

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

Факультет гідрометеорології і екології

Кафедра екології та охорони довкілля

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНКИ АПАРАТІВ З ВІЛЬНОЮ МІЖФАЗНОЮ ГРАНИЦЕЮ В ТЕХНОЛОГІЯХ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ MODELING AND CALCULATIONS OF DEVICES WITH A FREE INTERPHASE BOUNDARY IN AIR PURIFICATION TECHNOLOGIES

Виконав: здобувач денної форми навчання
спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього
середовища»

Освітньо-професійна програма «Технології захисту
навколишнього середовища»

Беляєв Микита Борисович
(прізвище, ім'я, по-батькові здобувача)

Керівник канд. фіз.-мат. наук, доц. Курятников В.В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент доктор фіз.-мат. наук, проф. Калінчак В.В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рекомендовано до захисту:
Протокол засідання кафедри
екології та охорони довкілля
№ 9 від 27. 05 . 2025 р.

Завідувачка кафедри

Ангеліна ЧУГАЙ
(підпис) (прізвище, ім'я)

Захищено на засіданні ЕК № 5
протокол № від . . 2025 р.

Оцінка / /
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Голова ЕК

Володимир Скалозубов
(підпис) (прізвище, ім'я)

Одеса 2025

АНОТАЦІЯ

Беляєв М. Моделювання і розрахунки апаратів з вільною міжфазною границею в технологіях очищення повітря

Актуальністю теми є забруднення атмосферного повітря є однією з найгостріших екологічних проблем сучасності. Зростання обсягів промислового виробництва, транспортного трафіку та енергетичного споживання спричиняє постійне надходження у повітряний басейн великої кількості шкідливих газоподібних і твердих домішок. Це негативно впливає на здоров'я населення, стан довкілля, кліматичні умови та загальну якість життя.

У зв'язку з цим тема дипломного проєкту є актуальною як з науково-технічної, так і з практичної точки зору, оскільки спрямована на удосконалення екологічно важливих технологій, що сприяють зменшенню антропогенного навантаження на довкілля.

Метою даного дипломного проєкту є розробка математичної моделі та виконання інженерних розрахунків апарата з вільною міжфазною границею, призначеного для очищення забрудненого повітря від шкідливих газоподібних компонентів, з урахуванням особливостей процесів масопереносу та гідродинаміки в таких системах.

Об'єктом дослідження є процеси масообміну між газовою і рідинною фазами в апаратах з вільною міжфазною границею, які застосовуються для очищення повітря від шкідливих газоподібних домішок.

Предметом дослідження виступають фізико-хімічні закономірності масопереносу, гідродинамічні характеристики двофазних потоків, а також математичні моделі та методи інженерного розрахунку конструктивних параметрів апаратів, які реалізують ці процеси.

Робота містить:

Сторінок - 68

Рисунків - 5

Літературних посилань – 26

Ключові слова: Масообмін , Вільна міжфазна границя, Очищення повітря, Абсорбція, Плівковий апарат, Ефективність очищення, Технології захисту довкілля, Коефіцієнт масопереносу, Турбулентність

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	9
1.1. Сучасні методи очищення повітря.....	9
1.2. Принципи роботи апаратів з вільною міжфазною границею.....	11
1.3. Класифікація апаратів та їх застосування.....	13
1.4. Аналіз ефективності існуючих технологій.....	15
1.5. Проблематика та напрямки вдосконалення.....	17
2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ МАСООБМІНУ.....	19
2.1. Основи масообміну між фазами.....	19
2.2. Рівняння масопереносу для вільної міжфазної поверхні.....	21
2.3. Параметри, що впливають на ефективність процесу.....	23
2.4. Визначення коефіцієнтів масопереносу.....	26
3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ.....	29
3.1. Постановка задачі моделювання.....	29
3.2. Система рівнянь, що описують процес.....	31
3.3. Граничні умови та припущення.....	33
3.4. Аналітичні методи розв'язання.....	34
3.5. Верифікація моделей.....	36
4. ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ АПАРАТА.....	42
4.1. Вихідні дані.....	42
4.2. Вибір типу апарата.....	44
4.3. Розрахунок геометричних параметрів.....	46
4.4. Гідродинамічні характеристики.....	49
4.5. Розрахунок ефективності очищення.....	52
5. КОНСТРУКТИВНА ЧАСТИНА.....	54
5.1. Схема апарата.....	54
5.2. Матеріали конструкції.....	56
5.3. Розрахунок міцності основних елементів.....	58

6. Аналіз надійності роботи та захист від потенційних небезпек при експлуатації.....	61
6.1. Безпека та експлуатаційні умови.....	61
6.2. Заходи безпеки під час експлуатації.....	63
6.3. Екологічний вплив та шляхи його мінімізації.....	63
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ	66

ВСТУП

Сучасна екологічна ситуація вимагає розробки та впровадження ефективних методів очищення атмосферного повітря від шкідливих домішок. Одним із перспективних напрямів є використання апаратів з вільною міжфазною границею, які забезпечують інтенсивний масообмін між газовою та рідинною фазами. Ці процеси широко використовуються у хімічній, нафтохімічній промисловості, енергетиці, системах вентиляції та охорони навколишнього середовища.

Актуальністю теми є забруднення атмосферного повітря - одна з найгостріших екологічних проблем сучасності. Зростання обсягів промислового виробництва, транспортного трафіку та енергетичного споживання спричиняє постійне надходження у повітряний басейн великої кількості шкідливих газоподібних і твердих домішок. Це негативно впливає на здоров'я населення, стан довкілля, кліматичні умови та загальну якість життя.

Таким чином, актуальність теми дипломного проєкту обумовлюється необхідністю:

- покращення екологічної безпеки промислових підприємств;
- підвищення ефективності апаратів очищення повітря;
- створення науково обґрунтованих методів моделювання та розрахунку технологічного обладнання.

У зв'язку з цим тема дипломного проєкту є актуальною як з науково-технічної, так і з практичної точки зору, оскільки спрямована на удосконалення екологічно важливих технологій, що сприяють зменшенню антропогенного навантаження на довкілля.

Метою даного дипломного проєкту є розробка математичної моделі та виконання інженерних розрахунків апарата з вільною міжфазною границею, призначеного для очищення забрудненого повітря від шкідливих газоподібних

компонентів, з урахуванням особливостей процесів масопереносу та гідродинаміки в таких системах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Проаналізувати сучасні технології очищення повітря з використанням апаратів з вільною міжфазною границею.
- Дослідити фізико-хімічні процеси, які відбуваються на межі розділу газової та рідинної фаз.
- Сформулювати математичну модель процесу масопереносу в апаратах даного типу.
- Провести чисельне моделювання з урахуванням граничних умов і характеристик забруднюючих речовин.
- Виконати інженерний розрахунок параметрів апарата на основі розробленої моделі.
- Запропонувати конструктивне рішення апарата та оцінити його ефективність.
- Провести оцінку безпеки, екологічного впливу та економічної доцільності впровадження запропонованого рішення.

Реалізація цих завдань дозволить створити науково обґрунтовану та практично придатну методику проєктування ефективних апаратів для очищення повітря, що відповідають сучасним вимогам сталого розвитку та екологічної безпеки.

Об'єктом дослідження є процеси масообміну між газовою і рідинною фазами в апаратах з вільною міжфазною границею, які застосовуються для очищення повітря від шкідливих газоподібних домішок.

Предметом дослідження виступають фізико-хімічні закономірності масопереносу, гідродинамічні характеристики двофазних потоків, а також математичні моделі та методи інженерного розрахунку конструктивних параметрів апаратів, які реалізують ці процеси.

У роботі аналізуються специфічні умови контакту фаз у відкритих системах, де існує вільна міжфазна поверхня, що значною мірою впливає на

ефективність процесу масообміну. Зокрема, досліджується вплив турбулентності, характеру обтікання крапель та плівки рідини, гідравлічного опору тощо, відповідно до підходів, розглянутих у роботі Склабінського В.І. щодо двофазних потоків у тепло- і масообмінному обладнанні.

У процесі дослідження також враховуються принципи термодинаміки відкритих нерівноважних систем, викладені в працях Анісімова І.О. з синергетики, що дозволяє точніше моделювати поведінку систем, віддалених від рівноваги. Крім того, беруться до уваги загальні інженерні засади екологічного проектування апаратів очищення повітря.

Особлива увага приділяється дослідженню двофазних потоків, у яких реалізується високоефективне перенесення речовин і енергії.

Практичне значення. Удосконалення конструкцій апаратів із урахуванням гідродинамічних характеристик дозволяє підвищити ефективність процесів тепломасообміну та зменшити енерговитрати. Розробка математичних моделей, що описують поведінку масопереносу на межі поділу фаз, дозволяє оптимізувати параметри роботи апаратів ще на етапі проектування. У цьому контексті важливо враховувати як термодинамічні закономірності нерівноважних систем, описані в працях з синергетики, так і практичні принципи інженерного захисту навколишнього середовища.

