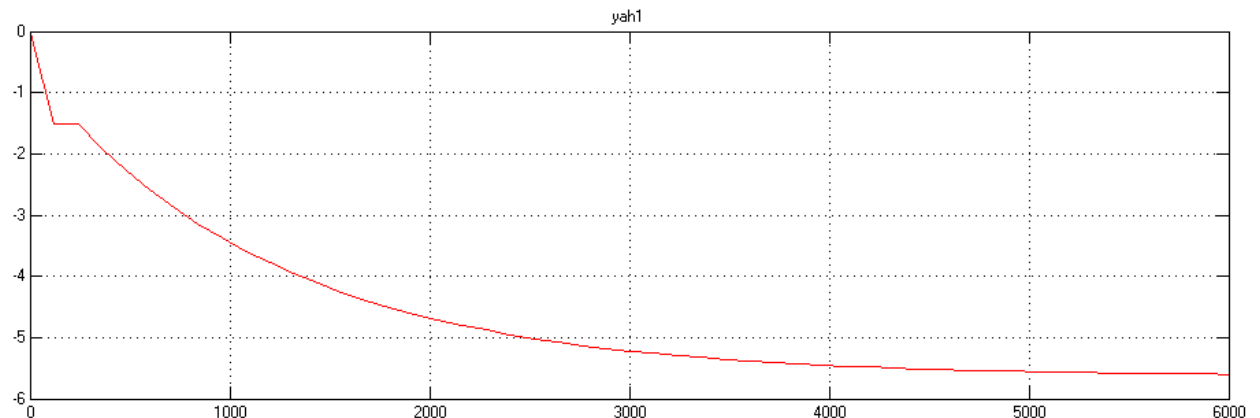


Рисунок 3.14 – Перехідна характеристика об'єкта за каналом керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$

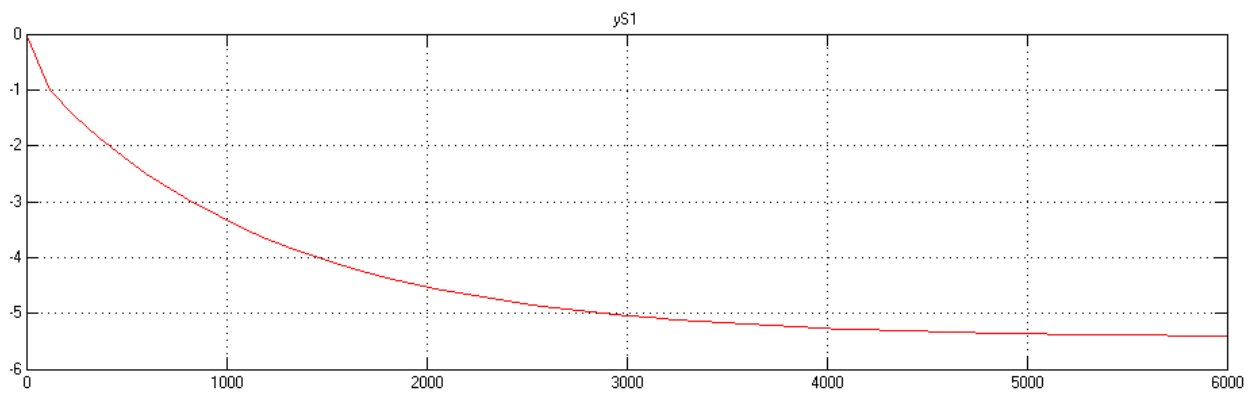


Рисунок 3.15 – Перехідна характеристика об'єкта за каналом керування $F_a \rightarrow y_{S1}$

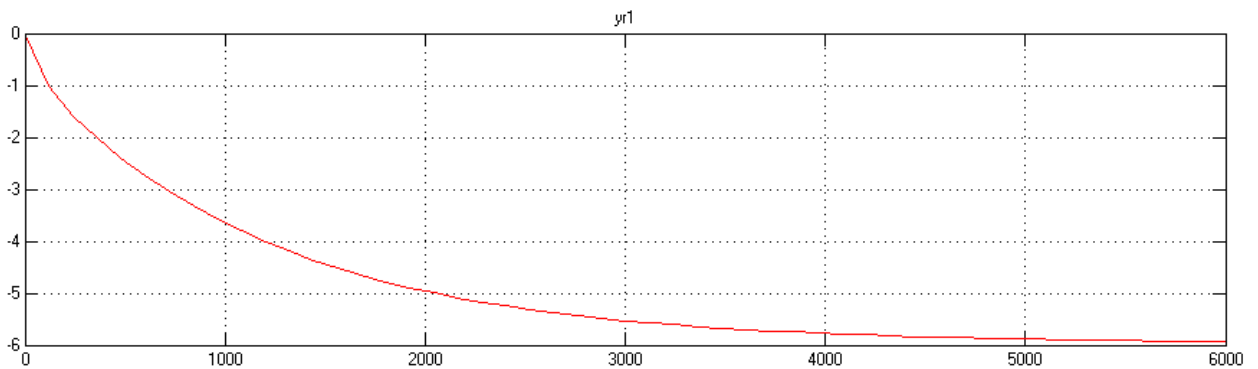


Рисунок 3.16 – Перехідна характеристика об'єкта за каналом керування $F_a \rightarrow y_{I1}$

3.3. Організація експериментальних досліджень для ідентифікації об'єкта керування

Ідентифікацію ОК виконують з метою визначення структури та параметрів математичної моделі. Для цього необхідна наявність вибірок вхідних та вихідних сигналів, які можуть бути отримані в результаті проведення експериментів, що передбачають створення умов для здійснення певного явища [33, 34].

В залежності від властивостей ОК та мети, з якою виникає необхідність проведення експериментів, їх розрізняють за організацією проведення (лабораторні, натурні, польові, виробничі та ін.); способом формування умов (природні та штучні); типом моделей, які досліджують в експерименті (матеріальні й уявні); числом змінних факторів (однофакторні та багатофакторні); контрольованими величинами (пасивні й активні) тощо [33].

Зокрема, виділяють експерименти виробничі, метою яких є дослідження ОК у реальних умовах з урахуванням впливів різних випадкових факторів, що

можуть виникати у виробничому середовищі. Їх розрізняють на пасивні та активні. Перші передбачають збір даних та аналіз випадкових відхилень від заданих параметрів процесу; в других проводять попереднє планування й задання зміни останніх [34].

Таким чином, пасивний експеримент полягає у реєстрації вхідних і вихідних параметрів ОК, без втручання в хід експерименту, після закінчення якого здійснюють оброблення зібраних даних.

При активному експерименті передбачають можливість впливу на об'єкт дослідження, які подають на його вхід і реєструють статичні та динамічні характеристики на виході. При активному експерименті можна оцінити перевірити адекватність моделі, дисперсію помилки, перевірити адекватність моделі тощо [34].

Під час проведення експериментальних досліджень використовують модель «чорної скриньки» (рис. 3.17), для якої припускають, що внутрішня структура і характер зв'язків між вхідними та вихідними величинами невідомі. Вхідні величини U називають факторами (керувальними впливами), вихідні Y відгуками (параметрами, реакцією, функцією мети). Z – контрольовані й неконтрольовані фактори – характеризують збурення, що діють на ОК, які не можна виміряти кількісно (наприклад, неконтрольовані домішки в сировину, старіння деталей і т.п.). Вплив таких факторів призводить до дрейфу характеристик в часі.

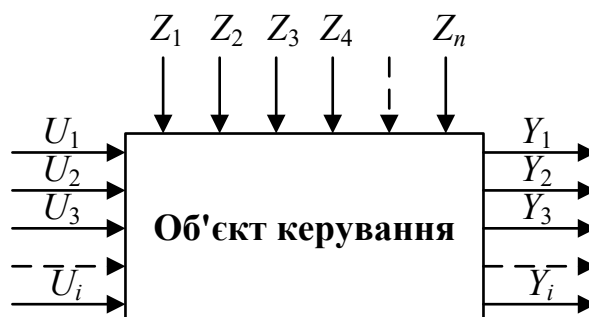


Рисунок 3.17 – Модель «чорна скринька»

Ідентифікацію адсорбера виконано з використанням пакету *System Identification Toolbox*, який входить до складу *Matlab*, з метою перевірки

адекватності теоретичної математичної моделі, отриманої у пункті 3.2, методами активного та пасивного експериментів.

Розглянемо метод ідентифікації ОК, який передбачає проведення активного експерименту. Його використовують, коли є можливість втручання у перебіг процесів, що досліджують.

У додатку 4 наведені експериментальні дані процесу адсорбції, (показання знімали кожні 60 с) при зміні витрати адсорбенту від 2,33 кг/с до 3,33 кг/с.

Для ідентифікації об'єктів використано пакет *System Identification Toolbox* (SIT), що входить до складу *Matlab*, і містить засоби для створення математичних моделей лінійних динамічних об'єктів (систем) за спостережуваними вхідними/вихідними даними [32]. За допомогою команди *ident* здійснюють виклик середовища *SIT*, робоче вікно якого наведено на рис. 3.18.

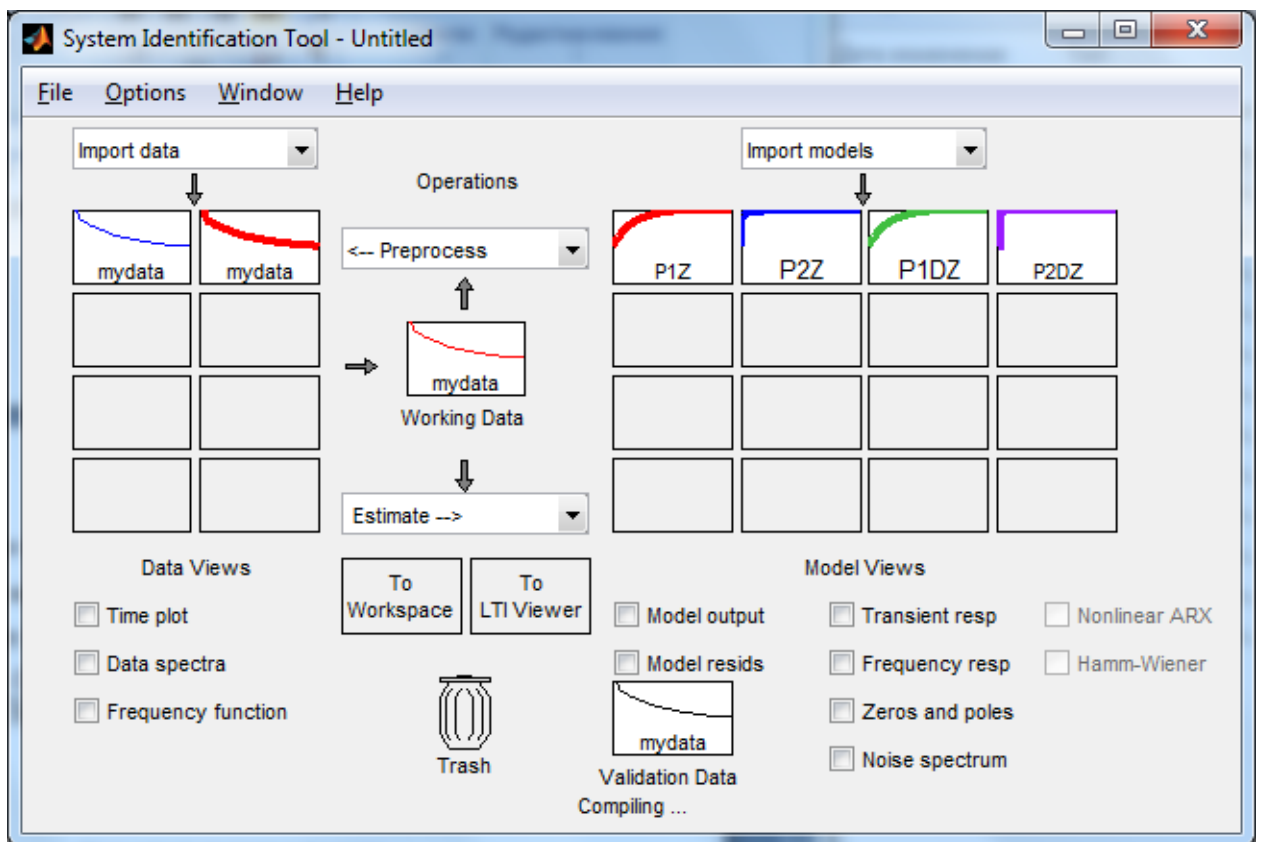


Рисунок 3.18 – Робоче вікно середовища *System Identification Toolbox*

На рис. 3.19 наведено перехідний процес моделі, отриманий експериментально, за каналом керування «витрата адсорбенту \rightarrow вміст ароматичних вуглеводнів на виході з адсорбера» ($F_a \rightarrow y_{ah1}$).

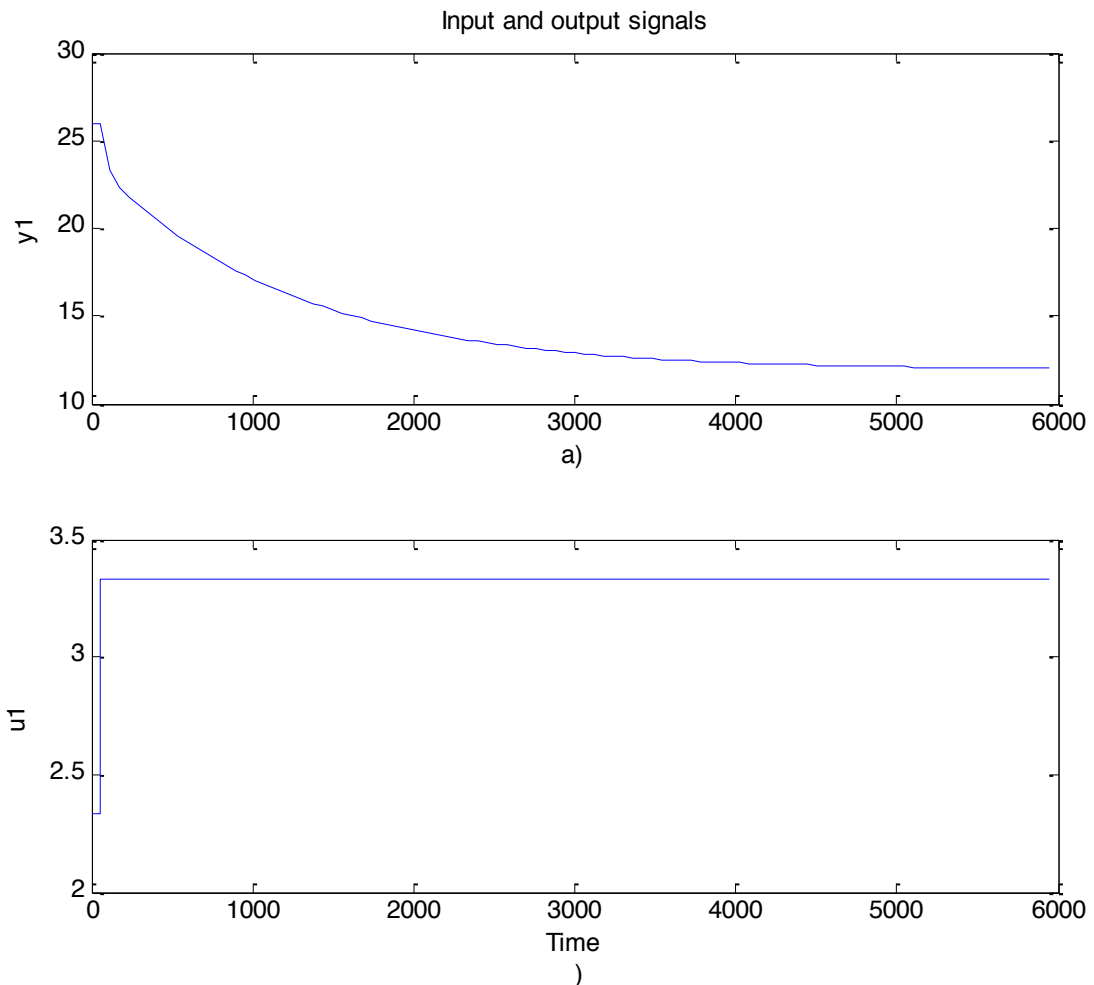


Рисунок 3.19 – Графік моделі ОК, отриманої експериментально, за каналом $F_a \rightarrow y_{ah1}$:
а – зміна вмісту ароматичних вуглеводнів; б – подання ступінчастого сигналу
(керувального впливу)

Для побудови перехідних характеристик ОК за каналом керування необхідно отримати значення вихідних кривих у відхиленнях так, щоб перехідний процес починався з нуля. На рис. 3.20 наведено графік ОК у відхиленнях від робочої точки.

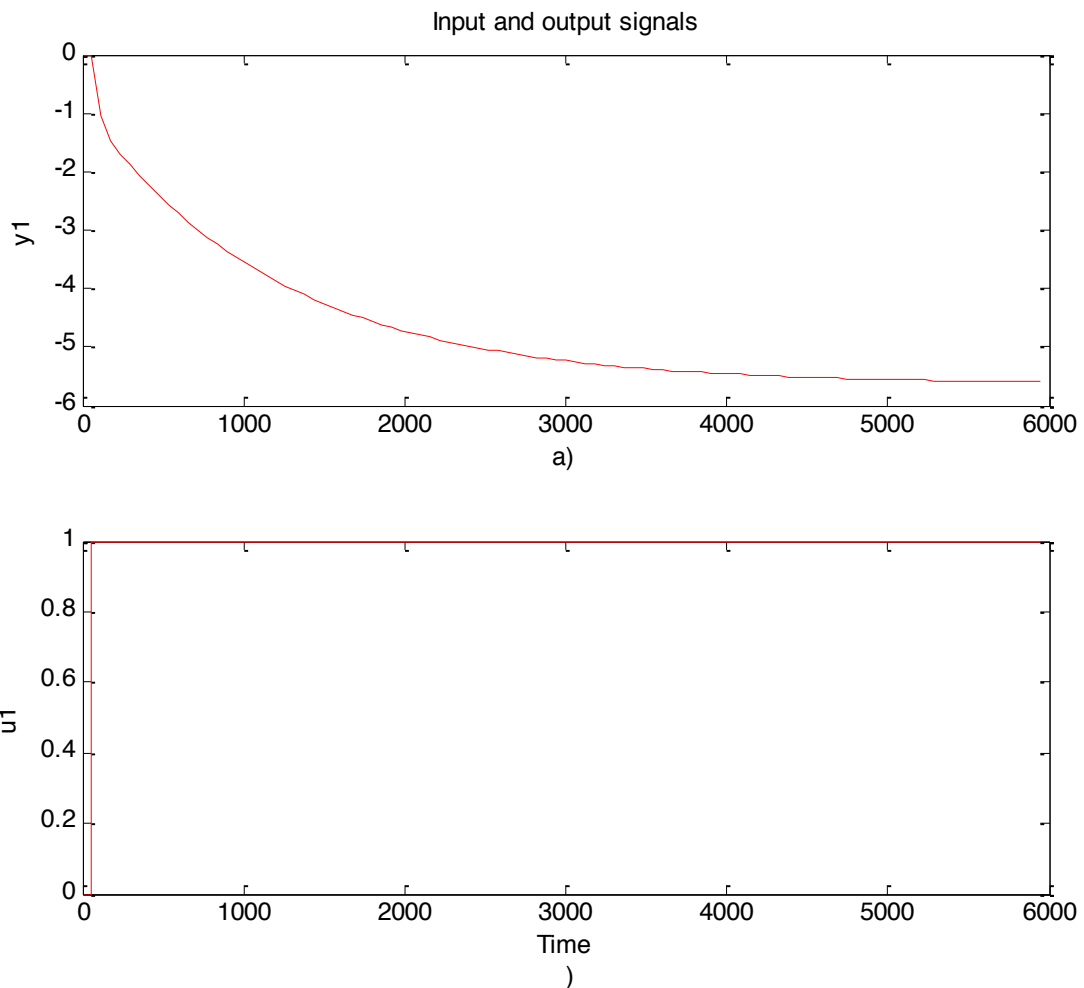


Рисунок 3.20 – Графік моделі ОК у відхиленнях від робочої точки за каналом $F_a \rightarrow y_{ah1}$:
а – зміна вмісту ароматичних вуглеводнів; б – подання ступінчастого сигналу
(керувального впливу)

З експериментальними даними порівнювали результати апроксимації за різними структурами моделі об'єкта: аперіодичну ланку 1-го порядку ($P1Z$), аперіодичну ланку 2-го порядку ($P2Z$), аперіодичну ланку 1-го порядку із запізненням ($P1DZ$), аперіодичну ланку 2-го порядку із запізненням ($P2DZ$).

Критерієм точності отриманої моделі є оцінка її адекватності fit , виражена у відсотках [35]:

$$fit = \frac{norm(y_m - y)}{\sqrt{N}}, \quad (3.19)$$

де $norm()$ – норма (довжина) вектора, y , y_m – відповідно вихід моделей, отриманих експериментально та методом підбору, N – кількість елементів масиву даних.

Критерій точності моделей, отриманий за формулою (3.19): для $P1Z$, $P2Z$, $P1DZ$ та $P2DZ$ він дорівнює 92,88 %, 99,66 %, 92,36 % та 99,9 % відповідно. Результати порівняння наведено на рис. 3.21.

Найбільш точно відтворює експериментальну модель аперіодична ланка 2-го порядку із запізненням. Наведемо її передавальну функцію та, відповідно, перехідну характеристику (рис. 3.22).

$$W_a(s) = \frac{-1515s - 5,631}{7379s^2 + 1206s + 1} e^{-49,4s}. \quad (3.20)$$

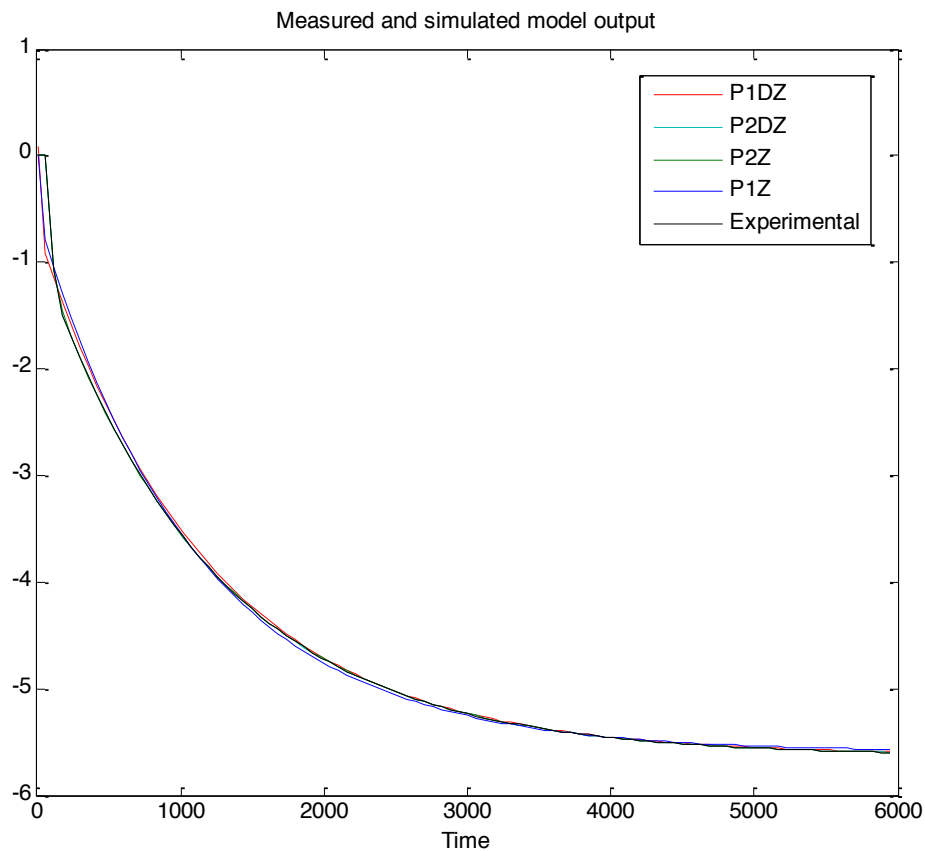


Рисунок 3.21 – Перехідні процеси експериментальної та отриманих методом підбору моделей ОК за каналом керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$

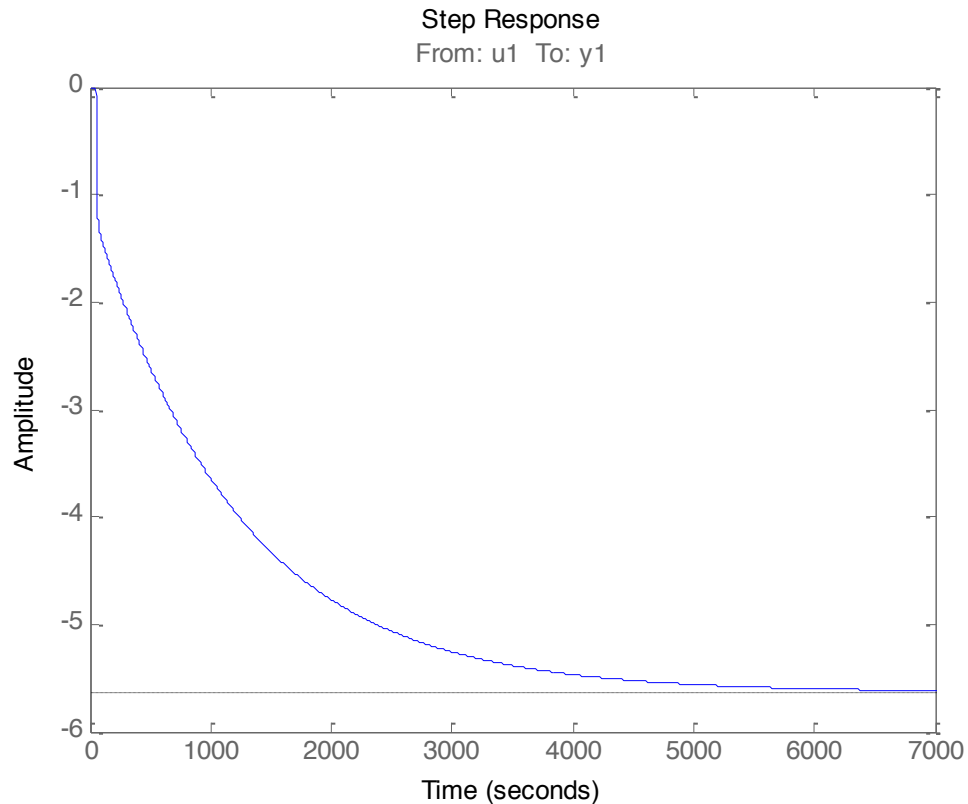


Рисунок 3.22 – Перехідна характеристика об’єкта, яка отримана за найбільш точною моделлю (3.20)

У випадках, коли проведення активного експерименту неможливе через ризики порушення перебігу технологічного процесу або виникнення аварійних ситуацій, виконують пасивну ідентифікацію ОК, яка передбачає наявність замкненого контуру керування та вибірок вхідних і вихідних сигналів.