Проєкт спрямований на моделювання процесів масопереносу з вільною міжфазною границею, визначення оптимальних конструктивних і режимних параметрів апарата, а також оцінку його ефективності з урахуванням гідродинамічних умов реального функціонування.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Сучасні методи очищення повітря

Сучасні технології очищення повітря охоплюють широкий спектр методів, призначених для видалення з повітряного потоку механічних, хімічних та біологічних забруднень. Залежно від агрегатного стану домішок, їх концентрації, токсичності та джерела походження обирається відповідний спосіб очищення[1].

Умовно всі технології поділяють на такі групи:

1. Механічні методи очищення

Ці методи застосовуються переважно для видалення з повітря зважених твердих частинок (пилу, аерозолів). До них належать:

- Осаджувальні камери, які забезпечують випадання великих частинок під дією гравітації;
- Циклони та інерційні сепаратори, в яких частинки відділяються за інерцією від повітряного потоку;
- Фільтри (тканинні, картриджні, касетні), які затримують пил на поверхні фільтрувального матеріалу;
- Електрофільтри, що використовують електростатичне поле для вловлювання пилу.

Ці методи ефективні для частинок розміром >1 мкм, мають низькі експлуатаційні витрати, але не застосовуються для газоподібних домішок.

2. Фізико-хімічні методи очищення

Ця група методів базується на процесах масообміну між повітрям та рідинною чи твердою фазою. Основні з них:

- Абсорбція — поглинання газоподібних домішок рідиною. Широко використовується для вилучення SO_2 , NH_3 , HCl тощо. Найпоширенішими є скрубери, барботажні та плівкові апарати;
- Адсорбція — поглинання газів твердими сорбентами (активоване вугілля, цеоліти). Ефективна для органічних сполук, парів розчинників;

- Конденсація — перетворення газів у рідину при зниженні температури або підвищенні тиску.

Ці методи добре адаптовані до очищення повітря від розчинених або летких речовин, однак потребують ретельного підбору сорбентів і реагентів.

3. Хімічні методи очищення

Хімічна нейтралізація або окиснення забруднювачів проводиться в спеціальних реакційних апаратах:

- Каталітичне окислення (наприклад, для CO, вуглеводнів);
- Термічне спалювання летких органічних речовин при високих температурах;
- Нейтралізація кислот і лугів в абсорберах з відповідними розчинами. Такі методи ефективні, але потребують високих температур, каталізаторів або хімреагентів, тому використовуються переважно для високотоксичних домішок[3].

4. Біологічні методи очищення

Застосовуються для деградації органічних речовин за допомогою мікроорганізмів у таких апаратах, як:

- Біофільтри;
- Біоскрубери;
- Біореактори.

Це екологічно безпечні методи з низьким енергоспоживанням, однак обмежені у використанні через вимоги до стабільного складу забруднень і температури.

5. Комбіновані методи

У практиці все частіше використовують комбінації методів, наприклад:

- Інерційно-фільтруюча абсорбція;
- Адсорбційно-каталітичне очищення;
- Абсорбція з біодеградацією.

Це дозволяє досягти високого ступеня очищення навіть за умов змінного складу забруднювальних речовин.

1.2. Принципи роботи апаратів з вільною міжфазною границею

Апаратами з вільною міжфазною границею називають такі масообмінні установки, у яких контакт між фазами (газ — рідина) здійснюється без структурованих насадок або спрямованого примусового диспергування. Межа поділу фаз є відкритою, тобто рідина має форму плівки або окремих струменів, а газ протікає поруч або через неї, забезпечуючи перенесення речовин[1].

Ці апарати застосовуються в таких процесах, як:

- очищення повітря від шкідливих газів (SO_2 , NH_3 , HCl);
- зволоження або охолодження газових потоків;
- знесірчення викидних газів;
- уловлювання летких органічних сполук (ЛОС).

Основні типи апаратів:

1. Плівкові апарати — рідина стікає тонким шаром по внутрішній поверхні труб або пластин. Газ рухається в протитечії або прямоточно, взаємодіючи з рідинною плівкою.

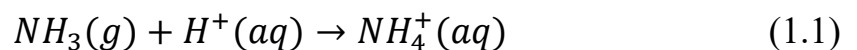
2. Барботажні колони — газ пропускається через шар рідини у вигляді бульбашок, що значно збільшує площу міжфазного контакту.

3. Розбризкувальні апарати — рідина розпилюється у вигляді крапель в газовому об'ємі, створюючи тимчасову вільну поверхню.

4. Крапельні колони — газ протікає зверху вниз, а рідина подається зверху малими порціями (у вигляді крапель або струменів), стікаючи вниз по стінках.

Фізико-хімічна суть процесу

У межі поділу фаз відбувається масоперенос, зумовлений різницею концентрацій речовини у фазах. Наприклад, у випадку очищення повітря від аміаку в кислому середовищі NH_3 переходить з газової фази до рідинної, де вступає у реакцію з H^+ :



Масоперенос описується законами дифузії (згідно з законом Фіка) та конвекції. Ефективність процесу залежить від:

- площі міжфазної поверхні;
- часу контакту;
- турбулентності газу;
- швидкості руху фаз;
- концентраційного градієнта.

Особливості апаратів з вільною межфазною границею

- Простота конструкції (відсутність насадок, розпилувачів, сіток).
- Високий ступінь очищення при правильному підборі параметрів.
- Низький опір потоку газу.
- Обмежена ефективність при низькій розчинності домішок або високій швидкості газу (ріст відриву плівки).
- Можливість комбінування з біологічними або хімічними методами.

Щодо безпосереднього впливу рівномірності стікання рідини у вигляді тонкої плівки, її пульсації та осциляції, на інтенсивність масообміну.

Як зазначено в дослідженні Склабінського [1], в апаратах із вільною міжфазною границею критичним є контроль гідродинаміки плівки — рівномірність її стікання, пульсації, осциляції.

Все це безпосередньо впливає на інтенсивність масообміну.

Також важливо забезпечити сталість межі поділу фаз, оскільки її порушення веде до зниження ефективності процесу.

Однак оптимальні режими роботи апаратів з вільною міжфазною границею ще досконало не вивчені та не встановлені.

Все це залишається до сьогоднішнього часу в багатьох випадках теоретично невідомим і не підтверджено в експериментальних дослідженнях.

1.3. Класифікація апаратів та їх застосування

Апаратурне оформлення масообмінних процесів з вільною міжфазною границею охоплює низку типів обладнання, які відрізняються принципом подачі фаз, конфігурацією конструкції, напрямком руху середовищ, ефективністю переносу маси та областю застосування.

Загалом такі апарати можна класифікувати за кількома ознаками.

1. За способом подачі та взаємодії фаз:

- Прямотечійні – газ і рідина рухаються в одному напрямку;
- Протитечійні – рідина рухається зверху вниз, а газ — знизу вгору (найефективніші за ступенем масообміну);
- Перехресні – газ і рідина рухаються під кутом один до одного, наприклад, у плівкових і розбризкувальних апаратах[1].

2. За способом формування вільної міжфазної границі:

- Плівкові апарати – стікання рідини тонкою плівкою по стінках каналу (вертикальних або нахилених). Наприклад, вертикальні труби з внутрішнім зрошенням.
- Крапельні – подача рідини у вигляді окремих крапель з формуванням тимчасової контактної поверхні з газом.
- Барботажні колони – газ пропускається через шар рідини, формуючи великі кількості бульбашок, що створюють значну сумарну поверхню контакту.
- Розбризкувальні скрубери – рідина подається у вигляді тонких струменів або туману, які контактують із газовим середовищем.

3. За наявністю допоміжних пристроїв:

- Безнасадкові – класичні варіанти без перешкод у зоні контакту фаз.
- З елементами спрямування – наявні вставки, що покращують розподіл потоку, утворення вихорів або стабілізують плівку (завихрювачі, ребра тощо).

4. За режимом роботи:

- Безперервні апарати – використовуються в промисловому очищенні повітря з постійною подачею фаз.

- Періодичні установки – застосовуються в лабораторіях або при малих об'ємах викидів[5].

5. У таблиці 1.1 наведені приклади типи апаратів з вільною міжфазною границею та сфери їх застосування

Таблиця 1.1 - Приклади застосування апаратів з вільною міжфазною границею

Тип апарата	Сфера застосування
Плівковий	Хімічна промисловість, абсорбція SO ₂ , HCl
Барботаажний	Очищення вентиляційних викидів, поглинання аміаку, ЛОС
Розбризувальний	Харчова промисловість, зволоження та охолодження газів
Крапельний	Газоочисні установки на ТЕС, знесірчення топкових газів

У Скаблінського[1] підкреслено, що підбір типу апарата повинен здійснюватись з урахуванням концентрації забруднювача, об'єму газового потоку, температури, токсичності речовин та економічної доцільності використання.