Виконаємо ідентифікацію ОК, представленого у вигляді передавальної функції (3.20).

Наведемо на рис. 3.23 схему системи керування за вказаним каналом, побудованої в середовищі *Matlab + Simulink* [36]:

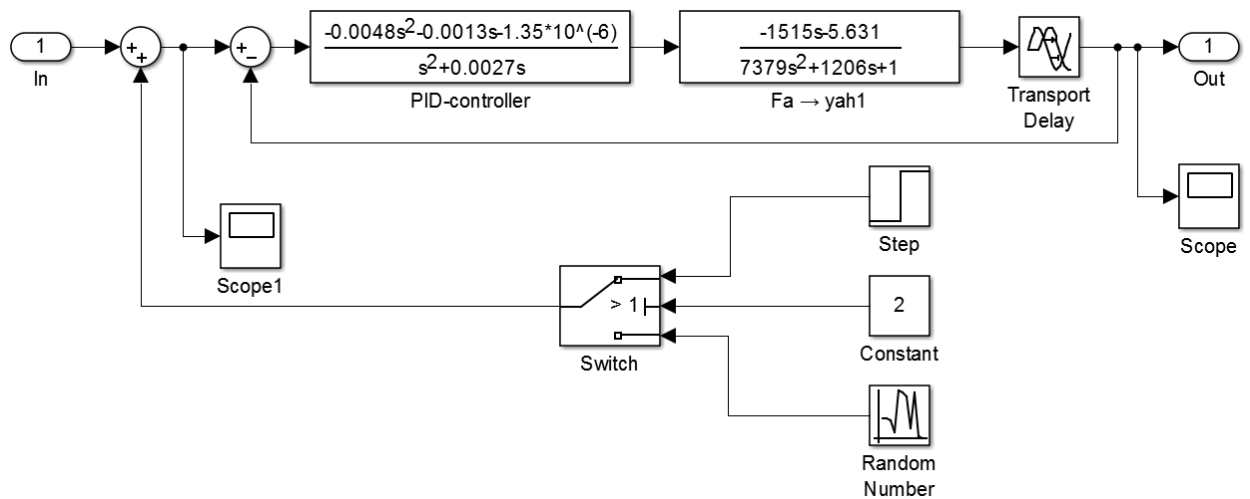


Рисунок 3.23 – Схема системи керування

Опис функцій блоків, які використовують при моделюванні системи керування [32]:

1. *Transfer Fcn* – задання передавальних функцій об'єкта керування та ПІД-контролера у вигляді відношення поліномів;
2. *Transport Delay* – задання транспортного запізнювання;
3. *Sum* – сумматор – використовують для підсумовування скалярних, векторних або матричних сигналів; типи сигналів повинні бути однаковими; якщо кількість входів блоку більше, ніж один, то останній виконує поелементні операції над векторними і матричними сигналами (кількість елементів у матриці або векторі має бути однаковою);
4. *In/Out* – формує вектори вхідних та вихідних сигналів відповідно;
5. *Switch* – використовують для зміни характеру вхідного сигналу; якщо на другий вхід блоку подають сигнал, який більше одиниці, то вхідний сигнал системи буде ступінчастим (проходить через перший вхід блоку); в іншому випадку (менше одиниці) – випадковим (проходить через третій вхід блоку);
6. *Step* – задання ступінчастого вхідного сигналу;
7. *Random Number* – задання випадкового вхідного сигналу;
8. *Constant* – константа: 1 – подання випадкового вхідного сигналу; 2 – подання ступінчастого вхідного сигналу;
9. *Scope* – побудова графіків досліджуваних сигналів у часі, можливість спостереження за змінами сигналів у процесі моделювання.

Такий метод ідентифікації вимагає попереднього налаштування регулятора, яке виконували шляхом ручного підбору коефіцієнтів у властивостях ПІД-регулятора (блок *PID Controller*).

У середовищі *Simulink + Matlab* формула ПІД-регулятора представлена в такому вигляді:

$$W_r(s) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}},$$

де P , I , D – відповідно пропорційна, інтегральна та диференціальна складові регулятора, N – коефіцієнт фільтрації, s – оператор Лапласа.

Коефіцієнти ПІД-регулятора для системи з передавальною функцією (3.20): $P = -0,311$, $I = -0,0005$, $D = 116,9527$, $N = 0,0027$.

Отже, передавальна функція ПІД-регулятора:

$$W_r(s) = \frac{-0,0048s^2 - 0,0013s - 1,35 \cdot 10^{-6}}{s^2 + 0,0027s}.$$

Перехідна характеристика системи за каналом керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$ зображена на рис. 3.24.

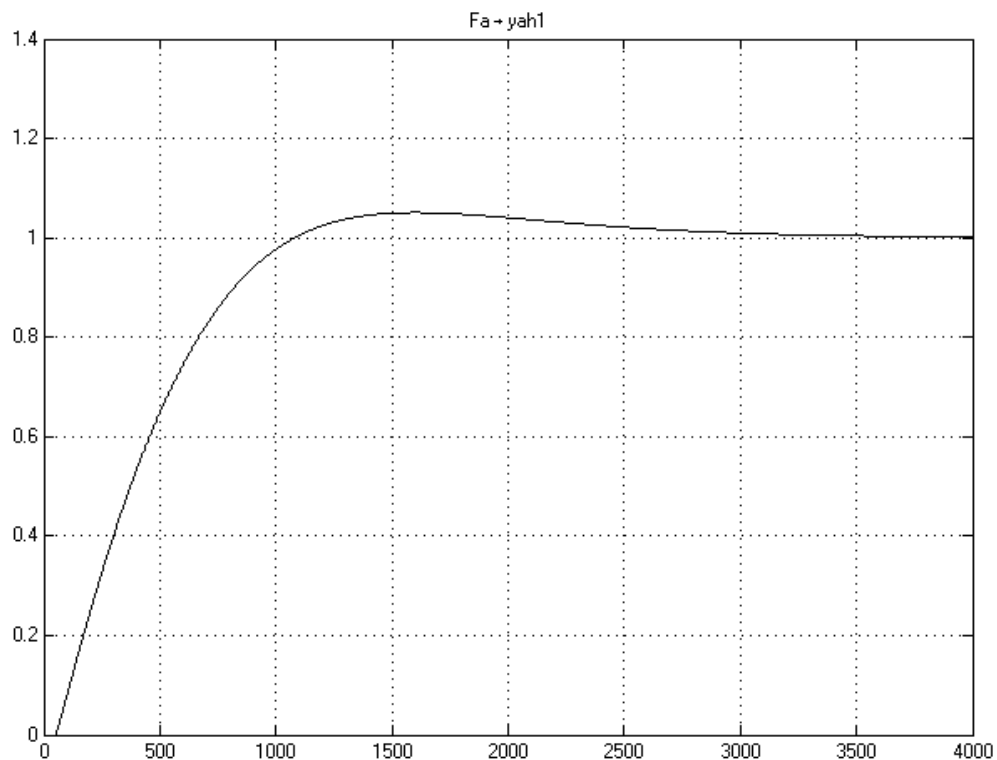


Рисунок 3.24 – Перехідна характеристика системи за каналом керування ($F_a \rightarrow y_{ah1}$)

Подамо на вхід системи випадковий вхідний сигнал. Графіки випадкових вхідних та вихідних сигналів наведені на рис. 3.25 та 3.26 відповідно.

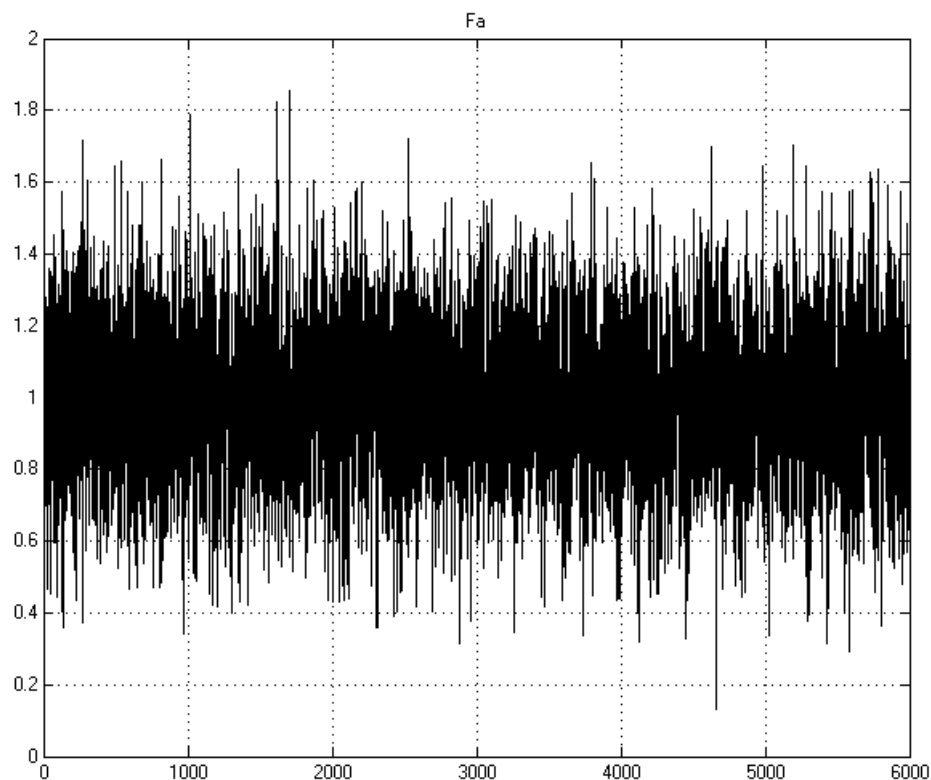


Рисунок 3.25 – Графік випадкового вхідного сигналу (витрата адсорбенту)

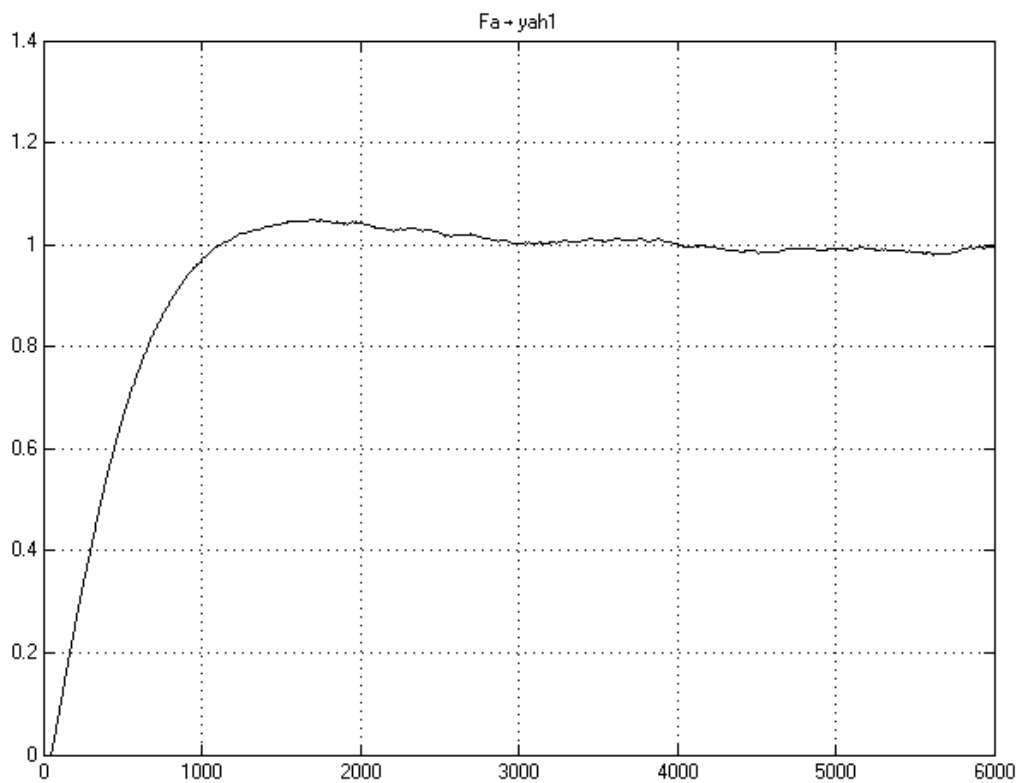


Рисунок 3.26 – Графік випадкового вихідного сигналу (вміст ароматичних вуглеводнів)

Після виключення з отриманих даних вектора часу, перейдемо безпосередньо до ідентифікування ОК з використанням пакету *System Identification Toolbox*.

Наведемо графіки моделей замкненої системи ОК, отримані в результаті його ідентифікації у вигляді аперіодичної ланки 1-го порядку (*tf1p*), аперіодичної ланки 2-го порядку (*tf2p*), аперіодичної ланки 1-го порядку із запізненням (*tf3p*), аперіодичної ланки 2-го порядку із запізненням (*tf4p*), аперіодичної ланки 5-го порядку із запізненням (*tf5p*). Точність моделі оцінювали за формулою (3.19); для моделей *tf1p*, *tf2p*, *tf3p*, *tf4p* та *tf5p* він дорівнює відповідно 84,38 %, 96,86 %, 85, 43 %, 98,29 % і 99,67 %. Результати порівняння наведено на рис. 3.27.

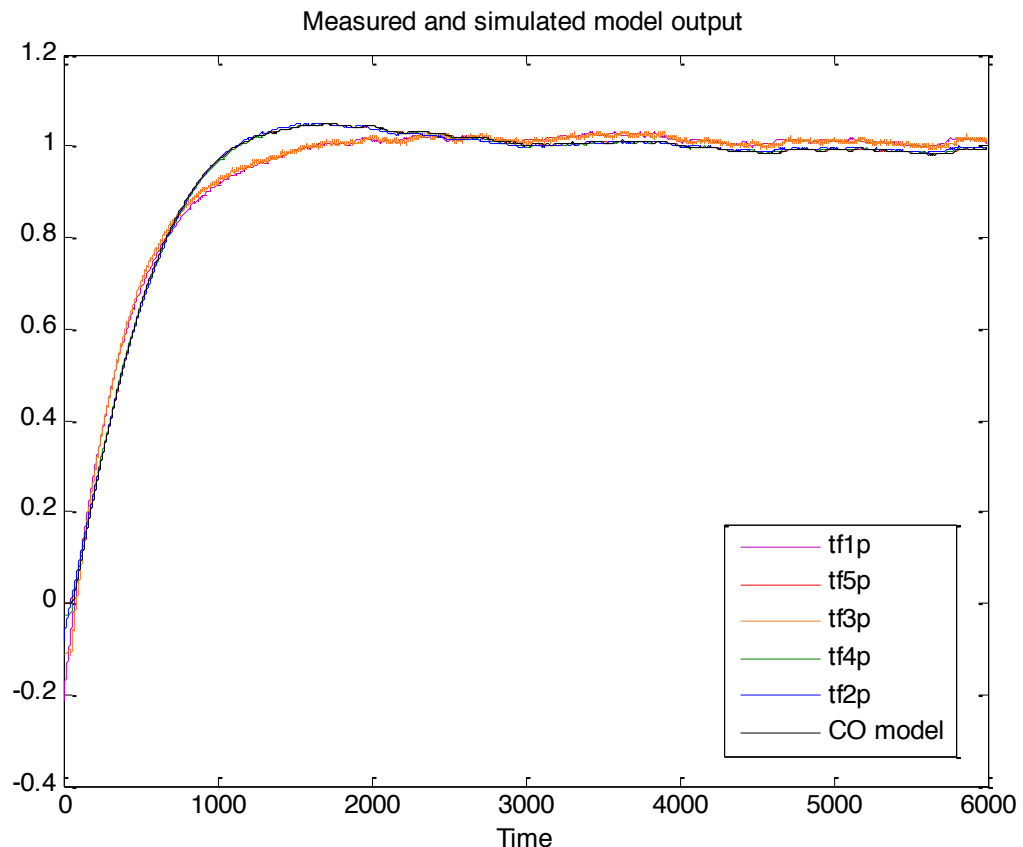


Рисунок 3.27 – Графік моделей замкненої системи за каналом керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$ та тих, які обрано методом підбору

Найбільш точно відтворює модель вихідної замкненої системи (побудованої за схемою, наведеною на рис. 3.23) аперіодична ланка 5-го порядку із запізненням; наведемо її передавальну функцію:

$$W_p(s) = \frac{0,0006s^3 + 0,0001s^2 + 4,941 \cdot 10^{-7}s + 3,886 \cdot 10^{-10}}{s^5 + 1,306s^4 + 0,066s^3 + 0,0003s^2 + 6,173 \cdot 10^{-7}s + 3,887 \cdot 10^{-10}} e^{-49,4s}.$$

Передавальна функція замкненої системи:

$$W(s) = \frac{W_o(s)W_r(s)}{1 + W_o(s)W_r(s)},$$

де $W_o(s)$, $W_r(s)$ – передавальні функції ОК та ПІД-регулятора відповідно.

Звідси, передавальна функція ОК:

$$W_o(s) = \frac{W(s)}{W_r(s) - W(s)W_r(s)}.$$

На рис. 3.28 наведемо перехідну характеристику ОК за каналом керування.

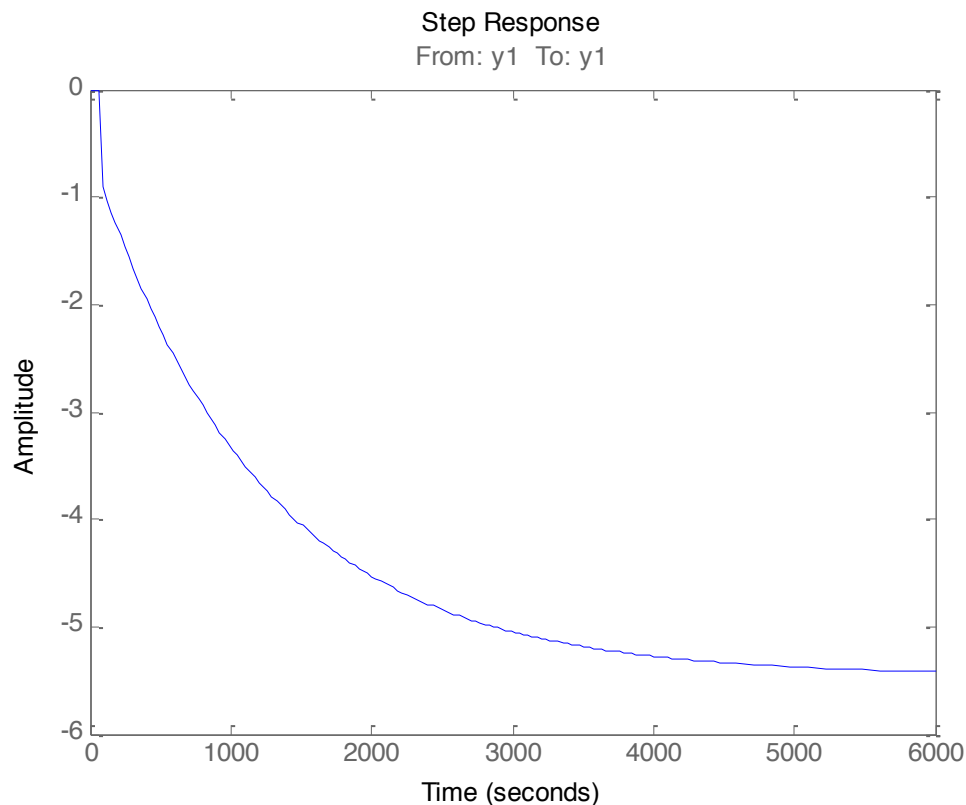


Рисунок 3.28 – Перехідна характеристика ОК за каналом керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$

На рис. 3.29 наведемо графіки для порівняння таких моделей: теоретичної математичної моделі W_{ah1} , передавальна функція якої (3.16), моделі W_a , отриманої в результаті проведення активної ідентифікації з передавальною функцією (3.20), і моделі W_{ap} , отриманої в результаті пасивної ідентифікації за допомогою передавальної функції ОК (3.20).

В результаті ідентифікації ОК різними методами й, як видно з рис. 3.35, найбільш точно відтворює експериментальну модель та, яку отримано шляхом проведення активного експерименту. Спотворення моделі, отриманої в результаті проведення пасивного експерименту, виникають, зокрема, через введення передавальної функції регулятора в систему та наявності в ній транспортного запізнювання.

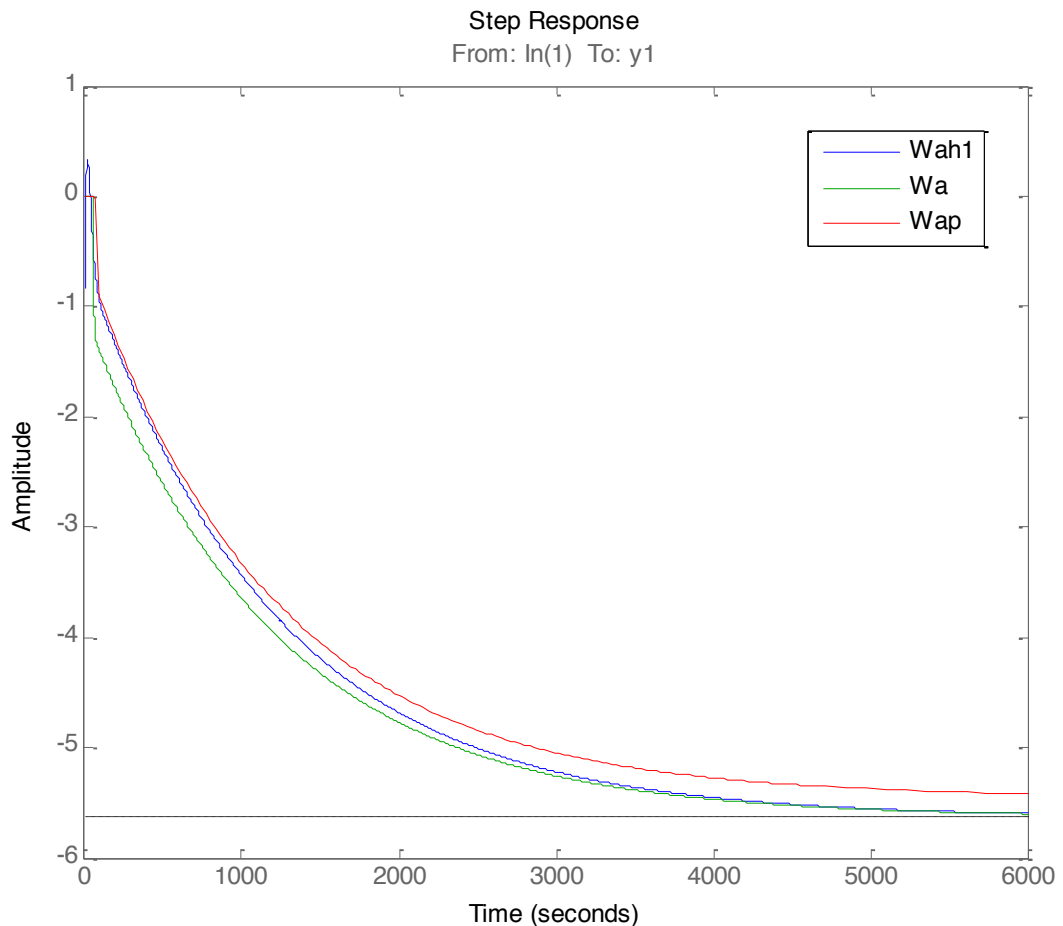


Рисунок 3.35 – Порівняння отриманих моделей

Висновки до розділу 3

У даному розділі проведено дослідження процесу адсорбції як об'єкта моделювання й розглянуто існуючі математичні моделі адсорбера та способи їх розрахунку.

На основі проведеного аналізу були визначені канали керування («витрата адсорбенту \rightarrow вміст ароматичних вуглеводнів на виході з адсорбера» ($F_a \rightarrow y_{ah1}$), «витрата адсорбенту \rightarrow вміст сірки на виході з адсорбера» ($F_a \rightarrow y_{s1}$) «витрата адсорбенту \rightarrow вміст смол на виході з адсорбера» ($F_a \rightarrow y_{r1}$)) та збурення («вміст ароматичних вуглеводнів на вході в адсорбер \rightarrow вміст ароматичних вуглеводнів на виході з адсорбера» ($y_{ah0} \rightarrow y_{ah1}$), «вміст сірки на вході в адсорбер \rightarrow вміст сірки на виході з адсорбера» ($y_{s0} \rightarrow y_{s1}$) «вміст смол на вході в адсорбер \rightarrow вміст смол на виході з адсорбера» ($y_{r0} \rightarrow y_{r1}$)) для адсорбера, отримана математична модель об'єкта керування з урахуванням припущень для її спрощення. На основі моделі статичного режиму адсорбера були побудовані статичні характеристики за каналами керування, за якими визначені залежності між керувальними та контрольованими параметрами. За допомогою моделі динамічного режиму об'єкта керування в результаті низки перетворень (а саме лінеаризації системи диференціальних рівнянь, перетворення за Лапласом змінної часу і розв'язання отриманої лінеаризованої системи методом підстановок) були отримані передавальні функції за каналами керування та збурення й побудовані перехідні характеристики за вказаними каналами керування. Для ОК отримані передавальні функції із врахуванням запізнювання й побудовані відповідні перехідні характеристики.