1.4. Аналіз ефективності існуючих технологій

Ефективність технологій очищення повітря залежить не лише від принципу дії апарата, але й від комплексу факторів: хімічного складу забруднювачів, фізичних властивостей середовища, режимів роботи обладнання, рівня автоматизації та відповідності екологічним нормам.

У цьому підпункті розглянемо основні показники ефективності, типові проблеми та практичні приклади.

Ключові критерії оцінки ефективності:

1. Ступінь очищення (η), % – відношення вилученої кількості забруднювача до загальної кількості на вході.

$$\eta = \frac{C - C^*}{C} \quad (1.2)$$

Більшість сучасних систем мають показники:

- 98% – для пилу (електрофільтри, тканинні фільтри);
- 90–95% – для SO₂, HCl (абсорбери);
- 70–85% – для летких органічних сполук (адсорбери, термічне окислення).

2. Гідрравлічний опір (ΔP), Па – важливий показник енергозатрат, особливо для систем з великими об'ємами повітря. Наприклад, барботажні колони можуть мати $\Delta P > 1000$ Па.

3. Питомі витрати енергії, кВт·год/1000 м³ – енерговитрати на одиницю очищеного повітря. У плівкових апаратах вони нижчі, ніж у скруберах або розпилювальних пристроях.

4. Стійкість до змін навантаження – здатність системи ефективно функціонувати при коливаннях дебіту або складу повітряного потоку.

5. Експлуатаційна надійність – обмежена кількість рухомих частин, низька ймовірність забруднення або корозії[2].

Недоліки традиційних технологій:

- Високі витрати води (у рідинних апаратах).
- Утворення вторинних відходів (відпрацьовані абсорбенти, фільтрувальні матеріали).
- Потреба у великих площах для монтажу.
- Неможливість ефективної роботи з багатокомпонентними газовими сумішами.

У роботі [1] показано, що для підвищення ефективності потрібні глибокі дослідження гідродинаміки двофазних потоків, оптимізація геометрії апарата, а також розробка адаптивних моделей, що дозволяють передбачити поведінку системи при змінних параметрах.

Напрями вдосконалення:

- Застосування CFD-моделювання для проектування каналів та контактних поверхонь.
- Перехід до комбінованих технологій (напр., адсорбційно-каталітичних).
- Використання активних або селективних реагентів.
- Встановлення інтелектуальних систем моніторингу процесів очищення.

На наш погляд, цього ще недостатньо, тому що ці напрями та дії не враховують фізичних основ технологій очищення.

Зокрема тут відсутні заходи, які пов'язані з верифікацією моделей масообмінних апаратів, і взагалі фізичного моделювання масообміну на вільній міжфазній границі, якою може бути плеската або циліндрична поверхня рідини, яка абсорбує на собі небезпечну шкідливу домішку з потоку газової фази.

Гідродинамічні характеристики та їх дослідження у цих роботах [1] також не згадуються.

1.5. Проблематика та напрямки вдосконалення

Хоча існуючі технології очищення повітря демонструють високий рівень ефективності в лабораторних або стаціонарно стабільних умовах, у реальній промисловій експлуатації виникає ряд проблем, які обмежують їхнє застосування або знижують надійність і результативність.

Ключові проблеми сучасних систем очищення повітря:

1. Зниження ефективності при змінних режимах роботи

Більшість апаратів із вільною міжфазною границею проєктуються для фіксованих умов (постійний об'єм газу, сталий склад домішок). У випадку коливань витрати або температури газу ефективність масообміну значно зменшується.

2. Нерівномірність міжфазного контакту

Як зазначено у звітах [2], нерівномірне зрошення або дестабілізація плівки рідини призводить до утворення сухих зон або турбулентних розривів плівки, що зменшує площу контакту фаз і, відповідно, швидкість переносу речовини.

3. Високі гідравлічні втрати

Особливо актуально для барботажних і скрубєрних систем. Установка потужних вентиляторів для подолання опору спричиняє значні витрати енергії.

4. Вторинне забруднення

Рідини, використані для абсорбції, потребують очищення або регенерації. Недостатньо опрацьовані системи утилізації вторинних відходів можуть спричиняти додаткове навантаження на навколишнє середовище.

5. Матеріали конструкцій

Корозійна дія агресивних середовищ знижує строк служби апаратів. Також важливою є сумісність матеріалів з абсорбентами й термічними режимами.

Напрями вдосконалення технологій:

1. Моделювання гідродинаміки

Застосування чисельного моделювання (CFD – Computational Fluid Dynamics) дозволяє змоделювати профілі швидкостей, зони застою, деформацію плівки тощо. Це забезпечує оптимізацію конструктивних елементів до початку виробництва.

2. Адаптивні конструкції апаратів

Розробка апаратів із змінною геометрією, що дозволяє змінювати режим масообміну під поточні параметри процесу (наприклад, регулювання кута нахилу плівкового елемента або частоти барботажу).

3. Нові типи контактуючих поверхонь

Використання мікротекстурованих або гідрофобізованих поверхонь для стабілізації плівки, зменшення її розриву, посилення турбулентності поблизу межі поділу фаз.

4. Комбіновані технології

Інтеграція кількох методів очищення (адсорбція + хімічна нейтралізація; барботаж + фільтрація) в єдиному апараті дозволяє охоплювати ширший спектр забруднювачів[2].

5. Цифровізація та автоматизація Використання систем моніторингу та керування на основі сенсорики, алгоритмів машинного навчання для прогнозування змін режиму та автоматичного регулювання витрат, температури, концентрацій реагентів.

Перспективи наукових досліджень

Поглиблене вивчення турбулентності поблизу межі поділу фаз, локального коефіцієнта масовіддачі, структури плівки у реальному апараті є ключовим завданням подальших досліджень. Як показано у звітах Склабінського [1], саме точне розуміння цих процесів дозволить створити універсальні моделі, що будуть легко адаптовані до промислових умов.

Таким чином, вдосконалення апаратів з вільною міжфазною границею є не лише інженерним, а й міждисциплінарним завданням, що поєднує хімію, гідродинаміку, термодинаміку, моделювання та екологію.

2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ МАСООБМІНУ

2.1. Основи масообміну між фазами

Масообмін — це фундаментальний фізико-хімічний процес, за якого одна чи кілька речовин переміщується з однієї фази до іншої. У випадку апаратів з вільною міжфазною границею мова переважно йде про масообмін між газовою та рідинною фазами, тобто абсорбцію — поглинання газу рідиною.

Природа процесу

Процес масообміну починається з того, що забруднювальна речовина (газова домішка) підводиться до межі поділу фаз (газ/рідина) конвективним або дифузійним шляхом. Після цього вона переходить у рідинну фазу за рахунок градієнта концентрації або хімічної активності. Потім речовина або розчиняється в рідині, або вступає з нею в хімічну реакцію[1].

Основні етапи масообміну:

1. Транспорт домішки через основний об'єм газу до прикордонного шару біля рідини.
2. Дифузія крізь прикордонний шар газової фази до поверхні контакту.
3. Проходження через межу поділу фаз (поверхню плівки, краплі тощо).
4. Дифузія крізь прикордонний шар рідкої фази.
5. Транспорт у глибину рідини або вступ у хімічну реакцію (залежно від складу).

Математичне описання

Найпростішим аналітичним підходом є використання закону Фіка для опису дифузії:

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (2.1)$$

де:

J — масовий потік ($\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$),

D — коефіцієнт дифузії ($\text{м}^2/\text{с}$),

$\frac{dc}{dx}$ — градієнт концентрації речовини у напрямку масопереносу.

У багатьох інженерних випадках зручно використовувати емпіричний підхід — так званий закон масовіддачі Гіншеля:

$$J = \beta \cdot (c^* - c) \quad (2.2)$$

де:

β — коефіцієнт масовіддачі ($\text{м}/\text{с}$),

c^* — концентрація речовини на межі фаз при рівновазі,

c — фактична концентрація в рідинній фазі поблизу межі.

Реальні умови в апаратах з вільною міжфазною границею

У плівкових апаратах рідина стікає по поверхні, створюючи тонкий рухомий шар. Газ омиває цю плівку і забруднювальні речовини з нього поступово переходять у рідину. В умовах неламінарної течії важливо враховувати вплив турбулентних пульсацій на ефективність масообміну. За таких умов коефіцієнт масовіддачі значно зростає.