Для процесу адсорбції було виконано ідентифікацію методами активного та пасивного експериментів з порівнянням отриманих результатів.

4. СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ОЧИЩЕННЯ ОЛИВ ТА МАСТИЛ З УРАХУВАННЯМ ПОЛОЖЕНЬ КОНЦЕПЦІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТА ПОТОЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

4.1. Структура АСКТП адсорбційного очищення олив та мастил

Розглянемо трирівневу структуру АСКТП, яка забезпечує неперервний моніторинг та керування технологічними процесами очищення олив та мастил з урахуванням положень концепції сталого розвитку, структура якої наведена на рис. 4.1 [37].

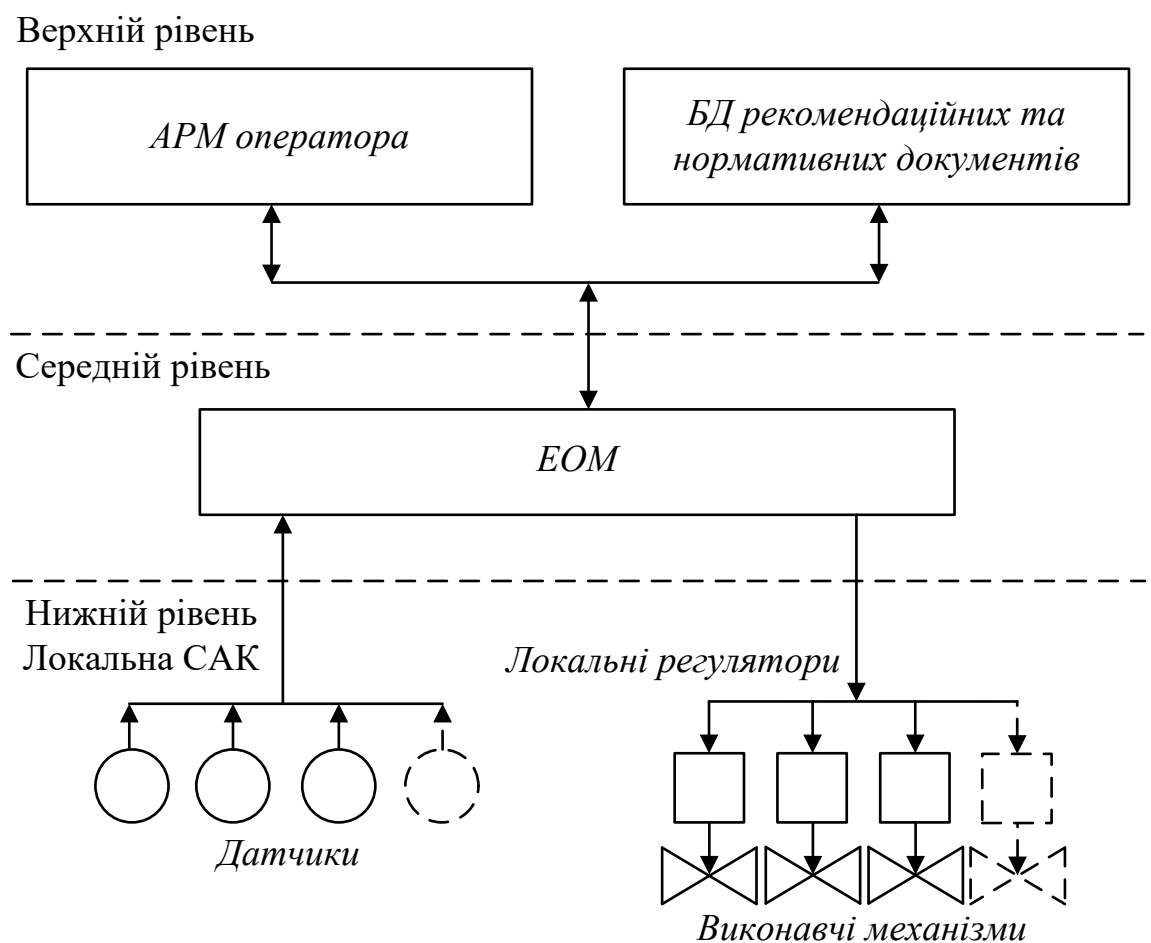


Рисунок 4.1 – Структура АСКТП

Нижній рівень – локальна САК – керувальні пристрої, до яких відносять вимірювальні прилади (датчики), локальні регулятори та регулювальні органи у складі виконавчих механізмів.

Середній рівень – ЕОМ – рівень, на якому формують керувальні сигнали виконавчих пристроїв та/або сигнали і команди на зміну закону керування автоматичних регуляторів САК.

Верхній рівень забезпечує зв'язок з нижніми рівнями, на ньому здійснюють візуалізацію та моніторинг ходу технологічного процесу. При цьому локальний контроль виконують за допомогою інтерфейсу «людина-машина» (*HMI – Human Machine Interface*). Також на цьому рівні передбачають використання БД нормативних документів сталого розвитку, до складу якої будуть входити нормативно-правові документи щодо якості вихідного продукту, вмісту шкідливих речовин у повітрі робочої зони тощо.

Наведена схема працює таким чином. На середньому рівні виконують збір та оброблення інформації про стан технологічних об'єктів, отриману з датчиків, встановлених безпосередньо на трубопроводах та/або технологічних апаратах, після чого її передають на верхній рівень системи. На цьому ж рівні на ЕОМ надходить інформація з БД рекомендаційних та нормативних документів, і, на основі моделей, побудованих у 3-ому розділі та сформованих у 2-ому розділі задач оптимального керування, розраховують оптимальні керувальні впливи з урахуванням економічної та екологічної складових СР, які подають на відповідні локальні регулятори для корекції параметрів їх налаштування, сигнали з яких надходять на виконавчі механізми, після чого починається пошук нового оптимуму керувальних впливів у залежності від значень, отриманих в результаті поточної ідентифікації. На верхньому рівні знаходиться автоматизоване робоче місце оператора, яке дозволяє проводити моніторинг технологічних процесів у режимі реального часу та здійснювати контроль на нижньому рівні.

4.2. Локальні САК як елементи системи автоматизації технологічного процесу очищення олив та мастил

Розглянемо нижній рівень АСКТП.

Оскільки у технологічному процесі адсорбційного очищення олив та мастил в атмосферу виділяються шкідливі речовини, до яких входять легкозаймисті, отруйні та ті, що володіють канцерогенними властивостями, у виробничому приміщенні необхідно встановити аналізатори для неперервного контролю концентрації зазначених у таблиці 2.1 речовин в атмосферному повітрі.

На підставі здійсненого аналізу особливостей технологічного процесу очищення олив та мастил адсорбентами з позиції документів сталого розвитку розроблена схема автоматизації зазначеного процесу – дивись схему № *ЛА71мн.04.МД.00.001 СхА*. Наведемо її опис.

Інформація про витрату сировини на вході в діафрагмовий змішувач 1 надходить на первинний пристрій (позиція 1А), з якого – на пристрій дистанційної передачі (позиція 1Б) і далі з нього на вторинний пристрій інтегровальний (лічильник), реєструвальний та керувальний (позиція 1В) та блок ручного керування витратою (позиція 1Г); регулювання витрати відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 1Д), що встановлений на трубопроводі 32.

Інформація про витрату розчинника на вході в діафрагмовий змішувач 1 надходить на первинний пристрій (позиція 2А), з якого – на пристрій дистанційної передачі (позиція 2Б) і далі з нього на вторинний пристрій регулювання співвідношення витрат сировини й розчинника (позиція 2В) та блок ручного керування витратою (позиція 2Г); регулювання витрати відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 2Д), що встановлений на трубопроводі 31.

Інформація про витрату воді на вході холодильник 2 надходить на первинний пристрій (позиція 3А), з якого – на пристрій дистанційної передачі (позиція 3Б) і далі з нього на вторинний пристрій інтегровальний (лічильник), реєструвальний та керувальний (позиція 3В) та блок ручного керування витратою (позиція 3Г); регулювання витрати відбувається впливом

регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 3Д), що встановлений на трубопроводі 1.

Інформація про температуру охолодженого розчину в адсорбері 3 надходить на первинний пристрій (позиція 4А), з якого – на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 4Б) та блок ручного керування температурою (позиція 4В); регулювання температури відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 4Г), що встановлений на трубопроводі 1.

Інформація про в'язкість охолодженого розчину в трубопроводі 35 надходить на первинний пристрій (позиція 5А), з якого – на вторинний пристрій показувальний і реєструвальний (позиція 5Б).

Інформація про якість (цетанове число, фракційний склад, в'язкість, вміст сірки, ароматичних вуглеводнів та смол) розчину рафінату І в трубопроводі 35 надходить на первинні пристрої (позиції 6А, 6Б, 6В, 6Г, 6Д, 6Е відповідно), з яких – на вторинний пристрій (аналізатор) показувальний і реєструвальний (позиція 6Ж).

Інформація про рівень розчину рафінату І у резервуарі 4 надходить на первинний пристрій (позиція 7А), з якого – на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 7Б) та блок ручного керування рівнем (позиція 7В); регулювання рівня відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 7Г), що встановлений на трубопроводі 29.

Інформація про витрату адсорбенту на вході в адсорбер 3 надходить на первинний пристрій (позиція 8А), з якого – на пристрій дистанційної передачі (позиція 8Б) і далі з нього на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 8В) та блок ручного керування витратою (позиція 8Г); регулювання витрати відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 8Д), що встановлений на трубопроводі 37.

Інформація про витрату розчинника на гідрозатвор на вході в адсорбер 3 надходить на первинний пристрій (позиція 9А), з якого – на пристрій дистанційної передачі (позиція 9Б) і далі з нього на вторинний пристрій інтегровальний (лічильник-дозатор), реєструвальний та керувальний (позиція 9В) та блок ручного керування витратою (позиція 9Г); регулювання витрати відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 9Д), що встановлений на трубопроводі 33.

Інформація про якість (вміст ароматичних вуглеводнів, сірки та смол, в'язкість) розчину рафінату ІІ в трубопроводі 30 надходить на первинні пристрої (позиції 10А, 10Б, 10В, 10Г відповідно), з яких – на вторинний пристрій (аналізатор) показувальний і реєструвальний (позиція 10Д).

Інформація про рівень розчину рафінату ІІ у резервуарі 6 надходить на первинний пристрій (позиція 11А), з якого – на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 11Б) та блок ручного керування рівнем (позиція 11В); регулювання рівня відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 11Г), що встановлений на трубопроводі 30.

Інформація про витрату розчинника на вході в десорбер 5 надходить на первинний пристрій (позиція 12А), з якого – на пристрій дистанційної передачі (позиція 12Б) і далі з нього на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 12В) та блок ручного керування витратою (позиція 12Г); регулювання витрати відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 12Д), що встановлений на трубопроводі 31.

Інформація про температуру адсорбенту з домішками (смоли й розчинник) в десорбері 5 надходить на первинний пристрій (позиція 13А), з якого – на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 13Б) та блок ручного керування температурою (позиція 13В); регулювання температури відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 13Г), що встановлений на трубопроводі 2.

Інформація про вміст ароматичних вуглеводнів у адсорбенті з домішками (смоли й розчинник) на виході з десорбера 5 надходить на первинний пристрій (позиція 14А), з якого – на вторинний пристрій (аналізатор) показувальний і реєструвальний (позиція 14Б).

Інформація про вміст ароматичних вуглеводнів, які можуть випаровуватися в трубопроводі 2 на виході з сушарки 7, надходить на первинний пристрій (позиція 15А), з якого – на вторинний пристрій (аналізатор) показувальний і реєструвальний (позиція 15Б).

Інформація про тиск всередині сушарки 7 надходить на первинний пристрій (позиція 16А) з якого – на вторинний пристрій показувальний і реєструвальний з вмонтованою сигналізацією (позиція 16Б).

Інформація про тиск пари в трубопроводі 2 надходить на первинний пристрій (позиція 17А) з якого – на вторинний пристрій показувальний і реєструвальний з вмонтованою сигналізацією (позиція 17Б).

Інформація про температуру всередині сушарки 7 надходить на первинний пристрій (позиція 18А), з якого – на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 18Б) та блок ручного керування температурою (позиція 18В); регулювання температури відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 18Г), що встановлений на трубопроводі 2.

Інформація про вологовміст адсорбенту на виході з сушарки 7 надходить на первинний пристрій (позиція 19А), з якого – на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 19Б) та блок ручного керування вологовмістом (позиція 19В); регулювання вологовмісту відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 19Г), що встановлений на трубопроводі 2.

Інформація про витрату повітря, що подають в бункер 8, надходить на первинний пристрій (позиція 20А), з якого – на пристрій дистанційної передачі (позиція 20Б) і далі з нього на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 20В) та блок ручного керування

витратою (позиція 20Г); регулювання витрати відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 20Д), що встановлений на трубопроводі 3.

Інформація про витрату повітря, що подають в бункер 11, надходить на первинний пристрій (позиція 21А), з якого – на пристрій дистанційної передачі (позиція 21Б) і далі з нього на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 21В) та блок ручного керування витратою (позиція 21Г); регулювання витрати відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 21Д), що встановлений на трубопроводі 3.

Інформація про витрату води, що подають в регенератор 9, надходить на первинний пристрій (позиція 22А), з якого – на пристрій дистанційної передачі (позиція 22Б) і далі з нього на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 22В) та блок ручного керування витратою (позиція 22Г); регулювання витрати відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 22Д), що встановлений на трубопроводі 1.

Інформація про температуру всередині регенератора 9 надходить на первинний пристрій (позиція 23А), з якого – на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 23Б) та блок ручного керування температурою (позиція 23В); регулювання температури відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 23Г), що встановлений на трубопроводі 3.

Інформація про вміст фактичних смол в адсорбенті на виході з регенератора 9 надходить на первинний пристрій (позиція 24А), з якого – на вторинний пристрій (аналізатор) показувальний і реєструвальний (позиція 24Б).

Інформація про витрату води на вході в чотириступеневий холодильник 10 надходить на первинний пристрій (позиція 25А), з якого – на пристрій дистанційної передачі (позиція 25Б) і далі з нього на вторинний пристрій

інтегрувальний (лічильник), реєструвальний та керувальний (позиція 25В) та блок ручного керування витратою (позиція 25Г); регулювання витрати відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 25Д), що встановлений на трубопроводі 1.

Інформація про температуру всередині чотириступеневого холодильника 10 надходить на первинний пристрій (позиція 26А), з якого – на вторинний прилад показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 26Б) та блок ручного керування температурою (позиція 26В); регулювання температури відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 26Г), що встановлений на трубопроводі 1.

Інформація про витрату повітря, що подають в чотириступеневий холодильник 10, надходить на первинний пристрій (позиція 27А), з якого – на пристрій дистанційної передачі (позиція 27Б) і далі з нього на вторинний пристрій показувальний, реєструвальний та керувальний (позиція 27В) та блок ручного керування витратою (позиція 27Г); регулювання витрати відбувається впливом регулювального органа на виконавчий механізм (позиція 27Д), що встановлений на трубопроводі 3.

4.2.1. Система керування адсорбером з типовими законами керування

Оскільки ступінь очищення оливи або мастила характеризується декількома показниками якості, авторами запропоновано систему керування, яка забезпечить врахування їх найбільш можливої кількості.

Такий спосіб [22] включає очищення оливи або мастила від ароматичних вуглеводнів в адсорбері, вимірювання концентрації ароматичних вуглеводнів на виході з адсорбера та регулювання витрати адсорбенту, з вимірюванням концентрації сірки в оливі або мастилі на виході з адсорбера та коригуванням витрати адсорбенту. Також цей спосіб передбачає вимірювання в'язкості оливи або мастила на виході з адсорбера та коригуванням температури в адсорбері.

Спосіб керування, схему автоматизації якого наведено на рис. 4.2, виконують таким чином. Вимірюють концентрацію ароматичних вуглеводнів в оливі або мастилі на виході з адсорбера 1 пристроєм 2 і виконують керування нею за допомогою керувального пристрою 3 впливом на виконавчий механізм з регулювальним органом 4, який встановлений на лінії подачі адсорбенту. Вимірюють концентрацію сірки в оливі або мастилі на виході з адсорбера 1 пристроєм 5, сигнал з якого подають як коригувальний на пристрій 3. Сигнал з пристрою 10 подають як коригувальний на пристрій 3.

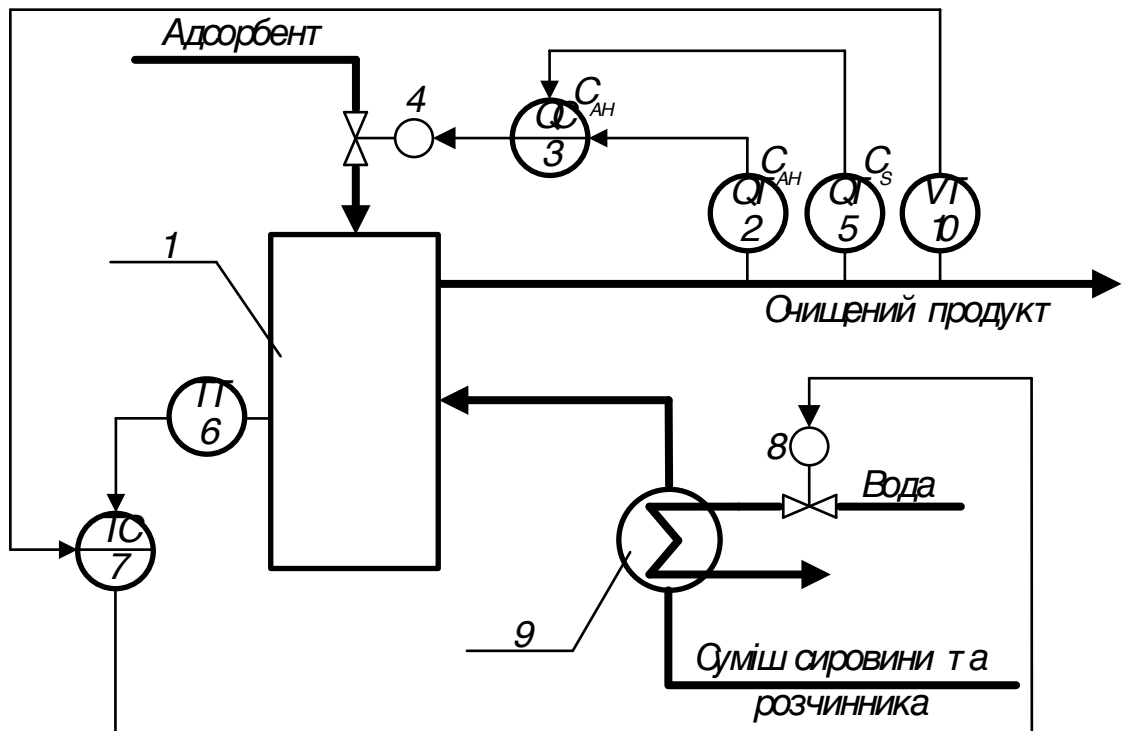


Рисунок 4.2 – Фрагмент схеми автоматизації керування процесом адсорбції:
 C_{AH} , C_S – відповідно вміст ароматичних вуглеводнів та сірки

Вимірюють температуру в адсорбері 1 пристроєм 6 і виконують керування нею за допомогою керувального пристрою 7 впливом на виконавчий механізм з регулювальним органом 8, який встановлений на лінії подачі охолоджувального агента (води) в холодильник 9. Вимірюють в'язкість оливи або мастила на виході з адсорбера 1 пристроєм 10, сигнал з якого подають як коригувальний на пристрій 7.

З огляду на те, що не завжди можливе з'ясування точних значень вмісту небажаних компонентів (важких ароматичних вуглеводнів, смол, сірчистих

з'єднань) у мастилі або оливі, запропоновано використання експертних систем на базі нечіткої логіки, яка враховує досвід фахівців в умовах двох величин.

4.2.2. Нечітка система керування процесом адсорбції

Для створення нечіткої системи обрано керування вмістом ароматичних вуглеводнів та сірки на виході з адсорбера. Керувальним впливом є витрата адсорбенту на вході в апарат. Фрагмент схеми автоматизації адсорбера із вказаним контуром керування наведено на рис. 4.3.

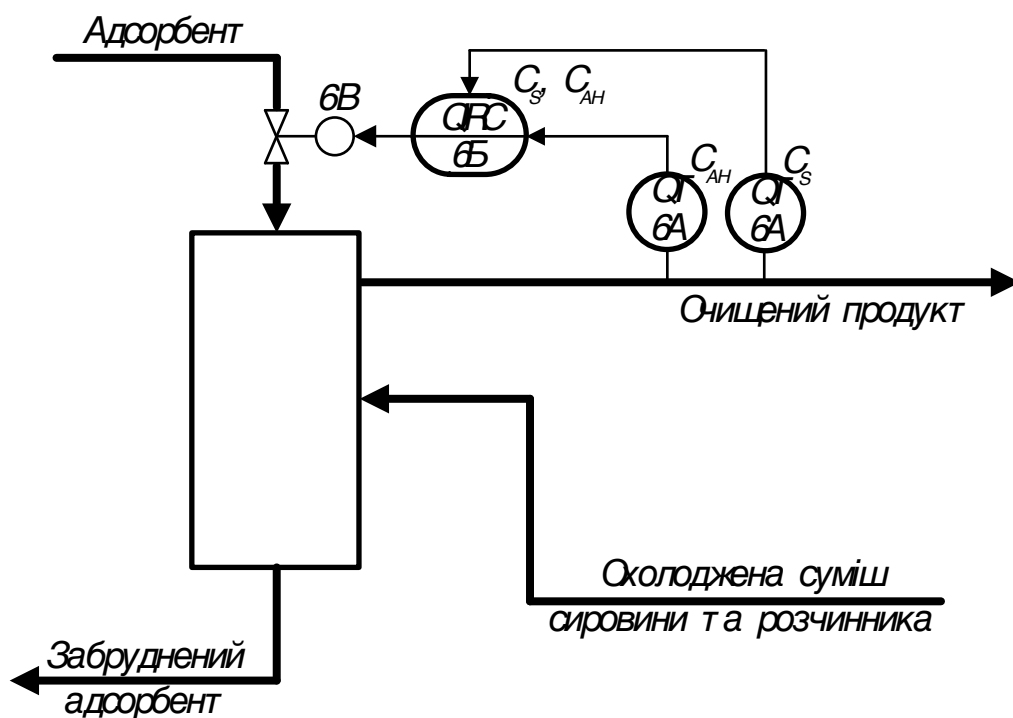


Рисунок 4.3 – Фрагмент схеми автоматизації адсорбера з нечітким регулятором

Визначимо лінгвістичні змінні для керування зазначеним процесом. C_{AH} , C_S – відповідно вміст ароматичних вуглеводнів та сірки на виході з адсорбера, F_a – витрата адсорбенту на вході в апарат. Універсуми для вмісту ароматичних вуглеводнів та сірки відповідно: $C_{AH} = 9,6...17\%$, $C_S = 0,1...0,4\%$, для витрати $F_a = 2,6...4$ кг/с. 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 «Витрата адсорбенту» – $C3 = \{\text{«Дуже мала»}, \text{«Мала»}, \text{«Нормальна»}, \text{«Висока»}, \text{«Дуже висока»}\}$.

Опишемо їх:

Дуже низький

Низький

Лінгвістична змінна: $\langle \text{Вміст } AH; \text{ Нормальний}; 9,6 < C_{ah} < 17 \rangle$

Високий

Дуже високий

Низький

Лінгвістична змінна: $\langle \text{Вміст } S; \text{ Нормальний}; 0,1 < C_s < 0,4 \rangle$

Високий

Дуже мала

Мала

Лінгвістична змінна: $\langle \text{Витрата } A; \text{ Нормальна}; 2,6 < F_a < 4 \rangle$

Висока

Дуже висока

Сформулюємо продукційні правила керування для системи «вміст ароматичних вуглеводнів та сірки – витрата адсорбенту»:

- ЯКЩО [Вміст AH «Дуже низький» І Вміст S «Низький», ТО Витрата A «Дуже мала»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Низький» І Вміст S «Низький», ТО Витрата A «Мала»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Нормальний» І Вміст S «Низький», ТО Витрата A «Нормальна»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Високий» І Вміст S «Низький», ТО Витрата A «Висока»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Дуже високий» І Вміст S «Низький», ТО Витрата A «Висока»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Дуже низький» І Вміст S «Нормальний», ТО Витрата A «Мала»];
- ЯКЩО [Вміст AH «Низький» І Вміст S «Нормальний», ТО Витрата A «Нормальна»];

- ЯКЩО [Вміст $АН$ «Нормальний» І Вміст S «Нормальний», ТО Витрата A «Нормальна»];
- ЯКЩО [Вміст $АН$ «Високий» І Вміст S «Нормальний», ТО Витрата A «Висока»];
- ЯКЩО [Вміст $АН$ «Дуже високий» І Вміст S «Нормальний», ТО Витрата A «Дуже висока»];
- ЯКЩО [Вміст $АН$ «Дуже низький» І Вміст S «Високий», ТО Витрата A «Нормальна»];
- ЯКЩО [Вміст $АН$ «Низький» І Вміст S «Високий», ТО Витрата A «Нормальна»];
- ЯКЩО [Вміст $АН$ «Нормальний» І Вміст S «Високий», ТО Витрата A «Висока»];
- ЯКЩО [Вміст $АН$ «Високий» І Вміст S «Високий», ТО Витрата A «Висока»];
- ЯКЩО [Вміст $АН$ «Дуже високий» І Вміст S «Високий», ТО Витрата A «Дуже висока»].

Результати реалізації нечіткої системи «вміст ароматичних вуглеводнів та сірки – витрата адсорбенту» засобами програми *MatLab* подано у вигляді вікон такого виду: схема нечіткої системи (рис. 4.4); редактор функцій належності для вхідних і вихідних (керувальних) змінних (рис. 4.5); редактор продукційних правил після їх визначення (рис. 4,6); перегляд результату використання продукційних правил та поверхні нечіткого висновку (рис. 4.7).

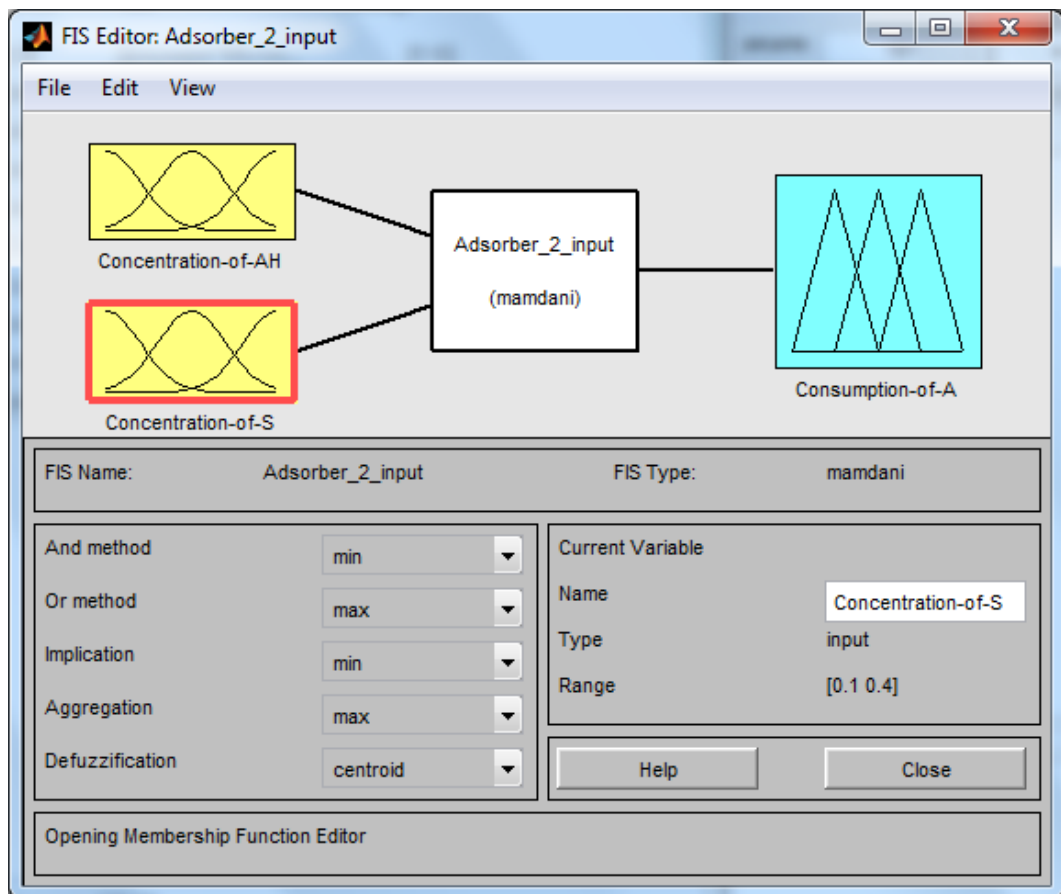


Рисунок 4.4 – Схема нечіткої системи у середовищі *MatLab*

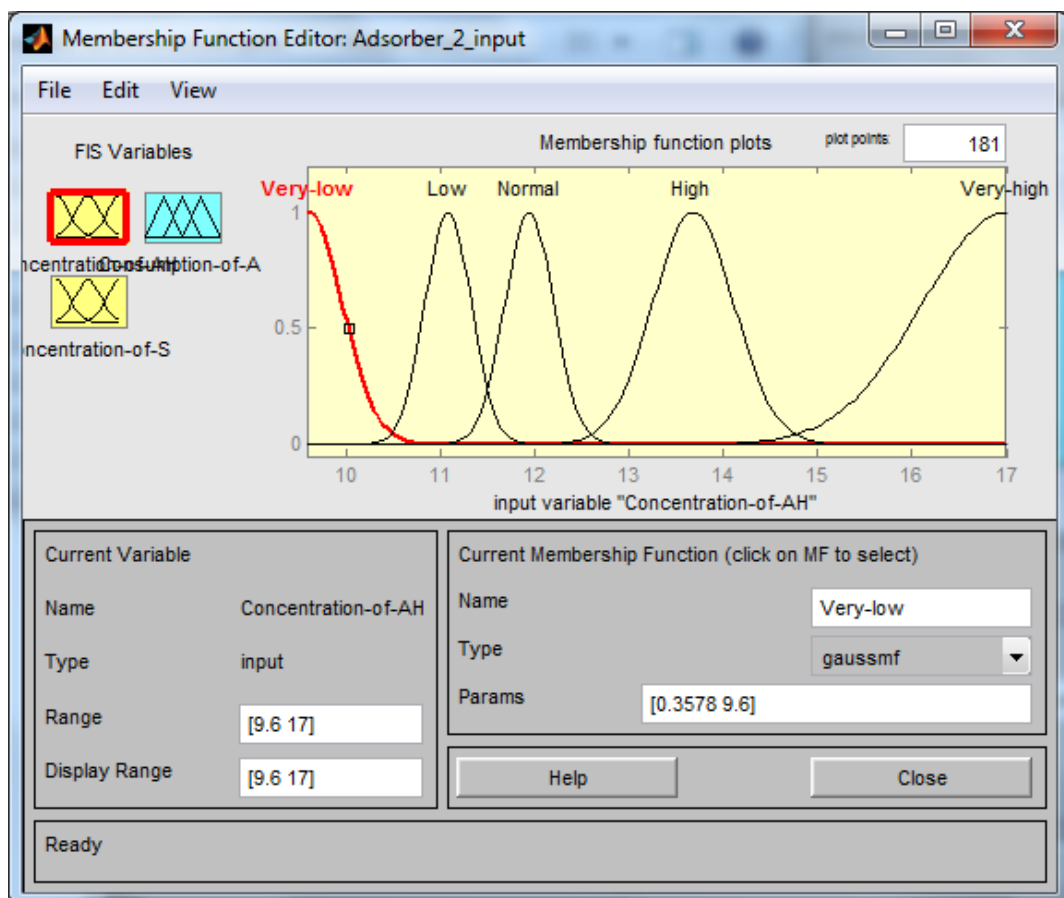


Рисунок 4.5 – Вікно редактора функцій належності для вхідної змінної «Вміст *AH*»

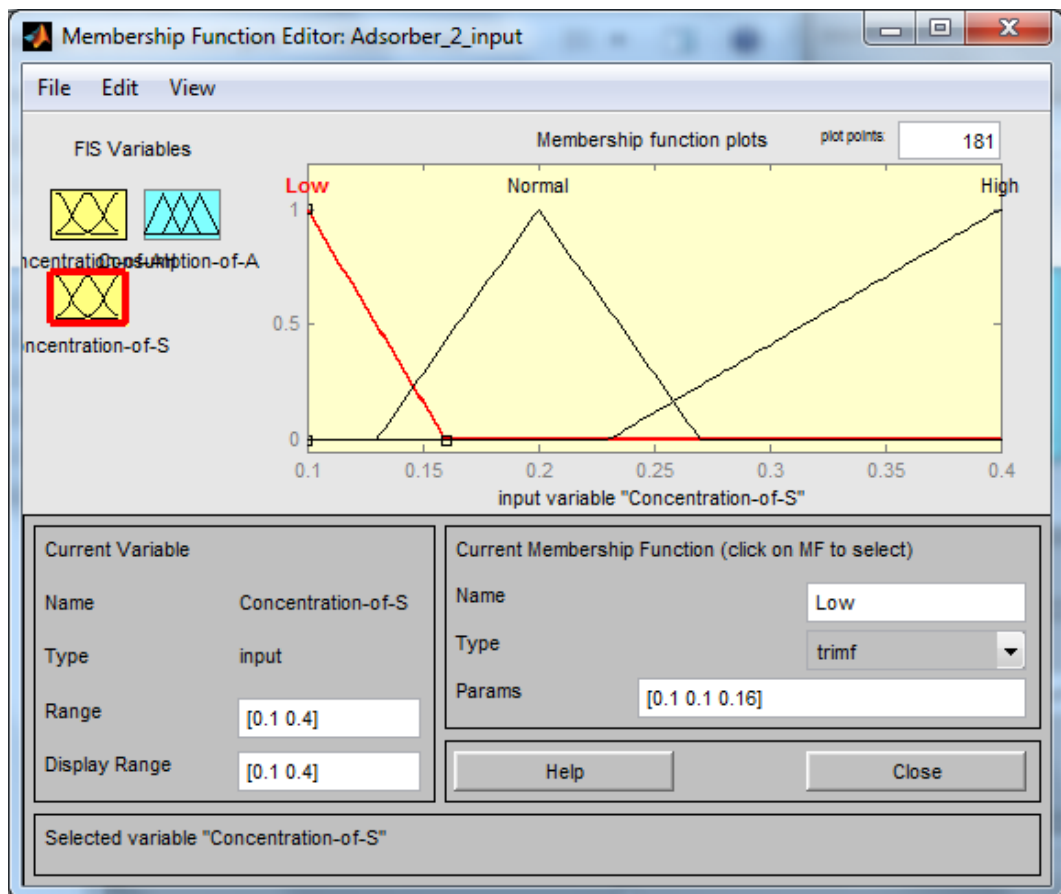


Рисунок 4.6 – Вікно редактора функцій належності для вхідної змінної «Вміст S»

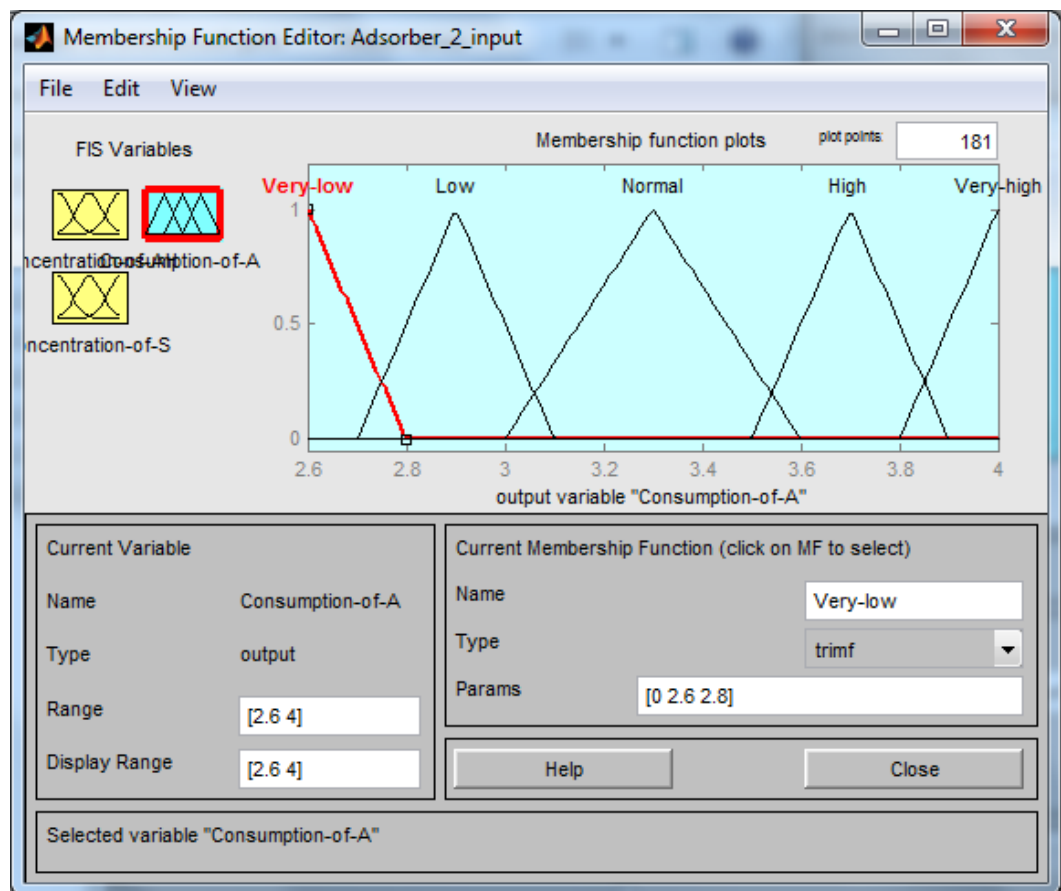


Рисунок 4.7 – Вікно редактора функцій належності для вихідної змінної «Витрата A»

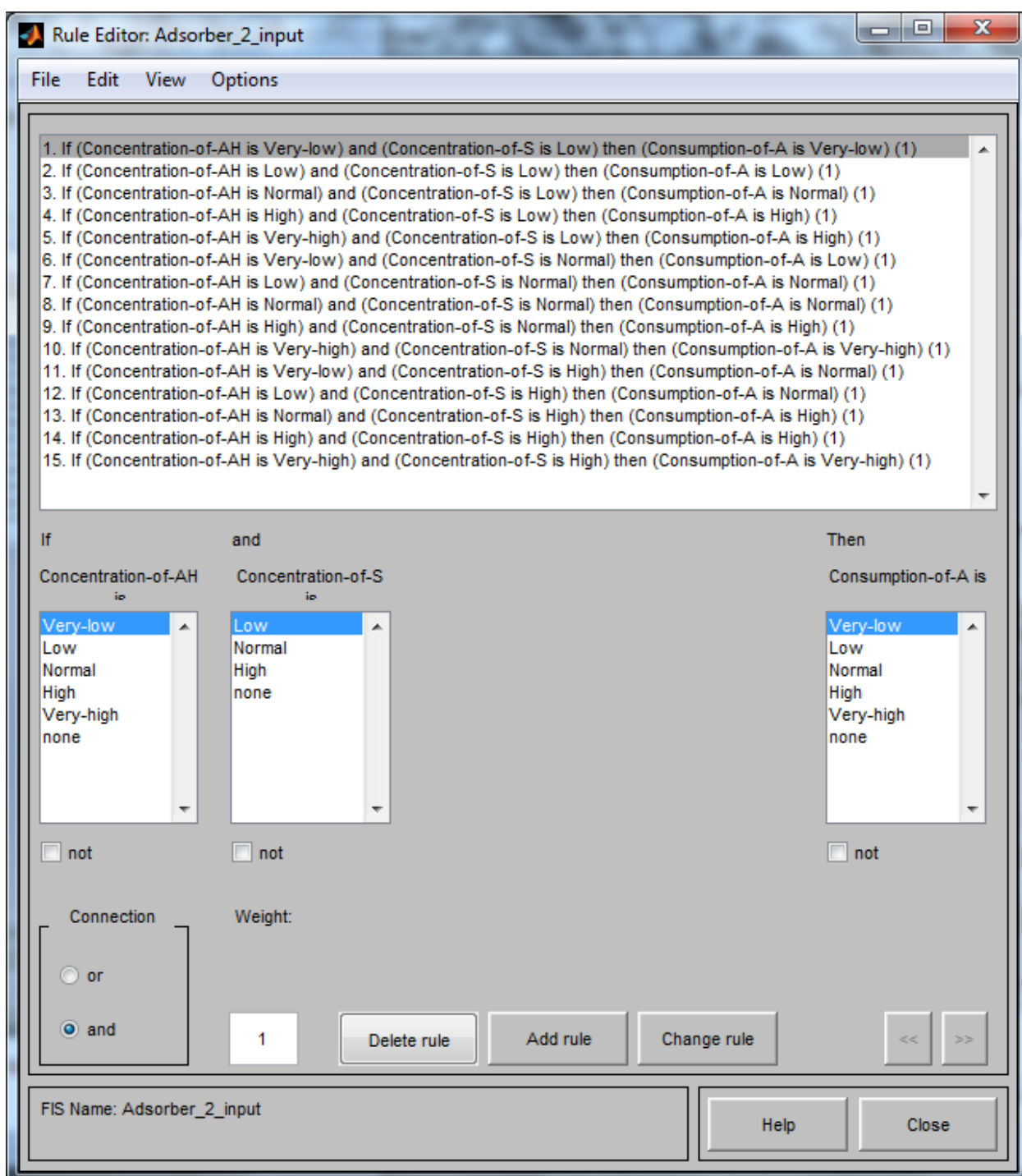


Рисунок 4.8 – Вікно редактора продукційних правил після їх визначення

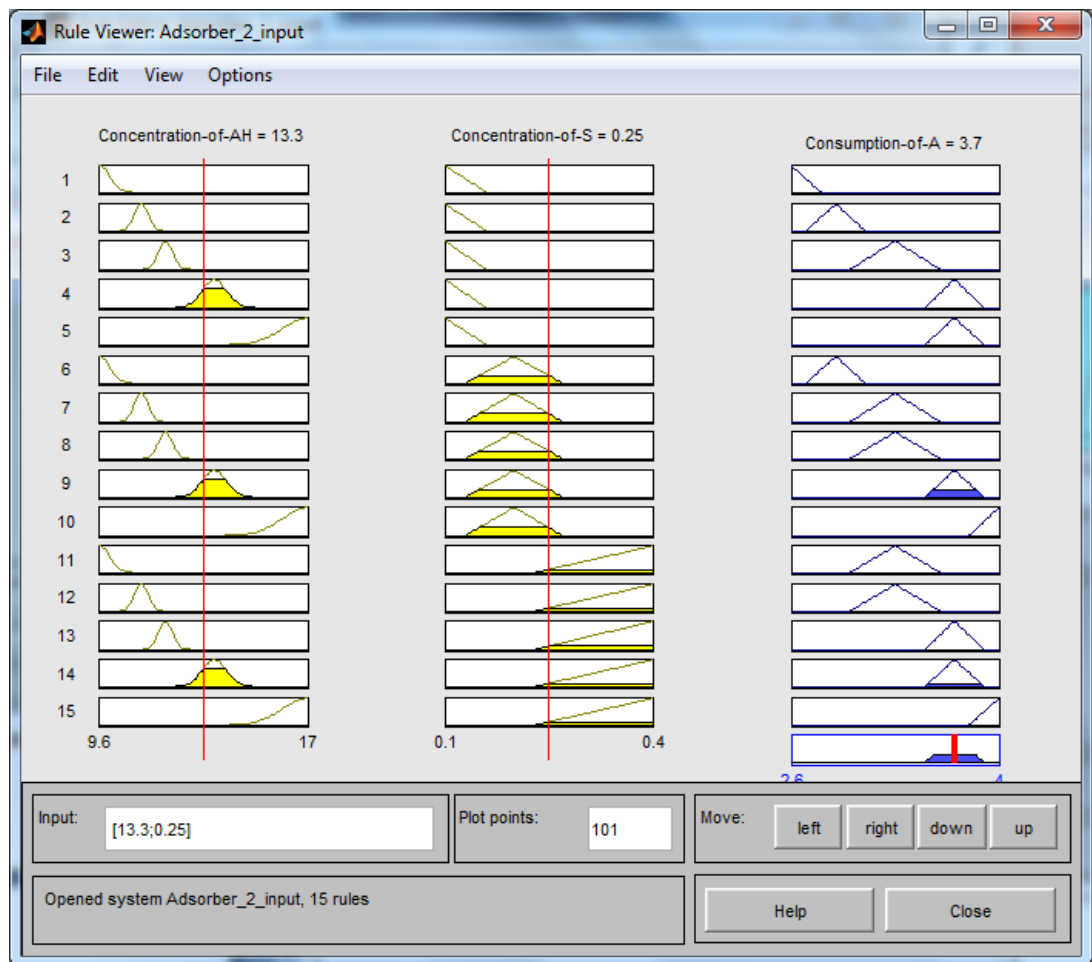


Рисунок 4.9 – Вікно перегляду результату використання продукційних правил

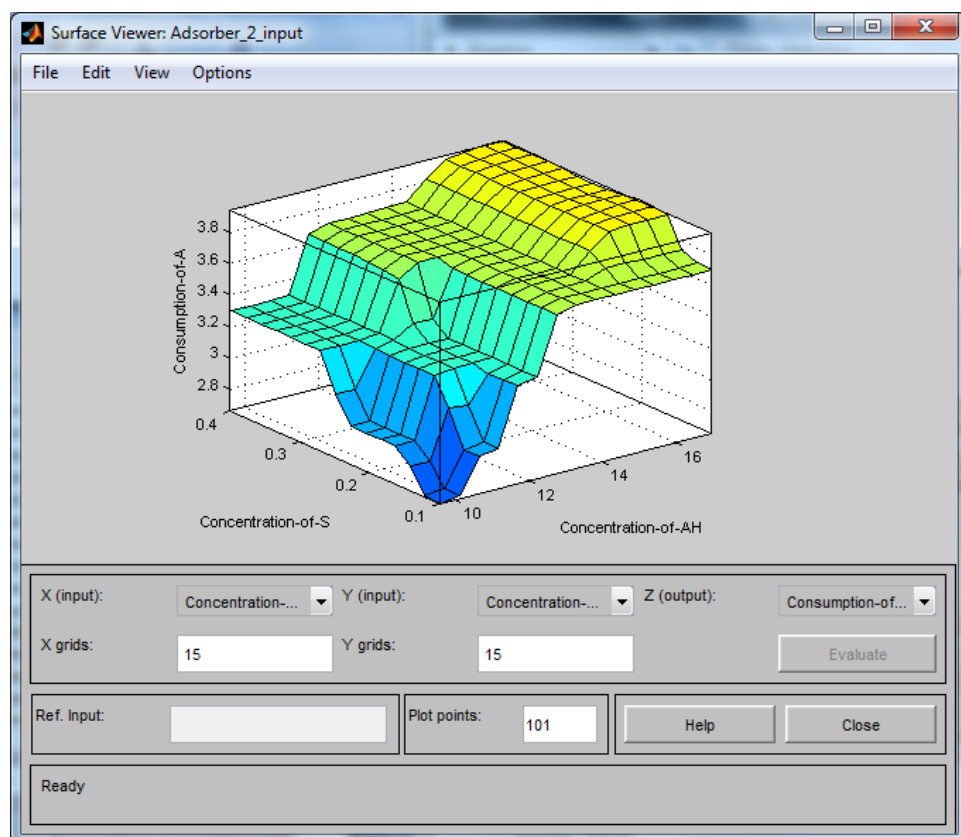


Рисунок 4.10 – Вікно перегляду поверхні нечіткого висновку

Висновки до розділу 4

У даному розділі запропонована АСКТП адсорбційного очищення олив та мастил, яка дозволить з'ясувати поточний стан нормативно-правових документів сталого розвитку. Для верхнього рівня розроблено структуру БД нормативно-правових документів СР виробництва, яка дозволить отримувати інформацію про обмеження на показники якості оливи або мастила, вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони тощо. Для технологічного процесу очищення олив та мастил розроблена система автоматизації, відповідно до аналізу хіміко-технологічних особливостей процесу та з позиції документів СР, що зазначено в розділах 1 і 2.

Також запропоновані варіанти САК процесами очищення, які дозволять враховувати декілька показників якості вихідного продукту. Перша система побудована на основі класичного закону керування (П), друга – з використанням нечіткої логіки.

За допомогою бази даних нормативних документів виробництва – верхній рівень – електронна обчислювальна машина – середній рівень – може відслідковувати зміни в таких документах, розв'язувати задачі оптимізації, які пов'язані з економічною та екологічною складовими концепції сталого розвитку і передбачають розрахунок керувальних впливів. ЕОМ передає розраховані оптимальні параметри на нижній рівень – локальні системи автоматичного керування, до яких належать вимірювальні прилади, локальні регулятори та регулювальні органи у складі виконавчих механізмів.

5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1. Ідея та опис стартапу

Надамо опис ідеї обсягом до 20 слів.

Створення бази даних нормативних документів сталого розвитку, які стосуються технологічних процесів очищення олив та мастил.

Опис ідеї обсягом до 150 слів.

У процесах очищення відпрацьованих олив та мастил в атмосферу виділяються шкідливі речовини, тому на виробництвах необхідна наявність інформаційно-математичного забезпечення, яке дозволить з'ясовувати поточний стан справ по напрямкам державних і міжнародних обмежень на ГДК цих речовин у повітрі робочої зони. Компанія буде надавати послуги щодо його створення, зокрема, розроблення структури баз даних. Зокрема, вона має містити актуальні відомості про такі інформаційні об'єкти: документи СР, розроблені організаціями світового рівня, відомості про їх ратифікацію Україною; документи, які несуть правовий характер на території України, їх вміст, дати набуття чинності та зміни, які були внесені в них; державні стандарти, санітарні норми і правила, які мають бути дотримані на відповідному виробництві, терміни їх чинності; загальну інформацію про установки, що беруть участь у відповідних технологічних процесах, місце їх розташування, обсяг виробництва кожної з них та наявні шкідливі речовини; інформацію про ГДК шкідливих речовин у повітрі робочої зони, клас небезпеки, характер їх дії на організм.

Назва: ***Brain Cycles***.

Логотип проекту наведено на рис. 5.1.

Цільова аудиторія: підприємства, які займаються очищенням відпрацьованих олив та мастил.

Конкуренти: інші компанії, які займаються створенням баз даних.

Потенційні конкуренти: підприємства, які займаються очищенням відпрацьованих олив та мастил, без урахування концепції сталого розвитку (тобто діяльність яких спрямована лише на отримання прибутку).