Для реальних промислових апаратів глибоке розуміння цих принципів є критично важливим — від цього залежить точність моделювання, коректність інженерного розрахунку та вибір конструктивних рішень[2].

Дифузійні процеси — це фізика масообміну. До цього потрібно згадати кінетику абсорбційних процесів.

В основі кінетик абсорбційних процесів лежать закони і принципи, відкриті Ленгмюром, Раулем, Генрі, принцип Ле-Шательє. Потрібно згадати ізотерми Ленгмюра в процесах абсорбції, закон Рауля, закон Генрі та визначити їх роль в очищенні повітря від газових домішок.

2.2. Рівняння масопереносу для вільної міжфазної поверхні

Математичне моделювання масообміну між фазами у системах з вільною міжфазною границею є ключовим елементом розрахунку та оптимізації таких апаратів. Головна особливість полягає в тому, що поверхня контакту між фазами не є зафіксованою конструктивно, як у насадкових апаратах, а формується природним чином: плівкою, краплями або бульбашками.

Загальні положення

Процес масопереносу описується системою рівнянь дифузії-конвекції для кожної фази окремо — газової та рідинної. Розрахунок ускладнюється тим, що:

- межа між фазами може змінювати форму;
- у прикордонних шарах діють інші (локальні) коефіцієнти масовіддачі;
- у рідині можуть відбуватись хімічні реакції, які змінюють концентраційний градієнт.

Рівняння для газової фази

Для сталого процесу масообміну рівняння балансу речовини в газовій фазі має вигляд:

$$\nabla \cdot (-D_g \nabla c_g + \vec{v}_g c_g) = 0 \quad (2.3)$$

де:

D_g — коефіцієнт дифузії у газі ($\text{м}^2/\text{с}$),

\vec{v}_g — вектор швидкості газового потоку ($\text{м}/\text{с}$),

c_g — концентрація речовини в газовій фазі ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Рівняння для рідинної фази

Аналогічно для рідини:

$$\nabla \cdot (-D_l \nabla_{cl} + \vec{v}_l cl) = R(cl) \quad (2.4)$$

де:

D_l — коефіцієнт дифузії в рідині,

\vec{v}_l — вектор швидкості рідини,

$R(cl)$ — джерельний член, що враховує хімічну реакцію або поглинання.

Граничні умови на міжфазній границі

На поверхні контакту газ-рідина застосовуються умови неперервності масопотоку:

$$-D_g \frac{\partial c_g}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = -D_l \frac{\partial c_l}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = J \quad (2.5)$$

а також умова рівноваги (у випадку швидкого встановлення рівноваги):

$$c_g \Big|_{\text{пов.}} = m \cdot c_l \Big|_{\text{пов.}} \quad (2.6)$$

де m — коефіцієнт розподілу речовини між фазами (наприклад, коефіцієнт

Генрі).

У випадку кінетично обмеженого процесу, коли рівновага не встигає встановитися, вводять ефективний коефіцієнт масовіддачі:

$$J = K_G (c_g - c_g^*) \quad (2.7)$$

де c_g^* — рівноважна концентрація на основі розрахункових умов.

Особливості для вільної межі фаз

У випадку плівкового або крапельного режиму важливо враховувати:

- локальні зміни швидкості рідини (змінна товщина плівки, осциляції);
- розриви або коливання плівки під дією турбулентності газу;
- неоднорідний профіль концентрації у напрямку нормалі до поверхні.

Ці ефекти, як зазначено у Скаблінського[1], можуть бути враховані шляхом поділу апарата на елементарні зони й використання профільних коефіцієнтів масопереносу для кожної з них. Це наближає модель до реальних умов, хоча ускладнює обчислення.

2.3. Параметри, що впливають на ефективність процесу

Ефективність масообміну між газовою та рідинною фазами у системах з вільною міжфазною границею залежить від широкого спектра гідродинамічних, фізико-хімічних і конструктивних параметрів. Їхнє коректне урахування є критичним під час моделювання процесу, вибору типу апарата та інженерного розрахунку.

1. Площа міжфазного контакту (A)

Чим більша площа поверхні, на якій відбувається контакт фаз, тим вищий об'єм речовини, який може передатися з однієї фази в іншу. У плівкових апаратах площа контакту визначається товщиною плівки, геометрією поверхні, кутом нахилу та рівномірністю зрошення.

У крапельних і барботажних апаратах важливе значення має:

- розмір крапель або бульбашок;
- їх кількість на одиницю об'єму;
- загальна сумарна поверхня взаємодії.

2. Час контакту фаз (τ)

Недостатній час контакту (наприклад, через високу швидкість газу) знижує ступінь масообміну, оскільки речовина просто не встигає перейти в рідину. З іншого боку, надто тривалий контакт може бути неефективним через зниження градієнта концентрації (наближення до рівноваги).

Зазвичай час контакту визначається як:

$$\tau = \frac{H}{v} \quad (2.8)$$

де:

H — висота зони масообміну;

v — середня швидкість потоку.

3. Турбулентність і структура потоку

Турбулентність відіграє двоїсту роль. З одного боку, вона підвищує коефіцієнт масовіддачі за рахунок пульсацій та перемішування у

прикордонному шарі. З іншого — надмірна турбулентність може руйнувати плівку рідини або викликати нестабільну течію, що ускладнює прогнозування процесу.

В апаратах із вільною міжфазною границею важливо забезпечити контрольовану турбулентність — достатню для інтенсифікації переносу, але не надмірну[3].

4. Температура (Т)

Температура впливає на:

- швидкість дифузії (зростає з температурою);
- розчинність домішок у рідині (може зменшуватись або збільшуватись залежно від природи речовини);
- в'язкість та щільність фаз, а отже — на гідродинаміку.

В цілому, помірне підвищення температури (до оптимального рівня) зазвичай позитивно впливає на масообмін, особливо для погано розчинних газів (наприклад, CO_2 , SO_2).

5. Концентраційний градієнт

Градієнт концентрацій — рушійна сила процесу. Його зниження у зоні масообміну (наприклад, через насичення рідини) призводить до падіння ефективності. Тому часто застосовують:

- регенерацію абсорбентів;
- багатоступеневі системи (наприклад, каскадні апарати);
- рециркуляцію рідини для підтримки концентраційної різниці.

6. Хімічна активність та швидкість реакції

У випадку, коли в рідинній фазі відбувається хімічна реакція з поглинутою речовиною (наприклад, нейтралізація аміаку кислотою), ефективність процесу може суттєво зростати. Це явище називається реакційною абсорбцією.

У таких випадках до рівнянь масопереносу додають джерельний член:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - R(c) \quad (2.9)$$

де $R(c)$ — швидкість реакції.

7. Геометрія апарата

Форма апарата визначає:

- довжину шляху масопереносу;
- час контакту;
- режим течії рідини.

Правильна конструкція дозволяє забезпечити рівномірне зрошення, відсутність застійних зон, оптимальний режим обтікання плівки. У [1] зазначено, що асиметричні або закручені канали можуть суттєво підвищити коефіцієнт масовіддачі.

Говорячи про геометрію апарата очищення, потрібно враховувати, що вона перш за все визначає методи розрахунків, оскільки від неї залежить вибір системи координат, у якій мають бути записані дифференціальні рівняння, сформульовані граничні умови і, нарешті чисельний метод розв'язання цих рівнянь.

Зрозуміло, що від часу контакту «газ – рідина» залежать довжина шляху масопереносу. Але остання залежить і від режиму течії фаз. Це можуть бути ламінарний режим при малих швидкостях руху фаз, або турбулентний, у якому на перше місце виходять такі явища і процеси, як конвекція, або Стефанівські потоки. Стефанівські потоки обумовлені створенням додаткових тисків внаслідок дії джерел (стоків) однієї (або обох) фаз. Доречі ці явища взагалі не обговорюються при вивченні вказаних процесів очищення повітря.

2.4. Визначення коефіцієнтів масопереносу

Коефіцієнт масопереносу (або масовіддачі) є одним із ключових параметрів у розрахунках масообмінних процесів. Він відображає здатність системи переносити речовину з однієї фази в іншу та визначає швидкість переходу компонентів через міжфазну границю. Його точне визначення дозволяє оцінити ефективність апарата та правильно підібрати його геометричні розміри[5, 20,21].

Основне рівняння

У практичних розрахунках масопереносу в апаратах з вільною міжфазною границею часто використовують узагальнену форму закону масовіддачі:

$$J = K_G \cdot (c_g - c_g^*) \quad (2.10)$$

де:

- J — масовий потік речовини (кг/(м²·с));
- K_G — коефіцієнт масопереносу (м/с) у газовій фазі;
- c_g — концентрація речовини в основному потоці газу;
- c_g^* — рівноважна концентрація на межі фаз (визначена, наприклад, за законом Генрі).