Рисунок 5.1 – Логотип стартап проекту

Конкурентна перевага: інформаційне забезпечення спрямоване на врахування складових концепції сталого розвитку на рівнях виробництва, України та світовому, що дозволяє попередити можливі аварійні ситуації та витрати на їх усунення.

Прибутки: за рахунок надання послуг зі створення та підтримання баз даних.

Потреби: створення баз даних.

Фінансування: 3 млн грн. на оренду приміщення, створення програмного забезпечення, допоміжні прилади, рекламу.

Команда: директор, бухгалтер, головний інженер, команда розробників (інженерів) зі створення баз даних, програміст, спеціаліст у галузі очищення олив та мастил.

5.2. Аудит динаміки й основних тенденцій ринку мастильних матеріалів

Наведемо об'єми ринку мастильних матеріалів на рисунках 5.2 і 5.3. На першому зображено динаміку ринку вироблених в Україні мастильних матеріалів, другий відображає загальну динаміку з урахуванням імпорту.

У період 2012–2015 рр. ціни на мастильні матеріали стабільно зростали, як і попит на них. Через банкрутство основних виробників даних продуктів, об'єм ринку у 2015 році значно зменшився (у 3.3 рази), що призвело до збільшення об'єму ринку імпортних продуктів. Період 2015–2018 рр. характеризує також висхідну тенденцію в попиті як на мастильні матеріали, вироблені в Україні, так і на імпортний продукт, хоча, у порівнянні з 2017 р., у 2018 р. дещо знизився темп зростання динаміки ринку. Слід зазначити, що загальний ринок мастильних матеріалів показує висхідну тенденцію на всьому проміжку дослідження, хоча темпи зростання у періоди криз сповільнювалися.

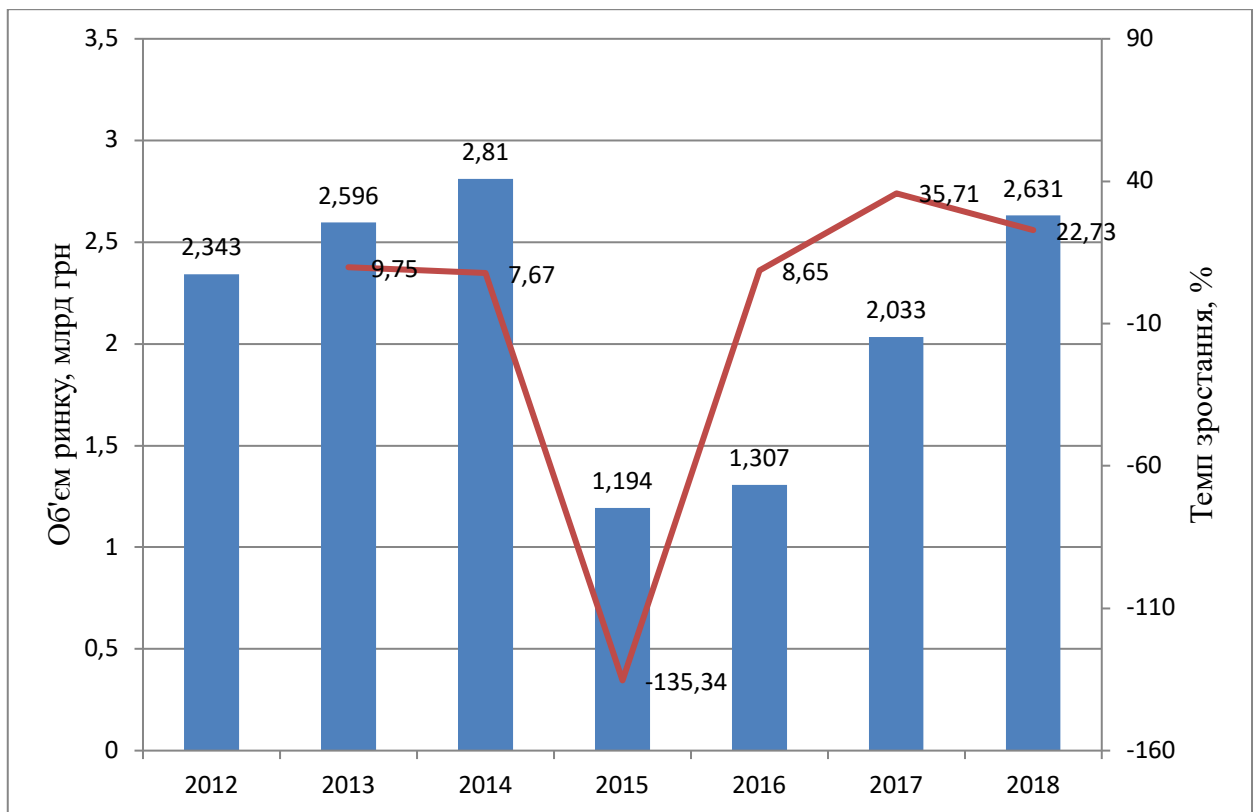


Рисунок 5.2 – Динаміка ринку виробництва мастильних матеріалів в Україні

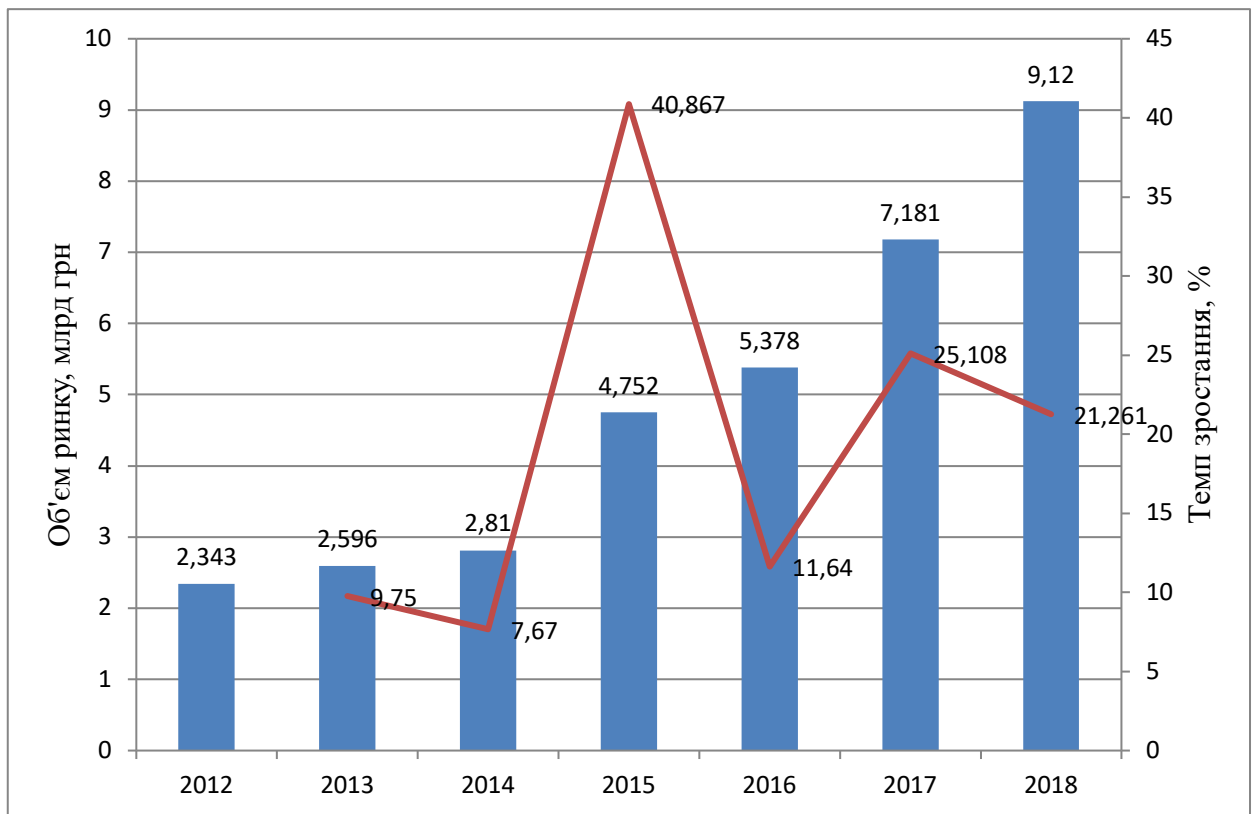


Рисунок 5.3 – Загальна динаміка ринку мастильних матеріалів в Україні

В майбутньому можна спрогнозувати збільшення обсягів ринку мастильних матеріалів і темпів їх зростання, про що свідчить статистика попередніх років. Причому частка ринку імпортованих мастильних матеріалів зростатиме швидше за ринок їх виробництва.

Аналіз динаміки ринку показав сприятливі умови для розроблення стартапу у сфері виробництва мастильних матеріалів, оскільки навіть у періоди криз відбувається збільшення його обсягів. Також інноваційна ідея стартапу дозволить врахувати прагнення суспільства до збереження навколишнього середовища та раціонального використання природних ресурсів.

5.3. Аналіз маркетингового середовища підприємства

Товар, якому присвячено аналіз маркетингового середовища: створення інформаційного забезпечення, зокрема, баз даних та надання послуг з їх підтримання в нафтохімічній та нафтопереробній областях.

5.3.1. Аналіз внутрішнього середовища

5.3.1.1. Наведемо загальну інформацію про компанію.

Історія розвитку підприємства.

Стартап, який спрямовано на виконання концепції сталого розвитку; його суть полягає у створенні та підтриманні інформаційного забезпечення, баз даних для нафтохімічних та нафтопереробних виробництв.

Товарний портфель (асортимент товарів та послуг): розроблення баз даних; підтримання баз даних (забезпечення їх адекватної роботи та усунення можливих несправностей).

Географічне розташування підприємства – Україна.

Корпоративні стандарти: інновації; професіоналізм; конфіденційність; якість наданих послуг; професійна етика та об'єктивність.

Ресурси і обмеження: людські: інженери знань; експерти в нафтохімічній, нафтопереробній та ІТ областях; матеріальні: приміщення; обладнання.

5.3.1.2. Надамо короткий опис товару, якому присвячено аналіз маркетингового середовища.

Три рівні товару та його особливості:

- перший рівень: інформаційне та програмне забезпечення, яке передбачає врахування концепції сталого розвитку з метою зменшення антропогенного впливу на навколишнє середовище;
- другий рівень: база даних, яка буде містити інформацію про нормативні документи на рівнях виробництва, України та світовому, значення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин, які можуть утворюватися та/або виділятися у повітря робочої зони нафтохімічного або нафтопереробного виробництва тощо;
- третій рівень: інструкція до використання бази даних; сервісна підтримка.

Ринкова історія товару.

На сучасному українському ринку нафтохімічні та нафтопереробні підприємства, які використовують власні бази даних. Розроблений стартап

передбачає створення такої БД, яка буде містити інформацію про вимоги, встановлені до якості олив та мастил, значення ГДК шкідливих речовин у повітрі робочої зони, а також рекомендації, спрямовані на зменшення антропогенного впливу на кліматичну систему, розроблені організаціями світового рівня, й таку, що несе правовий характер на території України й у межах окремих виробництв.

Визначення етапу життєвого циклу товару – товар на етапі зростання.

5.3.1.3. Динаміка розвитку галузі.

Основні оператори ринку – нафтохімічні та нафтопереробні підприємства, різні інженерні компанії.

Економічні та соціальні тенденції ринку.

В останні роки обсяги ринку мастильних матеріалів стабільно зростають.

Характеристика ринку.

Ринок постійно зростає, в 2018 році його обсяг був 9.12 млрд грн. Прогнозують, що у період 2020 – 2025 рр. він зросте до 55 %..

Споживачі знаходяться на території України, можливе обслуговування іноземців.

Сегментація ринку – за галуззю.

Конкуренти – компанії, які займаються створенням баз даних.

Канали розподілу: прямі (без посередників), можлива співпраця з посередником.

Викладену вище загальну інформацію систематизують у вигляді переліку факторів внутрішнього маркетингового середовища фірми за окремими групами.

Організаційно-правові:

- форма власності – приватна одинична;
- форма організації – фірма;
- організаційна структура – бригадна (крос-функціональна структура) управління;

- система менеджменту – відкрита (базується на новаторських підходах, розумінні взаємозв'язків, взаємозалежності елементів, підсистем і всієї системи в цілому із зовнішнім середовищем);
- стиль керівництва – демократичний.

Ресурси:

- фінансові – інвестування;
- виробничі та складські потужності – приміщення, ЕОМ;
- технології власного виробництва;
- інформаційні – реклама компанії;
- трудові – експерти в області проектування баз знань, програмісти, спеціалісти з нафтохімічної та нафтопереробної галузей промисловості;
- інтелектуальні – власні наукові розробки та програмне забезпечення;
- правові – документи: на інтелектуальну власність; ті, що засвідчують реєстрацію підприємства; нормативні тощо.

Таблиця 5.1 – Аналіз внутрішнього маркетингового середовища підприємства

Внутрішні фактори	Вплив фактору		Симптоми проблеми/можливості
	Можливості	Загрози	
Стратегія розвитку компанії	Розширення діяльності підприємства	Неефективне керування	Зростання/зменшення можливостей й доходів компанії
Кадри	Якісне виконання роботи	Неякісне виконання роботи	Правильна робота баз даних; якісні послуги у промисловій області/неправильна робота баз даних; зростання навантаження на кліматичну систему, ризики значного погіршення стану довкілля
Фінанси	Забезпечення ефективного функціонування компанії	Неможливість виконувати роботу	Якісний/неякісний вихідний продукт

5.3.2. Аналіз зовнішнього маркетингового середовища

Проведемо аналіз факторів макромаркетингового середовища.

Таблиця 5.2 – Підсумкова таблиця факторів політико-правового середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Зміни в законі	Покращення стану довкілля та якості життя населення; встановлення жорстких вимог до якості вихідного продукту	Встановлення жорстких вимог до якості вихідного продукту може призвести до банкрутства відповідних підприємств	Встановлення жорстких вимог до якості вихідного продукту призводить до потреб нафтохімічних та нафтопереробних підприємств у створенні та/або оновленні баз даних
Політична ситуація в країні	Збільшення кількості користувачів	Неможливість застосування технології через політичну ситуацію	Розширення діяльність стартапу на інші види промисловості; розвернення діяльності стартапу в інших країнах
Власні наукові дослідження	Фінансування державою	Обмеження на діяльність	Обмежитись фінансуванням за рахунок приватних інвесторів (статті 19, 20 закону про підприємництво)
Матеріально-технічне забезпечення	Податкові, цінові, митні та інші пільги		Зменшення фінансових витрат (стаття 21 закону про підприємництво)

Таблиця 5.3 – Підсумкова таблиця факторів економічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
1	2	3	4
Залучення висококваліфікованих спеціалістів	Збільшення цін на послуги	Збільшення витрат на оплату роботи працівників	Залучення працівників, які зацікавлені в технології

Закінчення таблиці 5.3

1	2	3	4
---	---	---	---

Рівень цін	Збільшення цін на послуги	Необхідність зменшення ціни через неможливість підприємств оплатити надані послуги	Тримати рівень цін на припустимому рівні з метою збільшення кількості споживачів. У подальшому можливе рівномірне підвищення цін
Рівень інфляції	Витіснення іноземних конкурентів	Зменшення обсягів ринку	Ціни на послуги будуть більш прийнятними, ніж у іноземних конкурентів. Ефективний розподіл витрат

Таблиця 5.4 – Підсумкова таблиця факторів науково-технічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
1	2	3	4
Власні наукові дослідження	Створення інноваційних розробок	Поява конкурентів	Впровадження нових послуг
Залучення висококваліфікованих спеціалістів	Розширення області досліджень та вдосконалення розроблень, що вже створені	Конфлікт інтересів	Надання можливостей для реалізації перспективних працівників, проведення дискусій
Створення власних технологій (середовищ) розроблення інформаційного забезпечення	Незалежність від компаній-постачальників (повне керування якістю вихідного продукту)	Збільшення витрат на матеріальні ресурси	Адекватне підвищення цін на послуги

Закінчення таблиці 5.4

1	2	3	4
---	---	---	---

Патентний захист	Додатковий дохід	Повторне патентування конкурентами після закінчення дії чинних патентів	Слідкування за строками подання та оновлення дії патентів
------------------	------------------	---	---

Таблиця 5.5 – Підсумкова таблиця факторів демографічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Чисельність населення	Збільшення кількості споживачів	Зменшення кількості споживачів	Зменшення кількості населення може зменшити кількість клієнтів
Кваліфікація трудових ресурсів	Розвинення технологій	Нестача кадрів	Пошук кваліфікованих робітників та надання їм якісних умов праці
Чисельність населення, робота якого пов'язана з постійним перебуванням у небезпечних або стресових умовах (робота на промислових підприємствах)	Збільшення кількості споживачів	Ризики зниження якості життя й відповідно, роботи населення, що призведе до погіршення стану довкілля й зниження прибутків підприємств-споживачів	Постійне підтримання створених баз даних та рекомендації щодо їх оновлення
Структура населення (рівень старіння)	Прихильники концепції СР	Недовіра щодо доцільності застосування концепції СР	Демонстрування результатів роботи підприємств, які використовують запропоноване інформаційне забезпечення, щодо зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище

Таблиця 5.6 – Підсумкова таблиця факторів соціо-культурного середовища

Фактори	Вплив фактору	
---------	---------------	--

	Можливості	Загрози	Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
Життєвий рівень населення	Збільшення кількості платоспроможного населення	Втрата споживачів	Можливість оплати частинами
Спосіб життя	Підвищення попиту на продукт		Серед промислових підприємств зростає попит на використання запропонованого продукту

Таблиця 5.7 – Підсумкова таблиця факторів природного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Стихійні лиха		Руйнування обладнання, знищення інформації	Резервне копіювання даних
Доступність сировинних та енергетичних ресурсів	Збільшення обсягів споживачів		Налагодження партнерських відносин з вітчизняними компаніями-постачальниками; розширення діяльності компанії

5.3.3. Аналіз факторів мікроркетингового середовища

Таблиця 5.8 – Підсумкова таблиця впливу споживачів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
1	2	3	4
Промислові споживачі (нафтохімічні та нафтопереробні підприємства)	Збільшення кількості споживачів	Втрата частини доходу через необхідність сплачувати відсоток від продажу послуг	Залучення більшої кількості споживачів за рахунок реклами результатів роботи, що здійснюють нафтохімічні та нафтопереробні підприємства

Закінчення таблиці 5.8

1	2	3	4
Демографічні та соціально-психологічні характеристики споживачів	Можливість продати послугу	Низька купівельна спроможність	Підвищення зацікавленості споживачів (реклама)
Обсяг купівельного попиту	Додатковий прибуток	Низька зацікавленість у продукті	Розширення обсягу послуг
Чутливість покупця до ціни та якості	Збільшення ціни на послуги за рахунок підвищення якості	Незадоволення якістю послуги	Підвищення якості послуг

Таблиця 5.9 – Підсумкова таблиця впливу конкурентів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Кількість конкурентів	Велика кількість конкурентів вимагає впровадження власних сучасних технологій та вдосконалення тих, що вже існують	Втрата споживачів	Розширення бази знань з можливістю створення інформаційного забезпечення для підприємств різних спрямувань
Слабкі і сильні сторони конкурентів	Можливість поглинання конкурента	Зсунення більш впливовим конкурентом з ринку	Постійно аналізувати ринок та продукцію конкурентів й орієнтувати підприємство на інноваційність та якість
Наявність лідерів	Здорова конкуренція	Займати дуже малу частину ринку через стійкі позиції лідерів ринку	Збільшувати кількість каналів збуту, поступово витісняючи лідерів

Таблиця 5.10 – Підсумкова таблиця впливу постачальників

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Якість та ціна продуктів	Знайти більш вигідного постачальника зі зниженням ціни та виробничих ризиків	Незадовільна якість	Впровадження власних технологій (середовищ) розроблення інформаційного забезпечення
Спеціалісти з різних галузей промисловості	Розширення бази знань, збільшення кількості клієнтів через внутрішню рекламу (підприємства, які співпрацюють між собою)	Складність у пошуку досвідчених спеціалістів	Пошук спеціалістів у освітніх технічних установах різних форм власності, а також на конференціях, які присвячені розвитку та вирішенню проблем у промислових сферах та охорони довкілля

Таблиця 5.11 – Підсумкова таблиця впливу контактних аудиторій

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
1	2	3	4
Основні контактні аудиторії фінансової сфери, засобів інформації, державних установ, органів державної влади і управління	Зацікавлення великої аудиторії фінансової сфери	Конфлікт інтересів, тиск на підприємство	Пошук шляхів урегулювання конфлікту
Широка публіка	Збільшення кількості споживачів	Можлива поява конкурентів або критиків	Надання відкритого доступу до інформації щодо продукту (опис технології, результати її використання)

Закінчення таблиці 5.11

1	2	3	4
Внутрішні контактні аудиторії (освітні технічні установи різних форм власності)	Збільшення темпів впровадження технологій	Сповільнення темпів впровадження технологій через наявність вже існуючих методів, які спрямовані, в основному, на отримання прибутку	Демонстрація результатів застосування розроблених технологій

5.3.4. Формування управлінської проблеми

Таблиця 5.12 – *SWOT*-аналіз

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> - Якість продукту - Направленість на збільшення якості життя населення, зменшення навантаження на довкілля та зростання прибутку підприємств - Врахування нормативів (ГДК шкідливих речовин у повітрі робочої зони, вимоги до якості вихідного продукту) на рівнях підприємств, України та світовому 	<ul style="list-style-type: none"> - Необхідна наявність значних інформаційних ресурсів - Необхідність пошуку значної кількості нормативних документів, їх вартість - Обмеження зі сторони законодавчої бази
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> - Зайняти велику частину ринку - Раціональне використання природних ресурсів - Впровадження власних технологій (середовищ) розроблення баз даних з їх подальшим продажем іншим компаніям - Розвернення діяльності підприємства в інших країнах - Розширення діяльності підприємства в інших галузях промисловості 	<ul style="list-style-type: none"> - Не окупити інвестиції - Не зацікавити цільову аудиторію - Складність у пошуку спеціалістів

Управлінська проблема: зацікавлення цільової аудиторії в наданих послугах.

Розглянемо альтернативні шляхи вирішення управлінської проблеми/реалізації управлінської можливості.

Таблиця 5.13 – Слабкі та сильні сторони альтернативних шляхів

Альтернативи	Слабкі сторони	Сильні сторони
1. Найняти компанію, що надасть послуги реклами та маркетингу	Необхідні додаткові кошти	Можливість швидкого та широкого розповсюдження інформації про діяльність підприємства і, відповідно, швидкого та масового набору клієнтів
2. Залучення великої кількості каналів збуту (освітні технічні установи різних форм власності)	Втрата частини доходу через необхідність сплачувати відсоток від продажу послуг	Збільшення кількості споживачів за рахунок внутрішньої реклами установ, що є каналами збуту
3. Участь у конференціях, тематика яких стосується діяльності підприємства, публікації в технічних виданнях та тих, які стосуються охорони довкілля	Необхідні додаткові кошти (не є суттєвим, оскільки витрати в цьому випадку незначні)	Можливість широкого розповсюдження інформації про діяльність підприємства із додатковим залученням інвесторів

Найоптимальніший шлях вирішення управлінської проблеми є участь у різноманітних конференціях, тематика яких стосується діяльності підприємства, а також організація рекламних та маркетингових послуг.

5.4. Конкурентний аналіз компанії

Таблиця 5.14 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства та можливі дії
1. Тип конкуренції – монополістична	Підприємство виробляє диференційований продукт, який орієнтовано на його якість	Створення на базі власних досліджень нових технологій інформаційного забезпечення та вдосконалення тих, що вже існують
2. Рівень конкурентної боротьби – національний з переходом у глобальний	На перших етапах розвитку підприємство діятиме в межах країни з подальшим розширенням за кордон	Забезпечення необхідних умов для діяльності підприємства в країні відповідно до чинного законодавства, а також аналіз динаміки світового ринку та конкурентів
3. За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Діяльність підприємства орієнтована на промислову сферу.	Спрямованість на розвиток у промисловій галузі
4. Конкуренція за видами товарів – товарно-видова (функціональна)	Конкуренція відбувається між функціональністю вихідного продукту	Інформувати споживачів про товар та ефективність наданих послуг
5. Характер конкурентних переваг – неціновий	Перевага полягає в якості та інноваційності наданих послуг	Демонстрування результатів роботи підприємств, які використовують запропоноване інформаційне забезпечення, щодо зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище
6. За інтенсивністю – марочна	Товар має маркування	Основна мета – створення власної марки для захисту від підробок

Таблиця 5.15 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Перелік	Бар'єри входження в ринок	Фактори сили постачальників	Фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
	1	2	3	4	5
	Інженерні компанії	інтелектуальна власність, яку охороняють патентуванням; лояльність споживачів (їх прихильність до вже відомих компаній та технологій); державне регулювання економіки (законодавчі нормативи щодо концепції СР, що підвищує об'єм необхідних інвестицій) необхідність капіталовкладення; науково-дослідні роботи (необхідні інвестиції в технології); неповоротні витрати на виробництво та реалізацію продукту; доступ до каналів розподілу.	Фактор впливу постачальників невеликий, оскільки існують товари-замінники. У даному випадку присутня умова якості товару, який постачають. Фактор впливу спеціалістів з різних галузей нафтохімічна та нафтопереробної промисловостей, а також інженерів знань досить суттєвий, оскільки існує вимога до їх кваліфікації та досвіду.	Кількість споживачів потенційно велика, оскільки включає в себе нафтохімічні та нафтопереробні підприємства, тому фактори сили споживачів незначні.	Інші компанії можуть надавати послуги зі створення інформаційного забезпечення, але їх діяльність, в основному, спрямована на отримання прибутку без урахування концепції СР, тому можна вважати, що прямих замінників поки немає.