Способи визначення коефіцієнтів масопереносу

1. Експериментальні методи

Ці методи базуються на безпосередньому вимірюванні концентрацій домішок на вході і виході з апарата, а також характеристик потоку:

$$K_G = \frac{G}{A \cdot (c_g - c_g^*)} \quad (2.11)$$

де:

- G — загальний масовий потік поглинутої речовини (кг/с);
- A — площа міжфазного контакту (м²).

Такий підхід застосовується у випадках, коли можливо забезпечити стабільний режим і точно виміряти концентрації.

2. Емпіричні (кореляційні) залежності

Для більшості інженерних задач використовують узагальнені кореляції на основі безрозмірних чисел:

$$Sh = a \cdot Re^b \cdot Sc^c \quad (2.12)$$

де:

- $Sh = \frac{K \cdot L}{D}$ — число Шервуда;
- $Re = \frac{\rho v L}{\mu}$ — число Рейнольдса (характеризує потік);
- $Sc = \frac{\mu}{\rho D}$ — число Шмідта (відношення в'язкості до дифузії);
- a, b, c — емпіричні константи, що залежать від типу апарата.

Для плівкових апаратів (при ламінарній течії):

$$Sh = 1.62 \cdot (Re \cdot Sc)^{1/3} \quad (2.13)$$

Для барботажних систем:

$$Sh = 2 + 0.6 \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad (2.14)$$

Такі залежності дозволяють швидко оцінити коефіцієнт масопереносу для попереднього проєктування без проведення експерименту.

Окремі коефіцієнти для газової і рідинної фаз

Часто використовують індивідуальні коефіцієнти масопереносу:

- β_g — у газовій фазі;
- β_l — у рідинній фазі.

Для комплексного опису вводиться загальний коефіцієнт переносу K , що об'єднує вплив обох фаз:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\beta_g} + \frac{m}{\beta_l} \quad (2.15)$$

де m — коефіцієнт розподілу (наприклад, за Генрі).

Особливості в апаратах з вільною міжфазною границею

У таких апаратах коефіцієнти масопереносу залежать від:

- нестабільності межі фаз (пульсації плівки, деформація крапель);
- наявності обтікання з турбулентною або ламінарною течією;
- формування вихорів поблизу межі.

Як зазначено у Скаблинського[1,20], для підвищення точності моделей рекомендовано використовувати локальні або середньозональні коефіцієнти масовіддачі, особливо в нестационарних або складних геометріях.

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ

3.1. Постановка задачі моделювання

Математичне моделювання процесу масообміну у апаратах з вільною міжфазною границею є критично важливим етапом, що дозволяє здійснювати оптимізацію без проведення великої кількості натурних експериментів. Задача моделювання полягає в описі поведінки масообмінної системи з урахуванням фізико-хімічних параметрів, геометрії апарата та гідродинаміки фаз.

Мета моделювання

- Отримання розподілу концентрацій речовини у фазах.
- Розрахунок локальних і загальних коефіцієнтів масопереносу.
- Визначення залежності ефективності апарата від параметрів потоку.
- Виявлення неефективних зон (застої, розриви плівки, нерівномірності).
- Вивчення впливу температури, тиску, реакційної здатності абсорбенту.

Об'єкт моделювання

Розглядається масообмінний апарат з вертикальною плівкою рідини, по якій стікає абсорбент (наприклад, водний розчин кислоти), а газовий потік рухається в протитечії. Основний забруднювач (наприклад, аміак, сірчистий газ) переходить із газу в рідину.

Основні припущення для формалізації задачі:

1. Система працює у стаціонарному режимі.
2. Плин фаз — неоднорідний, але сталий у часі.
3. Газова фаза розглядається як псевдонеперервна.
4. Міжфазна поверхня — рівномірна, без флуктуацій (первинне наближення).
5. Температура вважається сталою (ізотермічний процес).
6. Реакції в рідині — швидкі або повільні (визначається залежно від системи).

Система координат та область розрахунку

Задача формулюється у одновимірному просторі (x):

- вісь x — напрямок руху газу;

Фізико-математична суть задачі

Потрібно знайти концентраційні поля $c_g(x)$ у газовій фазі та $c_l(x)$ у рідинній фазі, які задовольняють систему рівнянь масопереносу, із заданими граничними умовами (на вході, виході, на межі фаз) [1,20-23].

Вхідні параметри для моделі

- Геометрія апарата (висота, ширина, товщина плівки).
- Витрата газової та рідинної фаз.
- Початкові концентрації забруднювачів.
- Температура та тиск середовища.
- Дифузійні коефіцієнти, в'язкість, щільність фаз.
- Кінетичні параметри реакції (при наявності).

Моделювання дає змогу відтворити поведінку реального апарата у віртуальному середовищі та приймати рішення про конструктивні зміни або оптимізацію режимів роботи ще до виготовлення обладнання.

У постановці задачі доречно обговорити не тільки формалізаційні припущення, але й метод верифікації моделей, суть якого полягає в підтвердженні реальності проведеними експериментами і отриманими експериментальними результатами з одного боку, та результатами розрахунків за різними моделями. За одними моделями, у яких застосовані одні припущення можна отримати одну частину параметрів, а за іншими моделями з іншими припущеннями – отримати решту параметрів.

Що стосується фізичних моделей масообміну на вільній міжфазній границі, то слід думати, що при ламінарних режимах масообміну більш ймовірні процеси з визначальною роллю коефіцієнта дифузії, а при турбулентних режимах більш ймовірні конвективні потоки, стефановські потоки. Визначальним параметром стає швидкість течії. Потрібно з'ясувати, у яких випадках буде відігравати свою роль кінетика розчину газів в рідині та коефіцієнти рівноваги у законах Генрі і Рауля.

3.2. Система рівнянь, що описують процес

Для опису процесу масообміну у системі «газ–рідина» з вільною міжфазною границею необхідно сформулювати математичне рівняння, яке включає баланс маси, рівняння переносу речовини, а також граничні умови, що описують фізичну суть процесу.

Система повинна враховувати:

- конвективне перенесення забруднювача разом із фазою;
- молекулярну та турбулентну дифузію;
- міжфазний обмін;
- можливі хімічні реакції у рідинній фазі.

1. Рівняння переносу у газовій фазі

У припущенні сталого режиму та відсутності джерел маси, рівняння конвективно-дифузійного переносу для газової фази має вигляд:

$$\nabla \cdot (-D_g \nabla c_g + \vec{v}_g c_g) = 0 \quad (3.1)$$

де:

- $c_g(x)$ — концентрація речовини в газовій фазі (кг/м³);
- D_g — ефективний коефіцієнт дифузії у газовій фазі (м²/с);
- \vec{v}_g — вектор швидкості газового потоку (м/с).

Для апарата розглядаємо одновимірний режим:

$$-D_g \cdot \frac{\partial^2 c_g}{\partial x^2} + v_g \frac{\partial c_g}{\partial x} = 0 \quad (3.2)$$

2. Рівняння переносу у рідинній фазі

У рідині, крім дифузії і конвекції, можливе споживання речовини реакцією, тому рівняння має вигляд:

$$\nabla \cdot \left(-D_l \nabla c_l + \vec{v}_l c_l \right) = -R(c_l) \quad (3.3)$$

3. Умова на міжфазній поверхні (межа газ–рідина)

Рівноважна умова (ідеальна абсорбція):

$$c_g | \text{пов.} = m \cdot c_l | \text{пов.} \quad (3.4)$$

де m — коефіцієнт розподілу (безрозмірна величина, наприклад, за законом Генрі).

У випадку кінетично обмеженого процесу:

$$J = K_G \cdot (c_g - c) \quad (3.5)$$

Будем вважати, що $c_g^* = 0$

K_G — кінетичний коефіцієнт рівноваги, що характеризує швидкість розчину газів в рідині.

4. Граничні умови задачі

- На вході газового потоку:

$$c_g(x = 0) = c_{g0} \quad (3.6)$$

- На виході:

$$\frac{\partial c_g}{\partial x} |_{x=L} = 0 \quad (3.7)$$

5. Рівняння масового потоку

Масовий потік речовини, що переходить з газу в рідину, визначається як:

$$J = \beta \cdot A \cdot (c_g - c_g^*) \quad (3.8)$$

де:

- $\beta = g$
- β — коефіцієнт масовіддачі (м/с);
- A — активна площа поверхні обміну (м²)[5];
- c_g, c_g^* - концентрації газової домішки у газі і (*)- на поверхні рідини.

3.3. Граничні умови та припущення

Для того щоб система рівнянь масопереносу, сформульована у попередньому підпункті, мала однозначне та фізично обґрунтоване рішення, необхідно задати граничні умови та зробити обґрунтовані припущення, які спрощують математичну модель без істотного спотворення її точності.