Закінчення таблиці 5.15

Висновки	1	2	3	4	5
	Обсяги ринку мастильних матеріалів досить великі та постійно зростають, тому є доцільним подальший розвиток у цій галузі. При цьому демонстрація результатів роботи підприємств, які використовують запропоноване інформаційне забезпечення, щодо зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище знизить вплив прямих конкурентів.	Можливість виходу на ринок забезпечують інноваційністю технології та подальшим впровадженням власних сучасних технологій розроблення інформаційного забезпечення із вдосконаленням тих, що вже існують. Потенційними конкурентами є підприємства, які займаються очищенням відпрацьованих оливи та мастил, без урахування концепції СР (тобто діяльність яких спрямована лише на отримання прибутку); їх строки виходу на ринок знижуються у разі незадовільної якості розроблених технологій.	Оскільки якість та ціна обладнання можуть не відповідати умовам, доцільним є впровадження власних сучасних технологій та вдосконалення тих, що вже існують. Спеціалісти з галузі не впливають на умови роботи ринку, оскільки у проект залучають тих, які зацікавлені саме в технології	Якість послуг та їх ціна	Оскільки прямих замінників не існує, то обмеження можна усунути шляхом надання споживачам інформації щодо ефективності та унікальності створених технологій.

Таблиця 5.16 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентноспроможності	Обґрунтування
1	Врахування концепції сталого розвитку при створенні інформаційного забезпечення на виробництвах, діяльність яких може призвести до утворення та/або виділення шкідливих речовин у навколишнє середовище	Зменшення навантаження на оточуюче середовище, раціональне використання природних ресурсів; підвищення якості вихідного продукту на підприємствах та, відповідно, їх цін
2	Наявність інформаційного сайту	Можливість ознайомитися з видами послуг, які надає компанія, порівняти рівень цін з іншими компаніями-конкурентами
3	Проведення власних наукових досліджень	Розширення проекту в інших напрямках

Таблиця 5.17 – Обґрунтування факторів конкурентноспроможності

№	Фактор конкурентноспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів конкурентів у порівнянні з Brain Circles						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Врахування концепції сталого розвитку при створенні інформаційного забезпечення на виробництвах, діяльність яких може призвести до утворення та/або виділення шкідливих речовин у навколишнє середовище	20	+						
2	Наявність інформаційного сайту	5			+				
3	Проведення власних наукових досліджень	18	+						
4	Якість	18	+						
5	Ціна	5					+		

5.5. Ринкові стратегії стартап-проекту

Таблиця 5.18 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1	Промислові споживачі (нафтохімічні та нафтопереробні підприємства)	Висока	80 %, оскільки на законодавчому рівня розробляють документи, які зобов'язують промислові підприємства враховувати рівень викід шкідливих речовин у навколишнє середовище	Висока, оскільки концепцію СР почали впроваджувати відносно недавно й такий підхід до керування підприємством є новим	Вхід у даний сегмент досить простий, але необхідно інформувати зазначену цільову групу в доцільності використання запропонованих технологій та дотримуватися чинного законодавства

Таблиця 5.19 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Укладення довгострокових контрактів	Стратегія диференційованого маркетингу	Висока якість наданих послуг: постійне підтримання та оновлення баз даних; проведення інструктажу для персоналу щодо користування ними	Стратегія диференціації

Таблиця 5.20 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або з абирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Шукати нових споживачів та забирати існуючих у конкурентів	Ні, технології будуть розроблені на основі власної бази знань.	Стратегія лідера

Таблиця 5.21 – Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту
1	Висока якість	Стратегія диференціації	Якість наданих послуг	Власні наукові дослідження (створення нових технологій інформаційного забезпечення та вдосконалення тих, що вже існують), високоякісне сучасне обладнання, зменшення навантаження на навколишнє середовище, раціональне використання природних ресурсів

Висновки до розділу 5

У даному розділі був розроблений стартап-проект, основною задачею якого є створення бази даних нормативних документів сталого розвитку, які стосуються технологічних процесів очищення олив та мастил. Відповідно до такої задачі визначено цільову аудиторію, основні та потенційні конкуренти, конкурентні переваги, необхідні матеріальні й людські ресурси та можливі джерела фінансування. Також проведено аналіз динаміки ринку мастильних матеріалів у період 2012–2018 рр., який показав доцільність створення такого проекту. Зокрема, дослідження внутрішнього та зовнішнього маркетингового середовища дозволили визначити фактори керування підприємством та впливи конкурентів на його діяльність. На основі факторів мікроринкового середовища та проведеного *SWOT*-аналізу була сформована управлінська проблема та запропоновані шляхи її вирішення. Проведений конкурентний аналіз компанії дозволив визначити базову стратегію її конкурентної поведінки та позиціонування. Таким чином, розроблено базову стратегію розвитку підприємства із урахуванням його сильних та слабких сторін, яка забезпечить конкуренцію на ринку мастильних матеріалів.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації були проведені такі дослідження.

1. Досліджена ХТС по очищенню олив та мастил як об'єкт автоматизації. Зокрема, проаналізовано основний апарат системи – адсорбер – як об'єкт автоматизації та існуючі системи керування ним.

2. Досліджена ХТС по очищенню олив та мастил з позиції документів сталого розвитку, проаналізовані шкідливі речовини, їх вплив на оточуюче середовище й етапи, на яких вони можуть утворюватися та/або виділятися в атмосферу у процесах очищення. Відповідно до цих особливостей визначені основні задачі керування зазначеним виробництвом у контексті сталого розвитку, сформовані критерії оптимального керування з урахуванням економічної та екологічної складових цієї концепції й запропонований алгоритм керування процесами очищення олив та мастил у контексті СР.

3. Розроблена структура БД документів сталого розвитку, до складу якої будуть входити нормативно-правові документи щодо якості вихідного продукту, вмісту шкідливих речовин у повітрі робочої зони тощо.

4. Проведений аналіз одного з основних апаратів – адсорбера – як об'єкта моделювання й створені моделі статичних та динамічних режимів, а також імітаційні.

5. Авторами запропоновано АСКТП адсорбційного очищення олив та мастил, яка дозволить отримати вихідний продукт належної якості з підвищенням економічної ефективності виробництва та забезпеченням стабілізації концентрацій шкідливих речовин в атмосфері на рівні, який запобігатиме небезпечному антропогенному їх впливу на кліматичну систему.

6. Розроблена САК процесом адсорбції, яка використовує класичний закон керування (ПІ) та враховує декілька показників якості оливи або мастила.

7. Розроблена САК процесом адсорбції на базі нечіткої логіки, яка використовує досвід фахівців в умовах керування двома величинами.

8. Розроблений стартап-проект, ідея якого полягає у створенні бази даних нормативних документів сталого розвитку, що стосуються технологічних процесів очищення олив та мастил.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тюріна Є. О. Задачі керування процесом очищення масел адсорбентами в режимі нормальної експлуатації [Текст] / Є. О. Тюріна, Л. Д. Ярошук // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами: Тези доповідей III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції; Київ, НУХТ, 23 листопада 2016 р. – К.: НУХТ, 2016. – 286 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез.
2. Згуровский М. З. Глобальное моделирование процессов устойчивого развития в контексте качества и безопасности жизни людей (2005-2007/2008 годы) / М. З. Згуровский, А. Д. Гвишиани. – К. : НТУУ «КПИ», 2008. – 140 с.
3. Згуровский М. З. Системный подход к оценке и управлению устойчивым развитием общества / М. З. Згуровский, Г. А. Статюха. // Систем. дослідж. та інформ. технології. – 2007. – № 3. – С. 7–27. – Бібліогр.: 29 назв. – Мова рос.
4. Костин А. И. Стратегия устойчивого развития цивилизации как концепт радикального общественного выбора [Электронный ресурс] : научная статья / А. И. Костин // Вестник Академии экономической безопасности МВД России. – 2015. – № 6 / 2015. – С. 21–26. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/strategiya-ustoychivogo-razvitiya-tsivilizatsii-kak-kontsept-radikalnogo-obschestvennogo-vybora>, свободный. – Загл. с экрана. – Язык рус.
5. Урсул А. Д. Будущее глобального мира: обеспечение безопасности через устойчивое развитие. [Электронный ресурс] : научная статья / А. Д. Урсул, Т. А. Урсул // Национальная безопасность. – 2015. – № 3 (20). – С. 23–36. – Режим доступа: http://www.nbpublish.com/library_get_pdf.php?id=18450, свободный. – Загл. с экрана. – Язык рус.
6. Стегней М. І. Екологічний компонент у системі сталого регіонального розвитку [Електронний ресурс] / М. І. Стегней, А.-М. І. Архангельська // Економіка та суспільство. – Мукачево, 2017. – № 9. – Режим доступа : http://www.economyandsociety.in.ua/journal/9_ukr/139.pdf, вільний. – Загол. з екрана. – Мова укр.

7. Щукина Л. В. Теоретические аспекты устойчивого развития региональных социально-экономических систем. [Электронный ресурс] : научная статья / Л. В. Щукина // Псковский регионологический журнал. – 2015. – № 21. – С. 38–50. – Режим доступа: <http://pskgu.ru/projects/pgu/storage/prj/prj-21/prj-21-03.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Язык рус.
8. Гречаник Н. Ю. Екологічний вимір сталого розвитку: маркетинговий підхід [Електронний ресурс] / Н. Ю. Гречаник // Сталый розвиток економіки. – Хмельницький, 2014. – № 1. – С. 94–101. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sre_2014_1_14, вільний. – Загол. з екрана. – Мова укр.
9. Пакулін С. Л. Управління сталим розвитком сучасного підприємства [Електронний ресурс] : наукова стаття / С. Л. Пакулін, А. А. Пакуліна // Траектория науки. – 2016. – № 3 (8). – 1,02 авт. арк. – Режим доступа: <http://pathofscience.org/index.php/ps/article/view/50>, вільний. – Загол. з екрана. – Мова укр.
10. Тибінь А. М. Удосконалення управління підприємством в контексті сталого розвитку / А. М. Тибінь, І. І. Смачило // Вісник Тернопільського національного економічного університету. – Тернопіль, 2009. – № 1. – С. 45 – 52.
11. Смачило І. І. Методи управління сталим розвитком підприємства / І. І. Смачило // Економіка розвитку. – 2012. – № 2. – С. 109–113.
12. Зачиняев Я. В. Критерии оценки воздействия отработанных масел на окружающую природную среду. Обзор технологий регенерации отработанных масел [Электронный ресурс] : / Я. В. Зачиняев, С. В. Иванюк, Т. С. Титова // Химические науки. – СПб, 2011. – № 3-1. – Режим доступа: <http://novainfo.ru/archive/3/kriterii-ocenki-vozdeystviya-otrabotannyh-masel-na-okruzhayushchuyu-prirodnuyu-sredu-obzor-tehnologiy-regeneracii-otrabotannyh>, свободный. – Загл. с экрана. – Язык рус.
13. Иванова Л. В. Технология переработки нефти и газа [Текст] : учеб. пособие для нефт. техникумов / Л. В. Иванова, И. И. Корнеев, В. Н. Юзбашев. – М. : Химия, 1966. – 419 с. : ил. – Библиогр.: с. 406–408. – 8500 экз.

14. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники [Текст] : монография / Н. В. Кельцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1984. – 592 с. : ил. – Библиогр.: с. 566–582. – Предм. указ.: с. 586–591. – 5000 экз.
15. Плановский А. Н. Процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебн. для техникумов / А. Н. Плановский, В. М. Рамм, С. З. Каган. – М.: Химия, 1967. – 848 с. : ил. – Библиогр.: с. 828–831. – Предм. указ.: с. 832–847. – 30000 экз.
16. Справочник химика [Текст] : в шести томах. Том 5: Сырье и продукты промышленности неорганических веществ. Процессы и аппараты. Коррозия. Гальванотехника. Химические источники тока : справочник / Бельченко Г. В., П. М. Вячеславов, М. А. Дасоян и др.; Гл. ред. Б. П. Никольский. – Л. : Химия, 1968. – 978 с. : ил. – Библиогр.: в конце разделов. – Предм. указ.: с. 963–972. – 23000 экз.
17. Пальтиель Л. Р. Коллоидная химия [Текст] : учеб. пособие / Пальтиель Л. Р., Г. С. Зенин, Н. Ф. Волинец // Химические науки. – СПб. : СЗТУ, 2004. – 68 с. – Библиогр.: с. 63. – Предм. указ.: с. 64. – 100 экз.
18. Ярошук Л. Д. Аналіз процесів адсорбції та способи керування ними [Текст] / Л. Д. Ярошук, Є. О. Тюріна // Матеріали Третьої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2016); Київ, НТУУ «КПІ», 20–21 квітня 2016 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 138 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – 150 пр.
19. Иванова Г. В. Автоматизация технологических процессов основных химических производств: Методическое пособие. Часть 1 [Текст] : Методическое пособие для курса лекций по учебной дисциплине «Автоматизация технологических процессов основных химических производств» являющейся дисциплиной специализации "Автоматизация технологических процессов химической промышленности" / Г. В. Иванова. – СПб, 2003. – 134 с. : ил. - Библиогр.: с. 133. – 300 экз.
20. Шувалов В. В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности [Текст] : учебн. для техникумов / В. В. Шувалов, Г. А.

- Огаджанов, В. А. Голубятников. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1991. – 480 с. : ил. – Библиогр.: с. 479. – 10400 экз. – ISBN 5-7245-0142-2.
21. Способ автоматического управления процессом адсорбционной очистки сточных вод [Текст] : а. с. 1443924 A1 SU : МКИ⁴ B01D 15/00, G05D 27/10 / А. А. Рульнов, А. В. Егоров (СССР) ; заявитель Всесоюзный заочный инженерно-строительный институт. – № 4258577/31-26 ; заявл. 17.04.1987 ; опубл. 15.12.1988, Бюл. № 46. – 3 с. : ил.
22. Спосіб автоматичного керування процесом очищення олив та мастил адсорбентами [Текст] : пат. 128760, Україна : МПК⁶ C10G 25/05, C10G 71/00, B01D 15/00, G01N 33/28 / Є. О. Тюріна, Л. Д. Ярошук ; заявник і патентовласник КПП ім. Ігоря Сікорського. – № U201802946 ; заявл. 23.03.2018 ; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19. – 3 с. : іл.
23. United Nations Framework Convention on Climate Change [Electronic resource] / Mode of access:
http://unfccc.int/essential_background/convention/items/6036.php, free. – Title from the screen. – English language.
24. Дячук О. А. Стан та перспективи виконання міжнародних зобов'язань України в рамках Кіотського протоколу [Електронний ресурс] / О. А. Дячук // Економіка і прогнозування. – 2013. – № 4. – С. 79–90. – Режим доступу: http://eip.org.ua/docs/EP_13_4_79_uk.pdf, вільний. – Загол. з екрана. – Мова укр.
25. Міжнародний досвід забезпечення екологічної безпеки: Курс лекцій. Для аспірантів денної форми навчання, галузь знань 10 «Природничі науки», спеціальність 101 «Екологія». Освітньо-кваліфікаційний рівень «доктор філософії». / Укладач: Г. В. Хабарова. – Х.: УКРНДІЕП, 2016. – 356 с.
26. Фюкс Р. Зеленая революция: Экономический рост без ущерба для экологии [Текст] / Р. Фюкс; пер. с нем. – М.: Альпина нон-фикшн, 2016. – 336 с. – 2000 экз. – ISBN 978-5-91671-459-3.
27. Жученко А. І. Основи проектування баз даних [Текст] : навч. посіб. / А. І. Жученко, Л. Д. Ярошук. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 158 с.

28. Тюріна Є. О. Задачі моделювання процесу адсорбції олив та мастил [Текст] / Є. О. Тюріна, Л. Д. Ярощук // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2019 : Матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студ. (АКІТ – 2019); Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 23–24 квітня 2019 р. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. – 145 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – 50 пр. – ISBN 978-966-622-941-3.
29. Башкиров Д. В. Математическое моделирование процесса адсорбции на примере осушки влажного воздуха неподвижным слоем силикагеля [Текст] : научная статья / Д. В. Башкиров, А. В. Клинов, А. И. Разинов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 19. – С. 365–368.
30. Малько О. Моделювання процесу адсорбції включень на поверхню розділу фаз [Електронний ресурс] : наукова стаття / О. Малько, А. Малько // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання. – 2018. – С. 358–361. – Режим доступу: <http://itcm.comp-sc.if.ua/2018/malko.pdf>, вільний. – Загол. з екрана. – Мова укр.
31. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 436 с. : іл. – Біблігр.: с. 427–428. – 200 пр. – ISBN 978-966-622-247-6.
32. Черных И. В. «Simulink: Инструмент моделирования динамических систем»: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php>, свободный. – Загл. с экрана. – Язык рус.
33. Барвинок В. А. Методы экспериментальных исследований технологических процессов в производстве летательных аппаратов [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. А. Барвинок, Ю. А. Вашуков. – Самара : Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2012. – Электрон. текстовые и граф. дан. (3,25 Мбайт). – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

- 34 Бойко Н. Г. Теория и методы инженерного эксперимента [Текст] : курс лекций / Н. Г. Бойко, Т. А. Устименко. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – 158 с. : ил. – Библиогр.: с. 154–155.
35. Руппель А-й. А. Идентификация объектов автоматизации технологических процессов в среде Matlab [Электронный ресурс] : методические указания к лабораторным работам / А-й. А. Руппель, А-р. А. Руппель. – Омск : ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)», Изд-во «СибАДИ». – 2017. – С. 62. – Режим доступа: <https://docplayeru/36456237-Identifikaciya-obektov-avtomatizacii-tehnologicheskikh-processov-v-srede-matlab.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Язык рус.
36. Бильфельд Н. В. Пассивная идентификация объектов управления средствами TOOLBOX IDENT [Электронный ресурс] : научная статья / Н. В. Бильфельд // Juvenis scientia. – 2016. – № 3. – С. 4–7. – Режим доступа: https://docs.wixstatic.com/ugd/1b55c8_acffc56071e74fbaa4f67ee440d7892d.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Язык рус.
37. Соснин О. М. Основы автоматизации технологических процессов [Текст] : учеб. пособ. / О. М. Соснин. – М.: МГОУ, 2006. – 246 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Таблиця Д1.1 – Основні параметри статичного режиму

№ п/п	Назва параметру	Позначення	Одиниці вимірювання	Числові значення
1	2	3	4	5

1	витрата суміші сировини й розчинника	F_m	кг суміші/с	8,32
2	витрата адсорбенту	F_a	кг адсорбенту/с	3,33
3	початкова концентрація ароматичних вуглеводнів у суміші сировини й розчинника	y_{ah0}	кг ah /кг суміші	26
4	кінцева концентрація ароматичних вуглеводнів у суміші сировини й розчинника	y_{ah1}	кг ah /кг суміші	12
5	початкова концентрація ароматичних вуглеводнів у адсорбенті	x_{ah0}	кг ah /кг адсорбенту	0,3
6	кінцева концентрація ароматичних вуглеводнів в адсорбенті	x_{ah1}	кг ah /кг адсорбенту	35,25
7	початкова концентрація сірки в суміші сировини й розчинника	y_{s0}	кг S /кг суміші	1,7
8	кінцева концентрація сірки в суміші сировини й розчинника	y_{s1}	кг S /кг суміші	0,2
9	початкова концентрація сірки в адсорбенті	x_{s0}	кг S /кг адсорбенту	0,1
10	кінцева концентрація сірки в адсорбенті	x_{s1}	кг S /кг адсорбенту	3,85
11	початкова концентрація смол у суміші сировини й розчинника	y_{r0}	кг r /кг суміші	6,1
12	кінцева концентрація смол у суміші сировини й розчинника	y_{r1}	кг r /кг суміші	2,8
13	початкова концентрація смол в адсорбенті	x_{r0}	кг r /кг адсорбенту	0,2
14	кінцева концентрація смол в адсорбенті	x_{r1}	кг r /кг адсорбенту	8,44
15	об'єм, який займає суміш в адсорбері	V_m	м ³	13
16	об'єм, який займає адсорбент в адсорбері	V_a	м ³	4,819

Продовження додатку 1

1	2	3	4	5
17	густина суміші	ρ_m	кг суміші/м ³	768
18	густина адсорбенту	ρ_a	кг адсорбенту/м ³	830

19	кількість ароматичних вуглеводнів, яка адсорбувалася в адсорбенті з суміші сировини й розчинника на одиницю рушійної сили в газовій фазі	$SK_{m,ah}$	кг суміші/с	16,338
20	кількість ароматичних вуглеводнів, яка прийшла з суміші сировини й розчинника в адсорбент на одиницю рушійної сили в рідині	$SK_{a,ah}$	кг адсорбенту/с	24,021
21	кількість сірки, яка адсорбувалася в адсорбенті з суміші сировини й розчинника на одиницю рушійної сили в газовій фазі	$SK_{m,S}$	кг суміші/с	16,245
22	кількість сірки, яка прийшла з суміші сировини й розчинника в адсорбент на одиницю рушійної сили в рідині	$SK_{a,S}$	кг адсорбенту/с	14,156
23	кількість смол, яка адсорбувалася в адсорбенті з суміші сировини й розчинника на одиницю рушійної сили в газовій фазі	$SK_{m,r}$	кг суміші/с	16,316
24	кількість смол, яка прийшла з суміші сировини й розчинника в адсорбент на одиницю рушійної сили в рідині	$SK_{a,r}$	кг адсорбенту/с	23,172
25	постійна для ароматичних вуглеводнів	m_{ah}	кг $ah \cdot$ кг суміші/кг $ah \cdot$ кг адсорбенту	1,47
26	постійна для сірки	m_S	кг $S \cdot$ кг суміші/кг $S \cdot$ кг адсорбенту	0,87

Закінчення додатку 1

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

27	постійна для смол	m_r	кг r ·кг суміші/кг r ·кг адсорбенту	1,42
28	рівноважна концентрація ароматичних вуглеводнів у адсорбенті на вході в адсорбер	$x_a(y_{ah0})$	кг ah /кг адсорбенту	17,687
29	рівноважна концентрація ароматичних вуглеводнів у суміші сировини й розчинника на вході в адсорбер	$y_m(x_{ah0})$	кг ah /кг суміші	0,441
30	рівноважна концентрація ароматичних вуглеводнів у адсорбенті на виході з адсорбера	$x_a(y_{ah1})$	кг ah /кг адсорбенту	8,162
31	рівноважна концентрація ароматичних вуглеводнів у суміші сировини й розчинника на виході з адсорбера	$y_m(x_{ah1})$	кг ah /кг суміші	51,818
32	рівноважна концентрація сірки в адсорбенті на вході в адсорбер	$x_a(y_{S0})$	кг S /кг адсорбенту	1,954
33	рівноважна концентрація сірки в суміші сировини й розчинника на вході в адсорбер	$y_m(x_{S0})$	кг S /кг суміші	0,087
34	рівноважна концентрація сірки в адсорбенті на виході з адсорбера	$x_a(y_{S1})$	кг S /кг адсорбенту	0,23
35	рівноважна концентрація сірки в суміші сировини й розчинника на виході з адсорбера	$y_m(x_{S1})$	кг r /кг суміші	3,349
36	рівноважна концентрація смол у адсорбенті на вході в адсорбер	$x_a(y_{r0})$	кг r /кг адсорбенту	4,297
37	рівноважна концентрація смол у суміші сировини й розчинника на вході в адсорбер	$y_m(x_{r0})$	кг r /кг суміші	0,284
38	рівноважна концентрація смол у адсорбенті на виході з адсорбера	$x_a(y_{r1})$	кг r /кг адсорбенту	1,972
39	рівноважна концентрація смол у суміші сировини й розчинника на виході з адсорбера	$y_m(x_{r1})$	кг ah /кг суміші	11,982

Додаток 2

Лінеаризація системи нелінійних диференційних рівнянь моделі динамічного режиму об'єкта керування

Для отримання рівнянь у відхиленнях (лінеаризованих) приймаємо:

$$y_{ah1}(t) = y_{ah1,0} + \Delta y_{ah1}(t);$$

$$y_{s1}(t) = y_{s1,0} + \Delta y_{s1}(t);$$

$$y_{r1}(t) = y_{r1,0} + \Delta y_{r1}(t);$$

$$F_a(t) = F_{a,0} + \Delta F_a(t);$$

$$x_{ah0}(t) = x_{ah0,0} + \Delta x_{ah0}(t);$$

$$x_{s0}(t) = x_{s0,0} + \Delta x_{s0}(t);$$

$$x_{r0}(t) = x_{r0,0} + \Delta x_{r0}(t);$$

$$y_{ah0}(t) = y_{ah0,0} + \Delta y_{ah0}(t);$$

$$y_{s0}(t) = y_{s0,0} + \Delta y_{s0}(t);$$

$$y_{r0}(t) = y_{r0,0} + \Delta y_{r0}(t);$$

$$x_{ah1}(t) = x_{ah1,0} + \Delta x_{ah1}(t);$$

$$x_{s1}(t) = x_{s1,0} + \Delta x_{s1}(t);$$

$$x_{r1}(t) = x_{r1,0} + \Delta x_{r1}(t).$$

В результаті отримаємо систему рівнянь (Д2.1):

$$\left\{ \begin{aligned}
& -\frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{ah1}}{dt} - \left(F_m + \frac{SK_{m,ah}}{2} \right) \Delta y_{ah1} = -\frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{ah0}}{dt} + (F_m - \\
& -\frac{SK_{m,ah}}{2}) \Delta y_{ah0} - \frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{ah1}}{dt} + \frac{SK_{m,ah} m_{ah}}{2} \Delta x_{ah1} - \frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{ah0}}{dt} + \\
& + \frac{SK_{m,ah} m_{ah}}{2} \Delta x_{ah0}; \\
& \frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{ah1}}{dt} + \left(F_a + \frac{SK_{a,ah}}{2} \right) \Delta x_{ah1} = (x_{ah0} - x_{ah1}) \Delta F_a - \\
& -\frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{ah1}}{dt} + \frac{SK_{a,ah}}{2m_{ah}} \Delta y_{ah1} - \frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{ah0}}{dt} + \frac{SK_{a,ah}}{2m_{ah}} \Delta y_{ah0} - \\
& -\frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{ah0}}{dt} + \left(F_a - \frac{SK_{a,ah}}{2} \right) \Delta x_{ah0}; \\
& -\frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{s1}}{dt} - \left(F_m + \frac{SK_{m,s}}{2} \right) \Delta y_{s1} = -\frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{s0}}{dt} + (F_m - \\
& -\frac{SK_{m,s}}{2}) \Delta y_{s0} - \frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{s1}}{dt} + \frac{SK_{m,s} m_s}{2} \Delta x_{s1} - \frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{s0}}{dt} + \\
& + \frac{SK_{m,s} m_s}{2} \Delta x_{s0}; \\
& \frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{s1}}{dt} + \left(F_a + \frac{SK_{a,s}}{2} \right) \Delta x_{s1} = (x_{s0} - x_{s1}) \Delta F_a - \\
& -\frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{s1}}{dt} + \frac{SK_{a,s}}{2m_s} \Delta y_{s1} - \frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{s0}}{dt} + \frac{SK_{a,s}}{2m_s} \Delta y_{s0} - \\
& -\frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{s0}}{dt} + \left(F_a - \frac{SK_{a,s}}{2} \right) \Delta x_{s0}; \\
& -\frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{r1}}{dt} - \left(F_m + \frac{SK_{m,r}}{2} \right) \Delta y_{r1} = -\frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{r0}}{dt} + (F_m - \\
& -\frac{SK_{m,r}}{2}) \Delta y_{r0} - \frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{r1}}{dt} + \frac{SK_{m,r} m_r}{2} \Delta x_{r1} - \frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{r0}}{dt} + \\
& + \frac{SK_{m,r} m_r}{2} \Delta x_{r0}; \\
& \frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{r1}}{dt} + \left(F_a + \frac{SK_{a,r}}{2} \right) \Delta x_{r1} = (x_{r0} - x_{r1}) \Delta F_a - \\
& -\frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{r1}}{dt} + \frac{SK_{a,r}}{2m_r} \Delta y_{r1} - \frac{V_m \rho_m}{2} \frac{d\Delta y_{r0}}{dt} + \frac{SK_{a,r}}{2m_r} \Delta y_{r0} - \\
& -\frac{V_a \rho_a}{2} \frac{d\Delta x_{r0}}{dt} + \left(F_a - \frac{SK_{a,r}}{2} \right) \Delta x_{r0}.
\end{aligned} \right. \quad (D2.1)$$

Перевірка розмірностей коефіцієнтів системи рівнянь (D2.1).