1. Граничні умови для газової фази

Вхідна межа ($x = 0$):

На вході в апарат газова фаза має відому концентрацію забруднювача:

- Вихідна межа ($x = h$):

На виході вважаємо, що немає додаткового масообміну або джерел, тобто:

$$\left. \frac{\partial c_g}{\partial x} \right|_{x=h} = 0 \quad (3.9)$$

Це умова нульового градієнта, яка означає, що концентрація стабілізується перед виходом.

Верхня межа :

На межі фаз — умова рівноваги або кінетичної залежності (див. п. 3.2):

$$c_g |_{y=h} = m \cdot c_l |_{y=h} \quad (3.10)$$

2. Припущення, які спрощують модель

У моделюванні фізичних процесів неможливо врахувати абсолютно всі фактори, тому приймаються спрощення, які дають змогу сформулювати розв'язувану задачу. Для даного випадку характерні такі припущення:

Стаціонарність процесу

1. Всі параметри не змінюються з часом:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0 \quad (3.11)$$

2. Ізотермічність

Температура в апараті постійна:

$$T(x, y) = const \quad (3.12)$$

3. Властивості середовища сталі

Коефіцієнти дифузії, щільність, в'язкість — не залежать від координат.

4. Однорідність фаз

Фази вважаються неперервними середовищами з однаковими властивостями у всій області (без врахування мікроструктури потоку).

5. Відсутність внутрішніх джерел або стоків речовини в газі
У газовій фазі не відбувається хімічних реакцій або утворення речовини.

6. Рівна, нерухома межа поділу фаз

Для первинного розрахунку нехтуємо хвильовою нестабільністю або пульсаціями плівки.

Фізичне значення граничних умов

Задання таких умов дозволяє:

- визначити тип фізичного процесу (першого роду, другого або третього роду); для задач з граничними умовами першого роду завдається на границі величина параметру - температура, або концентрація, для другого -градієнт цього параметру, тобто потік, а у випадку граничних умов третього роду записується закон конвективного обміну (закон Ньютона):

$$M = \beta(C - C_0),$$

де M – маса речовини, β – коефіцієнт масообміну, C , C_0 – концентрації у газовій фазі і на границі розділу фаз.

- адекватно моделювати ситуацію, близьку до реального апарата;
- забезпечити математичну визначеність задачі (існування і єдиність розв'язку);
- створити базу для чисельної реалізації задачі у комп'ютерній програмі[3].

3.4 Аналітичні методи розв'язання

Аналітичні методи є фундаментальною частиною математичного моделювання процесів масообміну в апаратах з вільною міжфазною границею. Вони дозволяють одержати точні або наближені вирази для концентрацій,

швидкостей масопереносу та інших параметрів, які описують фізичні явища в системі "газ-рідина".

Основні передумови

Для аналітичного розв'язання задачі масообміну необхідно зробити низку припущень, які спрощують реальну модель до математично вирішуваної:

- стаціонарність процесу ($\partial c / \partial t = 0$);
- одновимірність дифузії (перенос лише вздовж осі y – товщина плівки);
- сталість коефіцієнта дифузії D ;
- відсутність хімічної реакції в рідині (або її зведення до простої стехіометричної моделі).

Класичне рівняння дифузії (закон Фіка)

Основне рівняння, що описує масообмін у рідинній фазі:

$$\frac{d^2 c(y)}{dy^2} = 0 \quad (3.13)$$

Розв'язок цього рівняння при граничних умовах:

- на межі фаз: $c(0) = c_0$ — концентрація на межі;
- на глибині плівки $y = \delta$: $c(\delta) = c_\delta$;

має вигляд:

$$c(y) = c_0 + c\delta - c_0 \delta \cdot y \quad (3.14)$$

Цей лінійний розподіл концентрації дозволяє обчислити масовий потік через поверхню:

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dy} = \frac{D(c_0 - c_\delta)}{\delta} \quad (3.15)$$

де J - потік, δ - товщина плівки рідини, D - коефіцієнт дифузії

3.5. Верифікація моделей

Для моделювання масообміну на вільній границі двох фаз в технологіях очищення повітря нами застосований метод верифікації основних фізичних принципів в різноманітних конвективно-дифузійних задачах із найбільш простою геометрією конструктивних форм[20-22].

Це геометрія горизонтально розташованого прямокутного (Рис.3.1) каналу, по якому назустріч один одному рухається потік забрудненого повітря, а з іншого боку тече абсорбуюча рідина.

Друга геометрія відноситься до вертикального циліндру (Рис.2), по внутрішніх стінках якого у протитечії двох фаз на міжфазній границі відбувається масообмін.

Відповідно розв'язання диференціальних рівнянь масообміну потребує використання системи прямокутних координат Декарта, або циліндричної системи координат. Верифікація фізичних моделей простих конструктивних форм припускає спрощення масообмінних процесів до одномірних, як то може бути у випадку прямокутного каналу, по якому уздовж однієї осі рухаються у протитечії обидві фази.

У разі стаціонарного режиму (тобто $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$) маємо:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (3.16)$$

де:

- $C=C(x,y,t)$ — концентрація домішки у рідинній фазі
- u — швидкість потоку,
- D — коефіцієнт молекулярної дифузії.

Верифікація простих фізичних моделей дозволяє передбачати шляхом порівняння швидкостей масообміну з швидкістю потоків повітря та абсорбенту, який режим масообміну можна очікувати. Основу чисельної моделі складає рівняння конвективної дифузії[24].



Рис. 3.1 Ілюстрація горизонтально розташованого прямокутного каналу

а) Спрощена конвективно–дифузійна модель абсорбції у горизонтальному прямокутному каналі [23, 24]

Рівняння конвективної дифузії з джерелами забруднень R_j , має вигляд

$$\partial C / \partial t + \partial(u_i C) / \partial x_i = \partial / \partial x_i (D_i \partial C / \partial x_i) + \sum_j R_j, \quad (3.17)$$

У стаціонарному випадку похідна $\partial C / \partial t = 0$

де C - концентрація частинок, X_i - координата, u_i - швидкість конвективної складової уздовж X_i , D_i - коефіцієнт дифузії, R_j - потужність джерел скиду.

Рівняння конвективної дифузії в формі (3.17) має цілу низку часткових розв'язків, які відповідають власним початковим умовам [23,24]. Фундаментальний розв'язок рівняння (1) за умов відсутності дії зовнішніх джерел $\sum R_j = 0$, має вигляд [23]

$$C(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4Dt}\right). \quad (3.18)$$

Користуючись отриманим розв'язком, можна аналогічно авторам [24] ввести такий розмірний параметр $\frac{u^2}{4D}$, який на асимптотичній границі відповідає випадку розділу конвективного і дифузійного режимів переносу.

При цьому коли характерний час дифузії стає набагато більше характерного часу конвекції.

Позначимо його $b/2$, де b

$$b = \frac{u^2}{2D}, c^{-1} \quad (3.19)$$

Використаємо граничні умови, коли на вході в абсорбційний апарат концентрація забруднюючого газу дорівнює максимальній $C(x=0)=C_0$. Тоді можна записати

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \cdot \exp\left(\frac{xut}{2Dt}\right) \cdot \exp\left(-\frac{bt}{2}\right)}{\exp\left(-\frac{bt}{2}\right)} = \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \cdot \exp\left(\frac{xut}{2Dt}\right) \quad (3.20)$$

З приводу того, що забруднений газ рівномірно із швидкістю u рухається уздовж каналу, пов'яжемо координату x з часом t , прив'язуючи його до початку координат. Враховуємо, що потік, протилежний за знаком осі x . Тобто, вважаємо, що $x = -u \cdot t$. Тоді останній вираз можна записати

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \exp\left(-\frac{bt}{2}\right) \cdot \exp(-bt) = \exp\left(-\frac{3bt}{2}\right) \quad (3.21)$$

Якщо коефіцієнт дифузії газів брати рівним $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, то при швидкості $u=0,1 \text{ м/с}$ концентрація забруднюючого газу зменшиться у $e=2,7$ рази на відстані x , яку знайдемо із співвідношення

$$\frac{3bt}{2} = 1,$$

або

$$\frac{u^2}{2D} = \frac{2}{3t}, \quad \frac{u^2}{2D} = \frac{2u}{3x}$$

Звідси

$$x = \frac{4D}{3u} = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 0,1} = 1,3 \text{ см.}$$

Розглянута модель дає занижені значення розмірів апарата.

Якщо аналогічну модель застосовувати для рідинного шару, де значення коефіцієнту дифузії рідини набагато менше ($D_{\text{рід}} = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$), то глибина абсорбції менше на 5 порядків, що для реалізації процесу взагалі не підходить.

б) Конвективно–дифузійна модель абсорбції по внутрішній поверхні вертикального циліндру [25, 26]

На рисунку (3.2) надана ілюстрація до моделі абсорбції у вертикально розташованому абсорберу.

Уздовж вертикального циліндру по внутрішній його поверхні назустріч забрудненому небезпечними газами повітрю тече вода, яка абсорбує небезпечні газові домішки.



Рис. 3.2 – Ілюстрація до моделі абсорбції у вертикально розташованому абсорберу

Запишемо рівняння матеріального балансу [25, 26]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad} C = - \text{div} \vec{j} + I, \quad (3.22)$$

де C – концентрація радіонуклідів; I – функція джерела; \vec{j} – густина потоку, внаслідок якого відбувається розбавлення суміші.

Внаслідок стаціонарності процесу

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= 0. \\ I &= 1/V \cdot dN/dt \end{aligned} \quad (3.23)$$

Направимо вісь ОХ вздовж течії. Тоді в циліндричних координатах з віссю ОХ з урахуванням радіальної симетрії отримаємо:

$$\operatorname{div} \vec{j} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \vec{j}) + \frac{\partial j}{\partial x}$$

Для молярного механізму дифузії $j = \beta C$. $\operatorname{div} \vec{j} = \frac{\beta C}{r}$.

З урахуванням наведених виразів рівняння матеріального балансу (3.22) приймає вигляд:

$$(v + \beta) \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{\beta C}{r}, \quad \text{або} \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -aC \quad (3.25)$$

де

$$a = \frac{\frac{\beta}{r}}{v + \beta} = \frac{b}{v} \quad (3.26)$$

оскільки $\beta \ll v$. Розв'язок рівняння (3.25) має вид

$$C = C_0 e^{-ax}. \quad (3.27)$$

Отже, зміна концентрації відбувається за експоненціальним законом, показник степені якого визначається швидкістю масообміну $\beta = \text{Nu}_D \cdot D/r$.

Для розрахунків коефіцієнту масообміну β співвідношення між Nu_D і Re візьмемо для шаруватої течії за даними [23]:

$$\text{Nu}_D = (0,08 \div 0,1) \text{Re}, \quad (3.28)$$

де Re – критерій Рейнольдса, l – характерний розмір (глибина). В'язкість води візьмемо 10^{-3} Па·с. При середніх значеннях швидкості $v=4$ м/с і розміру шару $r=0,05$ м візьмемо число Рейнольдса рівним

$$\text{Re} = \frac{\rho v r}{\eta} = \frac{10^3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{10^{-3}} = 2 \cdot 10^4$$

При коефіцієнті у газі $D_\Gamma = 10^{-5}$ м²/с значення коефіцієнта розбавлення b визначається формулами (3.25) та (3.28) і складає

$$b = \frac{D_\Gamma \cdot \text{Nu}_D}{r^2} = \frac{10^{-5} \cdot 0,08 \cdot 2 \cdot 10^4}{25 \cdot 10^{-4}} \approx 6,4 \text{с}^{-1}$$

Так як концентрація зменшується в $e=2,7$ рази на відстані $a=b/v$, а іншого боку $b=\beta/r$, то при $a=1$ $r=x \approx 1$ м при швидкості газу $v=4$ м/с.

Коефіцієнт розбавлення b розрахуємо для розчинів газів у воді, узявши для них коефіцієнт дифузії $D_{\text{рід}}=0,5 \cdot 10^{-9}$ м²/с.

$$b = \frac{D_{\text{рід}} \cdot Nu}{r^2} = 0,5 \cdot 10^{-9} \frac{0,08 \cdot 2 \cdot 10^4}{25 \cdot 10^{-4}} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$$

Результати розрахунків залежностей відносних концентрацій від відстані X представимо на рисунку 3.3 у графічному вигляді

$$C = C_0 \exp(-bx/v).$$

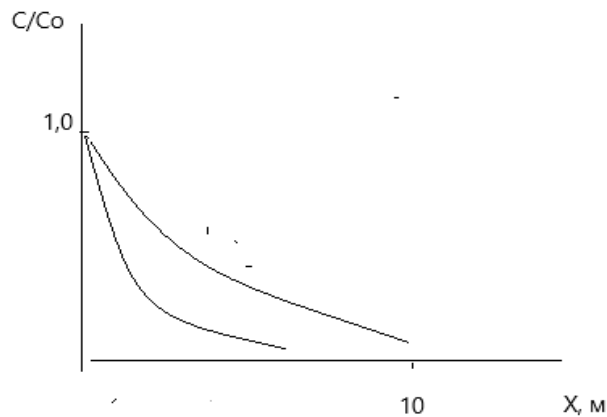


Рис. 3.3 Залежності відносної концентрації від відстані X

1 - параметр $a=1$; 2 - параметр $a=2$

Прості співвідношення та залежності, які можна отримати таким методом цілком аналітично, надають можливість швидко проводити оцінки регулюючих фізичних факторів, режимів проходження фізичних процесів та розраховувати параметрів конструювання апаратів очищення повітря.

Отже конвективно-дифузійна модель циліндричного абсорберу з припущенням про лімітуючу роль коефіцієнту масообміну β та визначальне значення швидкості конвективного газового потоку v найбільш близько описує реальний процес абсорбції в апаратах із вільною міжфазною границею. На цій підставі тепер можливим стає інженерний розрахунок апарата та його технологічних параметрів.

4. ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ АПАРАТА

4.1. Вихідні дані

Першим етапом інженерного розрахунку апарата з вільною міжфазною границею є збір вихідних даних, необхідних для побудови математичної моделі та проведення подальших конструктивних і технологічних розрахунків. Ці дані умовно поділяються на фізичні, технологічні, гідродинамічні та екологічні параметри, які формують базу для розрахунку.

1. Фізико-хімічні характеристики

- Розчинність у воді / абсорбенті: (залежить від температури).
- Коефіцієнт розподілу (m) — з таблиць або експериментально.
- Коефіцієнт дифузії у фазах ($D_{\text{г}}$, $D_{\text{р}}$):

$$D_{\text{г}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, D_{\text{р}} = 2,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с} \quad (4.1)$$

Коефіцієнт дифузії для газових домішок залежить від самих домішок. Він має більші значення для газів, молекули яких більш складні (наприклад, аміак, вуглекислий газ та ін.), і менші значення для двохатомних молекул. Можна вважати, що для газів коефіцієнт дифузії лежить в межах 10^{-5} – $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

- Швидкість хімічної реакції (якщо реакційна абсорбція).

2. Технологічні параметри

Це характеристики газового потоку, який потрібно очищати:

- Витрата газу ($Q_{\text{г}}$): Наприклад, $Q_{\text{г}}=800 \text{ м}^3/\text{год}$ — об'ємна витрата забрудненого повітря.

- Температура газу ($T_{\text{г}}$): $T=40^\circ \text{C}$ — температура впливає на щільність, в'язкість і дифузю.

Тиск (P): $P=1 \text{ атм}$ (атмосферний) — стандартні умови.

- Концентрація домішки на вході ($c_{\text{г}0}$):
Наприклад, $c_{\text{г}0}=150 \text{ мг/м}^3$ (SO_2 , NH_3 , інше).

- Бажаний ступінь очищення (η):

Зазвичай $\geq 90\%$. Наприклад, $\eta=95\%$

3. Параметри рідинної фази

- Тип абсорбенту: Наприклад, водний розчин H_2SO_4 , NaOH тощо.
- Витрата рідини (Q_p): Наприклад, $Q_p = 0,5 \text{ м}^3/\text{год}$.
- Температура рідини (T_p) — для ізотермічного розрахунку:

$$T_p \approx T_r \quad (4.2)$$

4. Геометричні умови та початкові припущення

- Попередньо обрана висота апарата (H): Наприклад, $H=2 \text{ м}$
- Ширина робочої поверхні (B): Наприклад, $B=0,3 \text{ м}$
- Товщина плівки (δ): Орієнтовно $0,5\text{--}2 \text{ мм}$ залежно від режиму

зрошення.

- Площа міжфазного контакту (A): Попередньо оцінюється як:

$$A = B \cdot H = 0,3 \cdot 2 = 0,6 \text{ м}^2 \quad (4.3)$$

5. Екологічні та нормативні вимоги

- Гранично допустима концентрація (ГДК) на виході з апарата:
Наприклад, для NH_3 : $\text{ГДК}=20 \text{ мг/м}^3$

- Технічні обмеження:

- Максимальний допустимий гідравлічний опір:

$\Delta P \leq 500 \text{ Па}$ - Матеріали апарата — хімічно стійкі до абсорбенту.