Для суміші сировини й розчинника із вмістом ароматичних вуглеводнів (розмірність коефіцієнтів відповідних рівнянь із вмістом сірки та смол аналогічні):

$$\begin{aligned}
 & -\frac{[M^3]}{[c]} \left[\frac{кг\ c}{M^3} \right] \left[\frac{кг\ ah}{кг\ c} \right] - \left(\left[\frac{кг\ c}{c} \right] + \left[\frac{кг\ c}{c} \right] \right) \left[\frac{кг\ ah}{кг\ c} \right] = -\frac{[M^3]}{[c]} \left[\frac{кг\ ah}{кг\ c} \right] + \left(\left[\frac{кг\ c}{c} \right] - \right. \\
 & \left. - \left[\frac{кг\ c}{c} \right] \right) \left[\frac{кг\ ah}{кг\ c} \right] - \frac{[M^3]}{[c]} \left[\frac{кг\ ah}{кг\ a} \right] \left[\frac{кг\ ah}{кг\ a} \right] + \left[\frac{кг\ a}{c} \right] \left[\frac{кг\ ah \cdot кг\ c}{кг\ ah \cdot кг\ a} \right] \left[\frac{кг\ ah}{кг\ c} \right] - \\
 & - \frac{[M^3]}{[c]} \left[\frac{кг\ a}{M^3} \right] \left[\frac{кг\ ah}{кг\ a} \right] + \left[\frac{кг\ c}{c} \right] \left[\frac{кг\ ah \cdot кг\ c}{кг\ ah \cdot кг\ a} \right] \left[\frac{кг\ ah}{кг\ a} \right], \\
 & \left[\frac{кг\ ah}{c} \right] = \left[\frac{кг\ ah}{c} \right].
 \end{aligned}$$

Для адсорбенту із вмістом ароматичних вуглеводнів (розмірність коефіцієнтів відповідних рівнянь із вмістом сірки та смол аналогічні):

$$\begin{aligned}
 & \frac{[M^3]}{[c]} \left[\frac{кг\ a}{M^3} \right] \left[\frac{кг\ ah}{кг\ a} \right] + \left(\left[\frac{кг\ a}{c} \right] + \left[\frac{кг\ a}{c} \right] \right) \left[\frac{кг\ ah}{кг\ a} \right] = \left(\left[\frac{кг\ ah}{кг\ a} \right] - \left[\frac{кг\ ah}{кг\ a} \right] \right) \left[\frac{кг\ a}{c} \right] - \\
 & - \frac{[M^3]}{[c]} \left[\frac{кг\ c}{M^3} \right] \left[\frac{кг\ ah}{кг\ c} \right] + \left[\frac{кг\ a}{c} \right] \left[\frac{кг\ ah \cdot кг\ c}{кг\ ah \cdot кг\ a} \right] \left[\frac{кг\ ah}{кг\ c} \right] - \frac{[M^3]}{[c]} \left[\frac{кг\ c}{M^3} \right] \left[\frac{кг\ ah}{кг\ c} \right] + \\
 & + \left[\frac{кг\ a}{c} \right] \left[\frac{кг\ ah \cdot кг\ c}{кг\ ah \cdot кг\ a} \right] \left[\frac{кг\ ah}{кг\ c} \right] - \frac{[M^3]}{[c]} \left[\frac{кг\ a}{M^3} \right] \left[\frac{кг\ ah}{кг\ a} \right] + \left(\left[\frac{кг\ a}{c} \right] - \left[\frac{кг\ a}{c} \right] \right) \left[\frac{кг\ ah}{кг\ a} \right], \\
 & \left[\frac{кг\ ah}{c} \right] = \left[\frac{кг\ ah}{c} \right].
 \end{aligned}$$

Розмірності сходяться, отже попередні розрахунки виконано вірно.

Приведемо систему рівнянь (Д2.1) до безрозмірного виду визначальних величин і поділимо перше, третє і п'яте рівняння відповідно на $y_{ah1,0}$, $y_{S1,0}$, $y_{r1,0}$, а друге, четверте й шосте – відповідно на $x_{ah1,0}$, $x_{S1,0}$, $x_{r1,0}$, попередньо ввівши позначення:

$$\begin{aligned}
 \Delta y_{ah1} &= \Delta y_{ah1}^d y_{ah1,0}; \Delta y_{S1} = \Delta y_{S1}^d y_{S1,0}; \Delta y_{r1} = \Delta y_{r1}^d y_{r1,0}; \\
 \Delta F_a &= \Delta F_a^d F_{a,0}; \\
 \Delta x_{ah0} &= \Delta x_{ah0}^d x_{ah0,0}; \Delta x_{S0} = \Delta x_{S0}^d x_{S0,0}; \Delta x_{r0} = \Delta x_{r0}^d x_{r0,0}; \\
 \Delta y_{ah0} &= \Delta y_{ah0}^d y_{ah0,0}; \Delta y_{S0} = \Delta y_{S0}^d y_{S0,0}; \Delta y_{r0} = \Delta y_{r0}^d y_{r0,0}; \\
 \Delta x_{ah1} &= \Delta x_{ah1}^d x_{ah1,0}; \Delta x_{S1} = \Delta x_{S1}^d x_{S1,0}; \Delta x_{r1} = \Delta x_{r1}^d x_{r1,0}.
 \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{aligned}
& T_{y_{ah1}} \frac{d\Delta y_{ah1}^d}{dt} + \Delta y_{ah1}^d = \frac{T_{y_{ah0}}}{y_{ah1,0}} \frac{d\Delta y_{ah0}^d y_{ah0,0}}{dt} + \frac{K_{y_{ah0}y_{ah1}} y_{ah0,0}}{y_{ah1,0}} \Delta y_{ah0}^d + \\
& + \frac{T_{x_{ah1m}}}{y_{ah1,0}} \frac{d\Delta x_{ah1}^d x_{ah1,0}}{dt} + \frac{K_{x_{ah1}y_{ah1}} x_{ah1,0}}{y_{ah1,0}} \Delta x_{ah1}^d + \frac{T_{x_{ah0m}}}{y_{ah1,0}} \frac{d\Delta x_{ah0}^d x_{ah0,0}}{dt} + \\
& + \frac{K_{x_{ah0}y_{ah1}} x_{ah0,0}}{y_{ah1,0}} \Delta x_{ah0}^d; \\
& T_{x_{ah1}} \frac{d\Delta x_{ah1}^d}{dt} + \Delta x_{ah1}^d = \frac{K_{F_a x_1}}{x_{ah1,0}} \Delta F_a^d + \frac{T_{y_{ah1a}}}{x_{ah1,0}} \frac{d\Delta y_{ah1}^d}{dt} + \frac{K_{y_{ah1}x_{ah1}} y_{ah1,0}}{x_{ah1,0}} \times \\
& \times \Delta y_{ah1}^d + \frac{T_{y_{ah0a}}}{x_{ah1,0}} \frac{d\Delta y_{ah0}^d}{dt} + \frac{K_{y_{ah0}x_{ah1}} y_{ah0,0}}{x_{ah1,0}} \Delta y_{ah0}^d + T_{x_{ah0a}} \frac{d\Delta x_{ah0}^d}{dt} + \\
& + \frac{K_{x_{ah0}x_{ah1}} x_{ah0,0}}{x_{ah1,0}} \Delta x_{ah0}^d; \\
& T_{y_{s1}} \frac{d\Delta y_{s1}^d}{dt} + \Delta y_{s1}^d = \frac{T_{y_{s0}}}{y_{s1,0}} \frac{d\Delta y_{s0}^d y_{s0,0}}{dt} + \frac{K_{y_{s0}y_{s1}} y_{s0,0}}{y_{s1,0}} \Delta y_{s0}^d + \\
& + \frac{T_{x_{s1m}}}{y_{s1,0}} \frac{d\Delta x_{s1}^d x_{s1,0}}{dt} + \frac{K_{x_{s1}y_{s1}} x_{s1,0}}{y_{s1,0}} \Delta x_{s1}^d + \frac{T_{x_{s0m}}}{y_{s1,0}} \frac{d\Delta x_{s0}^d x_{s0,0}}{dt} + \\
& + \frac{K_{x_{s0}y_{s1}} x_{s0,0}}{y_{s1,0}} \Delta x_{s0}^d; \\
& T_{x_{s1}} \frac{d\Delta x_{s1}^d}{dt} + \Delta x_{s1}^d = \frac{K_{F_a x_{s1}}}{x_{s1,0}} \Delta F_a^d + \frac{T_{y_{s1a}}}{x_{s1,0}} \frac{d\Delta y_{s1}^d}{dt} + \frac{K_{y_{s1}x_{s1}} y_{s1,0}}{x_{s1,0}} \Delta y_{s1}^d + \\
& + \frac{T_{y_{s0a}}}{x_{s1,0}} \frac{d\Delta y_{s0}^d}{dt} + \frac{K_{y_{s0}x_{s1}} y_{s0,0}}{x_{s1,0}} \Delta y_{s0}^d + T_{x_{s0a}} \frac{d\Delta x_{s0}^d}{dt} + \frac{K_{x_{s0}x_{s1}} x_{s0,0}}{x_{s1,0}} \Delta x_{s0}^d; \\
& T_{y_{r1}} \frac{d\Delta y_{r1}^d}{dt} + \Delta y_{r1}^d = \frac{T_{y_{r0}}}{y_{r1,0}} \frac{d\Delta y_{r0}^d y_{r0,0}}{dt} + \frac{K_{y_{r0}y_{r1}} y_{r0,0}}{y_{r1,0}} \Delta y_{r0}^d + \\
& + \frac{T_{x_{r1m}}}{y_{r1,0}} \frac{d\Delta x_{r1}^d x_{r1,0}}{dt} + \frac{K_{x_{r1}y_{r1}} x_{r1,0}}{y_{r1,0}} \Delta x_{r1}^d + \frac{T_{x_{r0m}}}{y_{r1,0}} \frac{d\Delta x_{r0}^d x_{r0,0}}{dt} + \\
& + \frac{K_{x_{r0}y_{r1}} x_{r0,0}}{y_{r1,0}} \Delta x_{r0}^d; \\
& T_{x_{r1}} \frac{d\Delta x_{r1}^d}{dt} + \Delta x_{r1}^d = \frac{K_{F_a x_{r1}}}{x_{r1,0}} \Delta F_a^d + \frac{T_{y_{r1a}}}{x_{r1,0}} \frac{d\Delta y_{r1}^d}{dt} + \frac{K_{y_{r1}x_{r1}} y_{r1,0}}{x_{r1,0}} \Delta y_{r1}^d + \\
& + \frac{T_{y_{r0a}}}{x_{r1,0}} \frac{d\Delta y_{r0}^d}{dt} + \frac{K_{y_{r0}x_{r1}} y_{r0,0}}{x_{r1,0}} \Delta y_{r0}^d + T_{x_{r0a}} \frac{d\Delta x_{r0}^d}{dt} + \frac{K_{x_{r0}x_{r1}} x_{r0,0}}{x_{r1,0}} \Delta x_{r0}^d,
\end{aligned} \right. \quad (D2.2)$$

де $T_{y_{ah1}} = \frac{V_m \rho_m}{2F_m + SK_{m,ah}}; K_{y_{ah0}y_{ah1}} = \frac{2F_m - SK_{m,ah}}{2F_m + SK_{m,ah}}; T_{y_{ah0}} = -\frac{V_m \rho_m}{2F_m + SK_{m,ah}};$

$$\begin{aligned}
T_{x_{ah1m}} &= T_{x_{ah0m}} = -\frac{V_a \rho_a}{2F_m + SK_{m,ah}}; K_{x_{ah1}y_{ah1}} = K_{x_{ah0}y_{ah1}} = \frac{SK_{m,ah}m_{ah}}{2F_m + SK_{m,ah}}; \\
T_{x_{ah1}} &= \frac{V_a \rho_a}{2F_a + SK_{a,ah}}; K_{F_a x_{ah1}} = \frac{2(x_{ah0} - x_{ah1})}{2F_m + SK_{m,ah}}; T_{y_{ah1a}} = -\frac{V_m \rho_m}{2F_a + SK_{a,ah}}; \\
K_{y_{ah1}x_{ah1}} &= \frac{SK_{a,ah}}{m_{ah}(2F_m + SK_{m,ah})}; T_{y_{ah0a}} = -\frac{V_m \rho_m}{2F_a + SK_{a,ah}}; \\
K_{y_{ah0}x_{ah1}} &= \frac{SK_{a,ah}}{m_{ah}(2F_m + SK_{m,ah})}; T_{x_{ah0a}} = -\frac{V_a \rho_a}{2F_a + SK_{a,ah}}; \\
K_{x_{ah0}x_{ah1}} &= \frac{2F_a - SK_{a,ah}}{2F_a + SK_{a,ah}}; T_{y_{s1}} = \frac{V_m \rho_m}{2F_m + SK_{m,s}}; K_{y_{s0}y_{s1}} = \frac{2F_m - SK_{m,s}}{2F_m + SK_{m,s}}; \\
T_{y_{s0}} &= -\frac{V_m \rho_m}{2F_m + SK_{m,s}}; T_{x_{s1m}} = T_{x_{s0m}} = -\frac{V_a \rho_a}{2F_m + SK_{m,s}}; \\
K_{x_{s1}y_{s1}} &= K_{x_{s0}y_{s1}} = \frac{SK_{m,s}m_s}{2F_m + SK_{m,s}}; T_{x_{s1}} = \frac{V_a \rho_a}{2F_a + SK_{a,s}}; \\
K_{F_a x_{s1}} &= \frac{2(x_{s0} - x_{s1})}{2F_m + SK_{m,s}}; T_{y_{s1a}} = -\frac{V_m \rho_m}{2F_a + SK_{a,s}}; K_{y_{s1}x_{s1}} = \frac{SK_{a,s}}{m_s(2F_m + SK_{m,s})}; \\
T_{y_{s0a}} &= -\frac{V_m \rho_m}{2F_a + SK_{a,s}}; K_{y_{s0}x_{s1}} = \frac{SK_{a,s}}{m_s(2F_m + SK_{m,s})}; T_{x_{s0a}} = -\frac{V_a \rho_a}{2F_a + SK_{a,s}}; \\
K_{x_{s0}x_{s1}} &= \frac{2F_a - SK_{a,s}}{2F_a + SK_{a,s}}; T_{y_{r1}} = \frac{V_m \rho_m}{2F_m + SK_{m,r}}; K_{y_{r0}y_{r1}} = \frac{2F_m - SK_{m,r}}{2F_m + SK_{m,r}}; \\
T_{y_{r0}} &= -\frac{V_m \rho_m}{2F_m + SK_{m,r}}; T_{x_{r1m}} = T_{x_{r0m}} = -\frac{V_a \rho_a}{2F_m + SK_{m,r}}; \\
K_{x_{r1}y_{r1}} &= K_{x_{r0}y_{r1}} = \frac{SK_{m,r}m_r}{2F_m + SK_{m,r}}; T_{x_{r1}} = \frac{V_a \rho_a}{2F_a + SK_{a,r}}; \\
K_{F_a x_{r1}} &= \frac{2(x_{r0} - x_{r1})}{2F_m + SK_{m,r}}; T_{y_{r1a}} = -\frac{V_m \rho_m}{2F_a + SK_{a,r}}; K_{y_{r1}x_{r1}} = \frac{SK_{a,r}}{m_r(2F_m + SK_{m,r})}; \\
T_{y_{r0a}} &= -\frac{V_m \rho_m}{2F_a + SK_{a,r}}; K_{y_{r0}x_{r1}} = \frac{SK_{a,r}}{m_r(2F_m + SK_{m,r})}; T_{x_{r0a}} = -\frac{V_a \rho_a}{2F_a + SK_{a,r}}; \\
K_{x_{r0}x_{r1}} &= \frac{2F_a - SK_{a,r}}{2F_a + SK_{a,r}}.
\end{aligned}$$

Запишемо систему рівнянь (3.15) у канонічній формі:

$$\left\{ \begin{aligned}
& T_{y_{ah1}} \frac{d\Delta y_{ah1}}{dt} + \Delta y_{ah1} = T_{y_{ah0}} \frac{d\Delta y_{ah0}}{dt} + K_{y_{ah0}y_{ah1}} \Delta y_{ah0} + T_{x_{ah1m}} \times \\
& \quad \times \frac{d\Delta x_{ah1}}{dt} + K_{x_{ah1}y_{ah1}} \Delta x_{ah1} + T_{x_{ah0m}} \frac{d\Delta x_{ah0}}{dt} + K_{x_{ah0}y_{ah0}} \Delta x_{ah0}; \\
& T_{x_{ah1}} \frac{d\Delta x_{ah1}}{dt} + \Delta x_{ah1} = K_{F_a x_{ah1}} \Delta F_a + T_{y_{ah1a}} \frac{d\Delta y_{ah1}}{dt} + K_{y_{ah1}x_{ah1}} \Delta y_{ah1} + \\
& \quad + T_{y_{ah0a}} \frac{d\Delta y_{ah0}}{dt} + K_{y_{ah0}x_{ah1}} \Delta y_{ah0} + T_{x_{ah0a}} \frac{d\Delta x_{ah0}}{dt} + K_{x_{ah0}x_{ah1}} \Delta x_{ah0}; \\
& T_{y_{s1}} \frac{d\Delta y_{s1}}{dt} + \Delta y_{s1} = -T_{y_{s0}} \frac{d\Delta y_{s0}}{dt} + K_{y_{s0}y_{s1}} \Delta y_{s0} + T_{x_{s1m}} \frac{d\Delta x_{s1}}{dt} + \\
& \quad + K_{x_{s1}y_{s1}} \Delta x_{s1} + T_{x_{s0m}} \frac{d\Delta x_{s0}}{dt} + K_{x_{s0}y_{s1}} \Delta x_{s0}; \\
& T_{x_{s1}} \frac{d\Delta x_{s1}}{dt} + \Delta x_{s1} = K_{F_a x_{s1}} \Delta F_a + T_{y_{s1a}} \frac{d\Delta y_{s1}}{dt} + K_{y_{s1}x_{s1}} \Delta y_{s1} + \\
& \quad + T_{y_{s0a}} \frac{d\Delta y_{s0}}{dt} + K_{y_{s0}x_{s1}} \Delta y_{s0} + T_{x_{s0a}} \frac{d\Delta x_{s0}}{dt} + K_{x_{s0}x_{s1}} \Delta x_{s0}; \\
& T_{y_{r1}} \frac{d\Delta y_{r1}}{dt} + \Delta y_{r1} = -T_{y_{r0}} \frac{d\Delta y_{r0}}{dt} + K_{y_{r0}y_{r1}} \Delta y_{r0} + T_{x_{r1m}} \frac{d\Delta x_{r1}}{dt} + \\
& \quad + K_{x_{r1}y_{r1}} \Delta x_{r1} + T_{x_{r0m}} \frac{d\Delta x_{r0}}{dt} + K_{x_{r0}y_{r1}} \Delta x_{r0}; \\
& T_{x_{r1}} \frac{d\Delta x_{r1}}{dt} + \Delta x_{r1} = K_{F_a x_{r1}} \Delta F_a + T_{y_{r1a}} \frac{d\Delta y_{r1}}{dt} + K_{y_{r1}x_{r1}} \Delta y_{r1} + \\
& \quad + T_{y_{r0a}} \frac{d\Delta y_{r0}}{dt} + K_{y_{r0}x_{r1}} \Delta y_{r0} + T_{x_{r0a}} \frac{d\Delta x_{r0}}{dt} + K_{x_{r0}x_{r1}} \Delta x_{r0}.
\end{aligned} \right. \quad (D2.3)$$

Переписавши систему рівнянь (3.15) з відповідними коефіцієнтами у формі Коші, отримаємо (D2.4):

$$\left\{ \begin{aligned}
& \frac{d\Delta y_{ah1}}{dt} = -\frac{d\Delta y_{ah0}}{dt} + \frac{2F_m - SK_{m,ah}}{V_m \rho_m} \Delta y_{ah0} - \frac{V_a \rho_a}{V_m \rho_m} \frac{d\Delta x_{ah1}}{dt} + \frac{SK_{m,ah} m_{ah}}{V_m \rho_m} \times \\
& \times \Delta x_{ah1} - \frac{V_a \rho_a}{V_m \rho_m} \frac{d\Delta x_{ah0}}{dt} + \frac{SK_{m,ah} m_{ah}}{V_m \rho_m} \Delta x_{ah0} - \frac{2F_m + SK_{m,ah}}{V_m \rho_m} \Delta y_{ah1}; \\
& \frac{d\Delta x_{ah1}}{dt} = \frac{2(x_{ah0} - x_{ah1})}{V_a \rho_a} \Delta F_a - \frac{V_m \rho_m}{V_a \rho_a} \frac{d\Delta y_{ah1}}{dt} + \frac{SK_{a,ah}}{m_{ah} V_a \rho_a} \Delta y_{ah1} - \\
& - \frac{V_m \rho_m}{V_a \rho_a} \frac{d\Delta y_{ah0}}{dt} + \frac{SK_{a,ah}}{m_{ah} V_a \rho_a} \Delta y_{ah0} - \frac{d\Delta x_{ah0}}{dt} + \frac{F_a - SK_{a,ah}}{V_a \rho_a} \Delta x_{ah0} - \\
& - \frac{2F_m + SK_{m,ah}}{V_a \rho_a} \Delta x_{ah1}; \\
& \frac{d\Delta y_{s1}}{dt} = -\frac{d\Delta y_{s0}}{dt} + \frac{2F_m - SK_{m,s}}{V_m \rho_m} \Delta y_{s0} - \frac{V_a \rho_a}{V_m \rho_m} \frac{d\Delta x_{s1}}{dt} + \frac{SK_{m,s} m_s}{V_m \rho_m} \times \\
& \times \Delta x_{s1} - \frac{V_a \rho_a}{V_m \rho_m} \frac{d\Delta x_{s0}}{dt} + \frac{SK_{m,s} m_s}{V_m \rho_m} \Delta x_{s0} - \frac{2F_m + SK_{m,s}}{V_m \rho_m} \Delta y_{s1}; \\
& \frac{d\Delta x_{s1}}{dt} = \frac{2(x_{s0} - x_{s1})}{V_a \rho_a} \Delta F_a - \frac{V_m \rho_m}{V_a \rho_a} \frac{d\Delta y_{s1}}{dt} + \frac{SK_{a,s}}{m_s V_a \rho_a} \Delta y_{s1} - \\
& - \frac{V_m \rho_m}{V_a \rho_a} \frac{d\Delta y_{s0}}{dt} + \frac{SK_{a,s}}{m_s V_a \rho_a} \Delta y_{s0} - \frac{d\Delta x_{s0}}{dt} + \frac{F_a - SK_{a,s}}{V_a \rho_a} \Delta x_{s0} - \\
& - \frac{2F_m + SK_{m,s}}{V_a \rho_a} \Delta x_{s1}; \\
& \frac{d\Delta y_{r1}}{dt} = -\frac{d\Delta y_{r0}}{dt} + \frac{2F_m - SK_{m,r}}{V_m \rho_m} \Delta y_{r0} - \frac{V_a \rho_a}{V_m \rho_m} \frac{d\Delta x_{r1}}{dt} + \frac{SK_{m,r} m_r}{V_m \rho_m} \times \\
& \times \Delta x_{r1} - \frac{V_a \rho_a}{V_m \rho_m} \frac{d\Delta x_{r0}}{dt} + \frac{SK_{m,r} m_r}{V_m \rho_m} \Delta x_{r0} - \frac{2F_m + SK_{m,r}}{V_m \rho_m} \Delta y_{r1}; \\
& \frac{d\Delta x_{r1}}{dt} = \frac{2(x_{r0} - x_{r1})}{V_a \rho_a} \Delta F_a - \frac{V_m \rho_m}{V_a \rho_a} \frac{d\Delta y_{r1}}{dt} + \frac{SK_{a,r}}{m_r V_a \rho_a} \Delta y_{ah1} - \\
& - \frac{V_m \rho_m}{V_a \rho_a} \frac{d\Delta y_{r0}}{dt} + \frac{SK_{a,r}}{m_r V_a \rho_a} \Delta y_{r0} - \frac{d\Delta x_{r0}}{dt} + \frac{F_a - SK_{a,r}}{V_a \rho_a} \Delta x_{r0} - \\
& - \frac{2F_m + SK_{m,r}}{V_a \rho_a} \Delta x_{r1}.
\end{aligned} \right. \quad (D2.4)$$

Лістинг програми, що реалізує побудову моделей динамічного режиму за каналами керування

Значення статичного режиму

$$\begin{aligned}
 F_m &:= \frac{29952}{3600} & F_a &:= \frac{12000}{3600} \\
 y_{ah0} &:= 26 & x_{ah0} &:= 0.3 & y_{S0} &:= 1.7 & x_{S0} &:= 0.1 & y_{r0} &:= 6.1 & x_{r0} &:= 0.2 \\
 y_{ah1} &:= 12 & x_{ah1} &:= 35.25 & y_{S1} &:= 0.2 & x_{S1} &:= 3.85 & y_{r1} &:= 2.8 & x_{r1} &:= 8.44 \\
 m_{ah} &:= 1.47 & m_S &:= 0.87 & m_r &:= 1.41962 \\
 x_{yah0} &:= \frac{y_{ah0}}{m_{ah}} = 17.687 & y_{xah0} &:= m_{ah} \cdot x_{ah0} = 0.441 & x_{yah1} &:= \frac{y_{ah1}}{m_{ah}} = 8.163 \\
 x_{yS0} &:= \frac{y_{S0}}{m_S} = 1.954 & y_{xS0} &:= m_S \cdot x_{S0} = 0.087 & x_{yS1} &:= \frac{y_{S1}}{m_S} = 0.23 \\
 x_{yr0} &:= \frac{y_{r0}}{m_r} = 4.297 & y_{xr0} &:= m_r \cdot x_{r0} = 0.284 & x_{yr1} &:= \frac{y_{r1}}{m_r} = 1.972 \\
 y_{xah1} &:= m_{ah} \cdot x_{ah1} = 51.818 & y_{xS1} &:= m_S \cdot x_{S1} = 3.349 & y_{xr1} &:= m_r \cdot x_{r1} = 11.982 \\
 SK_{mah} &:= \frac{2(F_m \cdot y_{ah0} - F_m \cdot y_{ah1})}{(y_{ah0} - y_{xah1}) + (y_{ah1} - y_{xah0})} & SK_{aah} &:= \frac{2(F_a \cdot x_{ah1} - F_a \cdot x_{ah0})}{(x_{yah1} - x_{ah0}) + (x_{yah0} - x_{ah1})} \\
 SK_{mS} &:= \frac{2(F_m \cdot y_{S0} - F_m \cdot y_{S1})}{(y_{S0} - y_{xS1}) + (y_{S1} - y_{xS0})} & SK_{aS} &:= \frac{2(F_a \cdot x_{S1} - F_a \cdot x_{S0})}{(x_{yS1} - x_{S0}) + (x_{yS0} - x_{S1})} \\
 SK_{mr} &:= \frac{2(F_m \cdot y_{r0} - F_m \cdot y_{r1})}{(y_{r0} - y_{xr1}) + (y_{r1} - y_{xr0})} & SK_{ar} &:= \frac{2(F_a \cdot x_{r1} - F_a \cdot x_{r0})}{(x_{yr1} - x_{r0}) + (x_{yr0} - x_{r1})} \\
 V_m &:= 13 & V_a &:= 4.819 & rom &:= 768 & roa &:= 830
 \end{aligned}$$

Параметри для визначення значень коефіцієнтів передавальної функції за каналом «витрата адсорбенту \rightarrow вміст ароматичних вуглеводнів на виході з адсорбера» ($F_a \rightarrow y_{ah1}$)

$$\begin{aligned}
 T_{yah1} &:= \frac{V_m \cdot rom}{2 \cdot F_m + SK_{mah}} & T_{yah0} &:= -\frac{V_m \cdot rom}{2 \cdot F_m + SK_{mah}} \\
 K_{yah0yah1} &:= \frac{2 \cdot F_m - SK_{mah}}{2 \cdot F_m + SK_{mah}} & K_{xah1yah1} &:= \frac{SK_{mah} \cdot m_{ah}}{2 \cdot F_m + SK_{mah}} \\
 T_{xah1} &:= \frac{V_a \cdot roa}{2 \cdot F_a + SK_{aah}} & K_{Faxah1} &:= \frac{2 \cdot (x_{ah0} - x_{ah1})}{2 \cdot F_a + SK_{aah}} \\
 K_{yah1xah1} &:= \frac{SK_{aah}}{m_{ah} \cdot (2 \cdot F_a + SK_{aah})} & K_{yah0xah1} &:= \frac{SK_{aah}}{m_{ah} \cdot (2 \cdot F_a + SK_{aah})} \\
 T_{xah1m} &:= -\frac{V_a \cdot roa}{2 \cdot F_m + SK_{mah}} & T_{yah1a} &:= -\frac{V_m \cdot rom}{2 \cdot F_a + SK_{aah}}
 \end{aligned}$$

Параметри для визначення значень коефіцієнтів передавальної функції за каналом «витрата адсорбенту \rightarrow вміст сірки на виході з адсорбера» ($F_a \rightarrow y_{S1}$)

$$TyS1 := \frac{Vm \cdot rom}{2 \cdot Fm + SKmS}$$

$$KyS0yS1 := \frac{2 \cdot Fm - SKmS}{2 \cdot Fm + SKmS}$$

$$TxS1 := \frac{Va \cdot roa}{2 \cdot Fa + SKaS}$$

$$KyS1xS1 := \frac{SKaS}{mS \cdot (2 \cdot Fa + SKaS)}$$

$$TyS0 := -\frac{Vm \cdot rom}{2 \cdot Fm + SKmS}$$

$$KxS1yS1 := \frac{SKmS \cdot mS}{2 \cdot Fm + SKmS}$$

$$KFaxS1 := \frac{2 \cdot (xS0 - xS1)}{2 \cdot Fa + SKaS}$$

$$KyS0xS1 := \frac{SKaS}{mS \cdot (2 \cdot Fa + SKaS)}$$

Параметри для визначення значень коефіцієнтів передавальної функції за каналом «витрата адсорбенту \rightarrow вміст смол на виході з адсорбера» ($F_a \rightarrow y_{r1}$)

$$Tyr1 := \frac{Vm \cdot rom}{2 \cdot Fm + SKmr}$$

$$Kyr0yr1 := \frac{2 \cdot Fm - SKmr}{2 \cdot Fm + SKmr}$$

$$Txr1 := \frac{Va \cdot roa}{2 \cdot Fa + SKar}$$

$$Kyr1xr1 := \frac{SKar}{mr \cdot (2 \cdot Fa + SKar)}$$

$$Txr1m := -\frac{Va \cdot roa}{2 \cdot Fm + SKmr}$$

$$Tyr0 := -\frac{Vm \cdot rom}{2 \cdot Fm + SKmr}$$

$$Kxr1yr1 := \frac{SKmr \cdot mr}{2 \cdot Fm + SKmr}$$

$$KFaxr1 := \frac{2 \cdot (xr0 - xr1)}{2 \cdot Fa + SKar}$$

$$Kyr0xr1 := \frac{SKar}{mr \cdot (2 \cdot Fa + SKar)}$$

$$Tyr1a := -\frac{Vm \cdot rom}{2 \cdot Fa + SKar}$$

Моделі динамічного режиму за каналами $F_a \rightarrow y_{ah1}$, $F_a \rightarrow y_{S1}$, $F_a \rightarrow y_{r1}$

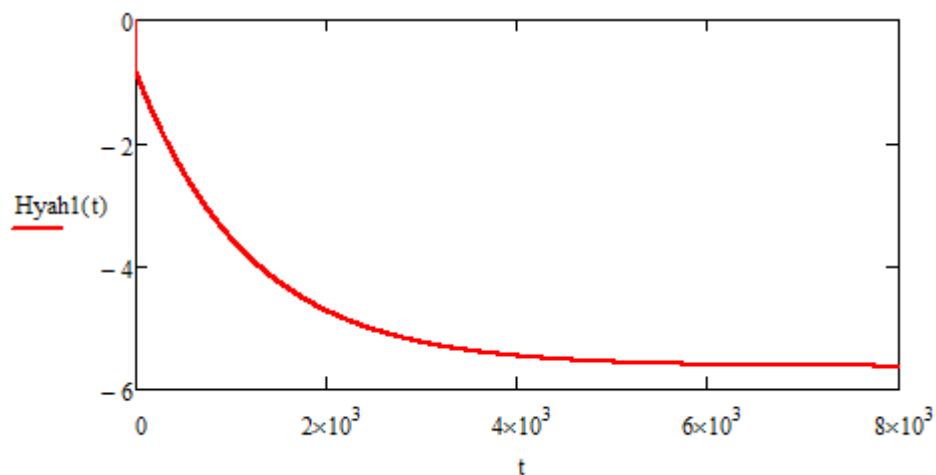
Передавальна функція за каналом керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$

$$Wyah1(s) := \frac{(Txah1m \cdot s + Kxahlyah1) \cdot KFah1 + (TxS1m \cdot s + KxS1yS1) \cdot KFaxS1 + (Txr1m \cdot s + Kxr1yr1) \cdot KFaxr1}{(Tyah1 \cdot s + 1) \cdot (Txah1 \cdot s + 1) - (Txah1m \cdot s + Kxahlyah1) \cdot (Tyah1a \cdot s + Kyah1xah1)}$$

Перехідна характеристика за каналом керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$

$$t := 0..8000$$

$$Hyah1(t) := \frac{Wyah1(s)}{s} \Big|_{\text{invlaplace, s}}^{\text{float, 5}} \rightarrow 4.8002 \cdot e^{-0.00083339 \cdot t} + 0.8323 \cdot e^{-6.017e17 \cdot t} - 5.6325$$

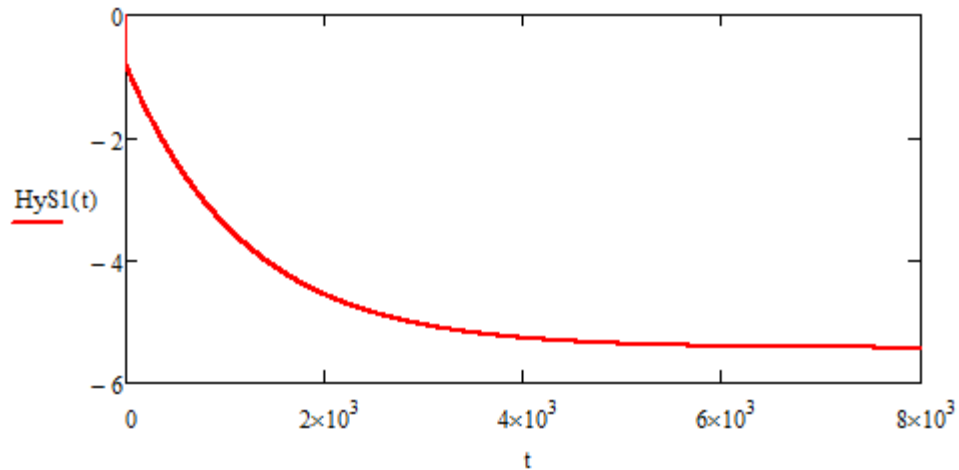


Передавальна функція за каналом керування $F_a \rightarrow y_{S1}$

$$W_{yS1}(s) := \frac{(Tx_{h1}m \cdot s + Kx_{h1}y_{h1}) \cdot KFax_{h1} + (Tx_{S1}m \cdot s + Kx_{S1}y_{S1}) \cdot KFax_{S1} + (Tx_{r1}m \cdot s + Kx_{r1}y_{r1}) \cdot KFax_{r1}}{(Ty_{S1} \cdot s + 1) \cdot (Tx_{S1} \cdot s + 1) - (Tx_{S1}m \cdot s + Kx_{S1}y_{S1}) \cdot (Ty_{S1a} \cdot s + Ky_{S1}x_{S1})}$$

Перехідна характеристика за каналом керування $F_a \rightarrow y_{S1}$

$$Hy_{S1}(t) := \frac{W_{yS1}(s)}{s} \Bigg|_{\substack{\text{invlaplace, } s \\ \text{float, } 5}} \rightarrow 0.80387 \cdot e^{-1.0304e17 \cdot t} + 4.6341 \cdot e^{-0.00083371 \cdot t} - 5.438$$

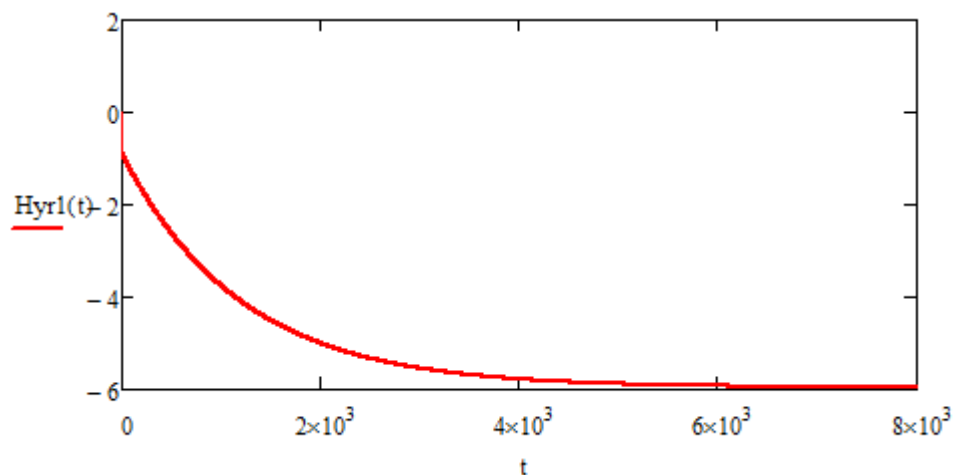


Передавальна функція за каналом керування $F_a \rightarrow y_{r1}$

$$W_{yr1}(s) := \frac{(Tx_{h1}m \cdot s + Kx_{h1}y_{h1}) \cdot KFax_{h1} + (Tx_{S1}m \cdot s + Kx_{S1}y_{S1}) \cdot KFax_{S1} + (Tx_{r1}m \cdot s + Kx_{r1}y_{r1}) \cdot KFax_{r1}}{(Ty_{r1} \cdot s + 1) \cdot (Tx_{r1} \cdot s + 1) - (Tx_{r1}m \cdot s + Kx_{r1}y_{r1}) \cdot (Ty_{r1a} \cdot s + Ky_{r1}x_{r1})}$$

Перехідна характеристика за каналом керування $F_a \rightarrow y_{r1}$

$$Hy_{r1}(t) := \frac{W_{yr1}(s)}{s} \Bigg|_{\substack{\text{invlaplace, } s \\ \text{float, } 5}} \rightarrow 5.0846 \cdot e^{-0.00083346 \cdot t} + 0.88169 \cdot e^{-3.1212e17 \cdot t} - 5.9662$$



Передавальна функція ОК із запізнюванням за каналом керування $F_a \rightarrow y_{ah1}$

$\tau := 60$

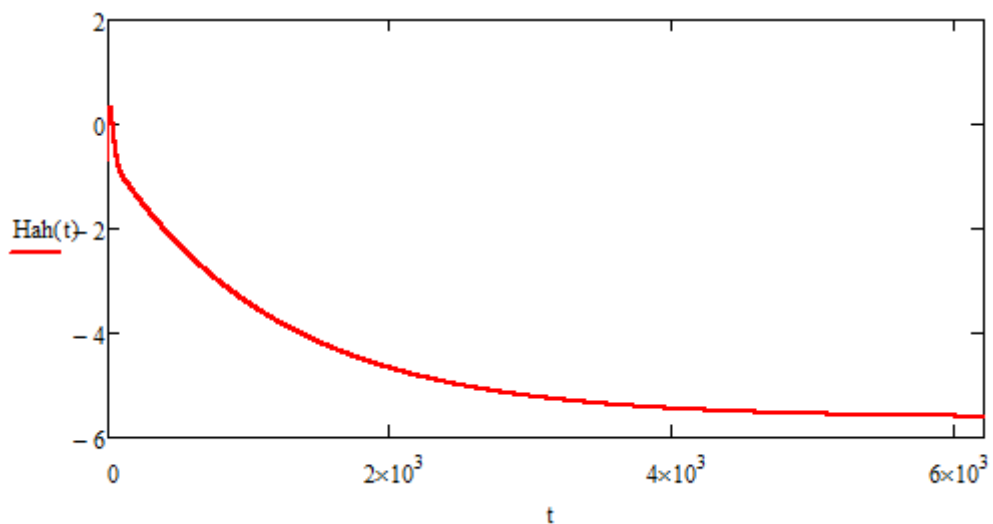
$$W_{del}(s) := \frac{1 - \frac{\tau}{2} \cdot s + \frac{\tau^2}{12} \cdot s^2}{1 + \frac{\tau}{2} \cdot s + \frac{\tau^2}{12} \cdot s^2}$$

$$W_{ah}(s) := W_{del}(s) \cdot W_{yah1}(s) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow -\frac{63028.0 \cdot s + -2.15e6 \cdot s^2 + 2.28e7 \cdot s^3 + 428.0}{93428.0 \cdot s + 2.76e6 \cdot s^2 + 2.73e7 \cdot s^3 + 5.36e-11 \cdot s^4 + 76.0}$$

Перехідна характеристика ОК із запізнюванням за каналом керування

$$F_a \rightarrow y_{ah1}$$

$$H_{ah}(t) := \frac{W_{ah}(s)}{s} \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace}, s \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow 5.05 \cdot e^{-0.000834 \cdot t} + 0.835 \cdot e^{-5.09e17 \cdot t} + -0.249 \cdot \cos(0.0287 \cdot t) \cdot e^{-0.0501 \cdot t} + 5.39 \cdot \sin(0.0287 \cdot t) \cdot e^{-0.0501 \cdot t} - 5.63$$



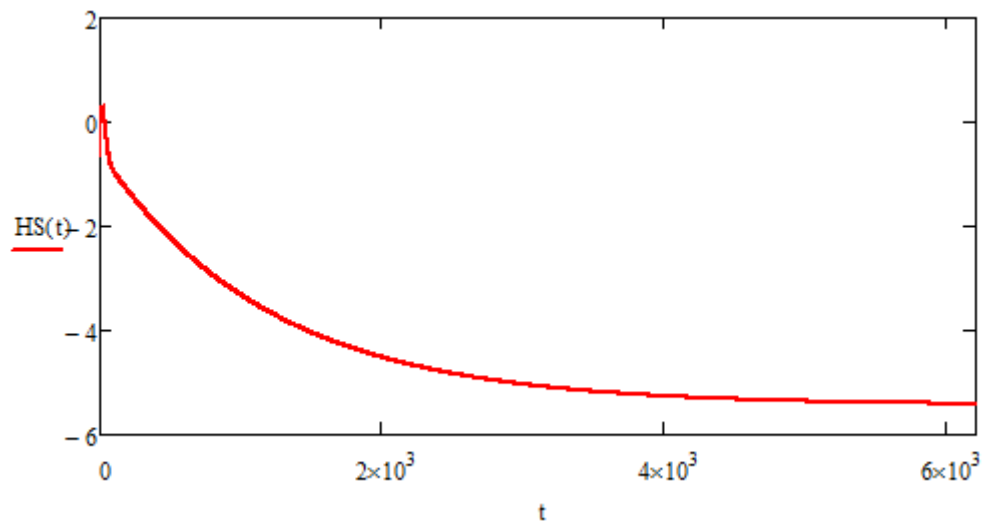
Передавальна функція ОК із запізнюванням за каналом керування $F_a \rightarrow y_{S1}$

$$W_S(s) := W_{del}(s) \cdot W_{yS1}(s) \left| \begin{array}{l} \text{expand} \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow -\frac{63028.0 \cdot s + -2.15e6 \cdot s^2 + 2.28e7 \cdot s^3 + 428.0}{96733.0 \cdot s + 2.85e6 \cdot s^2 + 2.83e7 \cdot s^3 + 2.75e-10 \cdot s^4 + 78.7}$$

Перехідна характеристика ОК із запізнюванням за каналом керування

$$F_a \rightarrow y_{S1}$$

$$H_S(t) := \frac{W_S(s)}{s} \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace}, s \\ \text{float}, 3 \end{array} \right. \rightarrow 0.806 \cdot e^{-1.03e17 \cdot t} + 4.87 \cdot e^{-0.000834 \cdot t} + -0.239 \cdot \cos(0.029 \cdot t) \cdot e^{-0.0499 \cdot t} + 5.15 \cdot \sin(0.029 \cdot t) \cdot e^{-0.0499 \cdot t} - 5.44$$



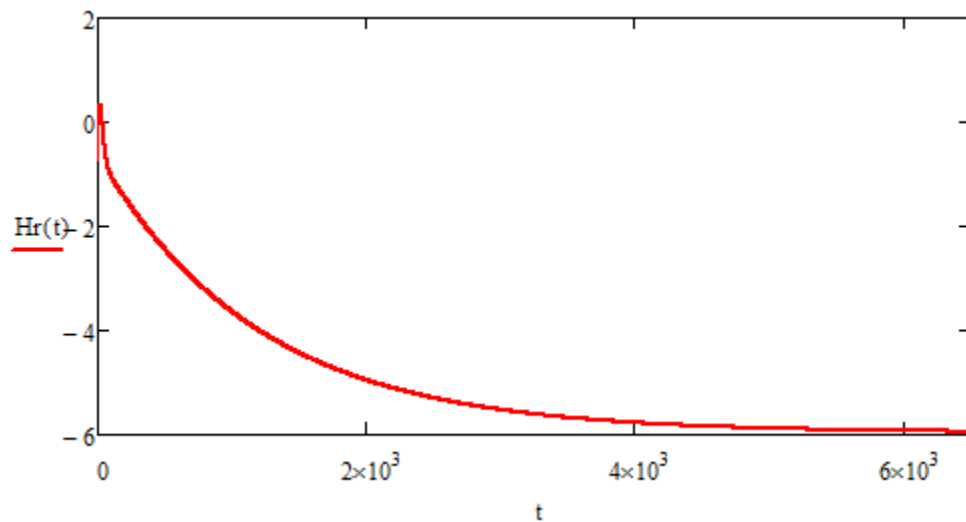
Передавальна функція ОК із запізнюванням за каналом керування $F_a \rightarrow y_{r1}$

$$W_r(s) := W_{del}(s) \cdot W_{yr1}(s) \Big|_{\text{float},3}^{\text{expand}} \rightarrow -\frac{63028.0 \cdot s + -2.15e6 \cdot s^2 + 2.28e7 \cdot s^3 + 428.0}{88195.0 \cdot s + 2.6e6 \cdot s^2 + 2.58e7 \cdot s^3 + 7.35e-11 \cdot s^4 + 71.7}$$

Перехідна характеристика ОК із запізнюванням за каналом керування

$$F_a \rightarrow y_{r1}$$

$$Hr(t) := \frac{W_r(s)}{s} \Big|_{\text{float},3}^{\text{invlaplace},s} \rightarrow 5.35 \cdot e^{-0.000833 \cdot t} + 0.884 \cdot e^{-3.51e17 \cdot t} + -0.262 \cdot \cos(0.0289 \cdot t) \cdot e^{-0.05 \cdot t} + 5.65 \cdot \sin(0.0289 \cdot t) \cdot e^{-0.05 \cdot t} - 5.97$$



Таблиця Д4.1 – Експериментальні дані процесу адсорбції при зміні витрати адсорбенту від 2,33 кг/с до 3,33 кг/с

№ досліджу	Концентрація ароматичних вуглеводнів	№ досліджу	Концентрація ароматичних вуглеводнів	№ досліджу	Концентрація ароматичних вуглеводнів
1	26	35	14.11	69	12.32
2	26	36	14	70	12.3
3	23.36	37	13.9	71	12.28
4	22.27	38	13.81	72	12.26
5	21.76	39	13.71	73	12.24
6	21.28	40	13.63	74	12.23
7	20.83	41	13.54	75	12.21
8	20.39	42	13.46	76	12.2
9	19.98	43	13.39	77	12.18
10	19.59	44	13.32	78	12.17
11	19.21	45	13.25	79	12.16
12	18.86	46	13.18	80	12.15
13	18.52	47	13.12	81	12.13
14	18.19	48	13.06	82	12.12
15	17.89	49	13	83	12.11
16	17.6	50	12.95	84	12.1
17	17.32	51	12.9	85	12.1
18	17.06	52	12.85	86	12.09
19	16.81	53	12.81	87	12.08
20	16.57	54	12.76	88	12.07
21	16.34	55	12.72	89	12.06
22	16.12	56	12.68	90	12.06
23	15.92	57	12.65	91	12.05
24	15.72	58	12.61	92	12.04
25	15.54	59	12.58	93	12.04
26	15.36	60	12.54	94	12.03
27	15.19	61	12.51	95	12.02
28	15.03	62	12.48	96	12.02
29	14.88	63	12.46	97	12.01
30	14.74	64	12.43	98	12.01
31	14.6	65	12.41	99	12
32	14.47	66	12.38	100	12
33	14.34	67	12.36		
34	14.22	68	12.34		