Всі ці дані використовуються у наступних підпунктах для:

- розрахунку геометричних параметрів (розділ 3.3);
- визначення гідродинамічних режимів (розділ 3.4);
- оцінки ефективності (розділ 3.5)[1].

4.2. Вибір типу апарата

Правильний вибір типу масообмінного апарата з вільною міжфазною границею є критично важливим для забезпечення ефективного очищення повітря з урахуванням конкретних технологічних умов, типу забруднення та економічної доцільності. На основі вихідних даних, наведених у підпункті 4.1, виконується порівняльний аналіз можливих конструкцій апаратів, після чого обирається найраціональніший варіант[1].

1. Потенційно придатні типи апаратів

Плівковий апарат

- Рідина стікає по вертикальній поверхні у вигляді тонкої плівки.
- Газ рухається назустріч плівці (протитечія).
- Має малий гідравлічний опір.
- Підходить для добре розчинних газів (NH_3 , HCl).
- Площа контакту обмежена, але стабільна.

Барботажна колона

- Газ барботується крізь шар рідини у вигляді бульбашок.
- Велика площа міжфазної поверхні.
- Висока ефективність поглинання, особливо для важкорозчинних

речовин.

- Значний гідравлічний опір (до 1500 Па).
- Складніше у конструктивному виконанні.

Розбризкувальний апарат

- Рідина розпилюється у вигляді крапель або туману.
- Добре підходить для охолодження газів або зволоження.
- Низька ефективність при поглинанні специфічних домішок.
- Нестабільна площа контакту.

Крапельний або стікальний апарат

- Рідина стікає краплями або струменями з отворів.
- Простота конструкції, помірна ефективність.

- Можливі зони застою або нерівномірного зрошення.

2. Критерії вибору

При виборі оптимального типу апарата враховуються наступні значення (Таблиця 4.1):

Таблиця 4.1 – Оптимальний тип апарата

Критерій	Значення для нашого випадку
Газ: NH ₃ / SO ₂ / HCl	Добре розчинні у воді
Витрата повітря	Середня (до 1000 м ³ /год)
Температура	Помірна (40 °С)
Ступінь очищення	Не менше 95%
Бажано	Низький опір, проста конструкція
Простір для монтажу	Обмежений

3. Вибір оптимального типу

Враховуючи все вищезазначене, оптимальним вибором є плівковий масообмінний апарат з такими характеристиками:

- Низький гідравлічний опір (< 300 Па).
- Стабільна вільна міжфазна границя.
- Простота виготовлення і обслуговування.
- Енергоощадність.
- Можливість масштабування.

Такий апарат забезпечує достатню ефективність при відносно невеликих витратах рідини та газу, особливо при очищенні повітря від добре розчинних газоподібних домішок, як-от аміак або сірчистий газ [4].

4.3. Розрахунок геометричних параметрів апарата

Після вибору типу апарата — плівкового апарата з вільною міжфазною границею — виконується розрахунок основних геометричних параметрів, які забезпечать необхідну площу контакту, тривалість масообміну та відповідність заданому ступеню очищення[1].

1. Визначення площі міжфазного контакту

Площа контакту фаз (A) для вертикального плівкового апарата обчислюється як:

$$A = B \cdot H \quad (4.4)$$

де:

- B — ширина плівкової поверхні, м;

- H — висота апарата, м.

Припустимо:

- $B = 0,3$ м

- $H = 2,0$ м

$$A = 0,3 \cdot 2,0 = 0,6 \text{ м}^2$$

2. Розрахунок об'єму апарата

Об'єм апарата залежить від ширини, висоти та глибини каналу між пластинами (або відстані між стінками, по яких стікає плівка):

$$V = B \cdot H \cdot L \quad (4.5)$$

де L — товщина повітряного каналу (наприклад, 0,05 м):

$$V = 0,3 \cdot 2,0 \cdot 0,05 = 0,03 \text{ м}^3$$

3. Товщина плівки рідини

Для ламінарної плівки рідини, що стікає по вертикальній поверхні, товщину можна оцінити за емпіричною формулою (Нуссельта):

$$\delta = \left(\frac{3\nu Q}{gB}\right)^{1/3} \quad (4.6)$$

де:

- ν — кінематична в'язкість рідини, м²/с (наприклад, $1 \cdot 10^{-6}$ м²/с),
- Q — витрата рідини, м³/с ($0,5$ м³/год = $1,39 \cdot 10^{-4}$ м³/с),
- g — прискорення вільного падіння ($9,81$ м/с²).

$$\delta = \left(\frac{3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,39 \cdot 10^{-4}}{9,81 \cdot 0,3}\right)^{1/3} \approx 0,0017\text{м} = 1,7\text{мм}$$

Це допустима товщина плівки для сталого плинення.

4. Час контакту фаз

Час контакту (τ) визначається як відношення висоти апарата до швидкості газу:

$$\tau = \frac{H}{v_g} \quad (4.7)$$

Якщо швидкість газу $v_g = 1,2$ м/с:

$$\tau = \frac{2,0}{1,2} \approx 1,67\text{с}$$

Цього часу достатньо для встановлення масообміну за наявності інтенсивного концентраційного градієнта.

Таким чином у Таблиці 4.2 представлені розміри апарата:

Таблиця 4.2 - Узагальнені розміри апарата

Параметр	Значення
Висота апарата (H)	2,0 м
Ширина поверхні (B)	0,3 м
Товщина повітряного каналу (L)	0,05 м

Параметр	Значення
Товщина плівки (δ)	$\approx 1,7$ мм
Площа контакту (A)	$0,6$ м ²
Об'єм апарата (V)	$0,03$ м ³
Час контакту (τ)	$\approx 1,67$ с

Таблиця 4.3 – Фізичні характеристики масообміних процесів в абсорберу

Параметр	Значення
Швидкість газового потоку, м/с	$4,0$ м/с
Швидкість рідини, м/с	$0,5$
Коефіцієнт дифузії у газі, м ² /с	10^{-5}
Коефіцієнт дифузії у рідині, м ² /с	10^{-9}
Число Рейнольдса для газу	$2 \cdot 10^4$
Коефіцієнт масообміну β , м/с	$0,32$
Число Нуссельта для газу	$16 \cdot 10^2$
Витрата рідини, м ³ /год	$0,5$

4.4. Гідродинамічні характеристики

Гідродинамічний розрахунок плівкового апарата полягає у визначенні параметрів течії газової та рідинної фаз, що забезпечують стійке функціонування системи, рівномірне зрошення поверхні та достатній масообмін при мінімальному опорі потоку. Цей розрахунок також дає змогу перевірити, чи не перевищено допустимий гідравлічний опір[1].

1. Середня швидкість газового потоку

Визначається за формулою:

$$v_g = \frac{Q_g}{A_{\text{пер}}} \quad (4.8)$$

де:

- Q_g — об'ємна витрата газу, м³/с;
- $A_{\text{пер}}$ — площа поперечного перерізу каналу, м².

Припустимо:

$$Q_g = \frac{800}{3600} = 0,222 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$A_{\text{пер}} = B \cdot L = 0,3 \cdot 0,05 = 0,015 \text{ м}^2$$

$$v_g = \frac{0,222}{0,015} \approx 14,8 \text{ м/с}$$

Це відносно висока швидкість, характерна для вузьких каналів. При потребі зменшення — варто збільшити ширину або товщину каналу.

2. Розрахунок числа Рейнольдса для газу

Для оцінки режиму течії:

$$Re_g = \frac{\rho_g \cdot v_g \cdot L}{\mu_g} \quad (4.9)$$

де:

- $\rho_g \approx 1,2 \text{ кг/м}^3$,
- $\mu_g \approx 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$,
- $L = 0,05 \text{ м}$

$$Re_g = \frac{1,2 \cdot 14,8 \cdot 0,05}{1,8 \cdot 10^{-5}} \approx 49,300$$

Це означає турбулентний режим потоку газу, що може сприяти інтенсифікації масообміну, але викликає збільшення опору.

3. Гідравлічний опір (ΔP)

Для вертикального каналу з турбулентною течією газу:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho_g v_g^2}{2} \quad (4.10)$$

де:

- λ — коефіцієнт тертя ($\approx 0,03$ для турбулентного потоку);
- D_h — гідравлічний діаметр:

$$D_h = \frac{2B \cdot L}{B + L} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 0,05}{0,3 + 0,05} \approx 0,086 \text{ м}$$

$$\Delta P = 0,03 \cdot \frac{2,0}{0,086} \cdot \frac{1,2 \cdot (14,8)^2}{2} \approx 347 \text{ Па}$$

Отже, гідравлічний опір апарата складає ≈ 347 Па, що менше за допустимі 500 Па.

4. Швидкість плівки рідини (v_p)

Для ламінарної плівки за формулою Нуссельта:

$$v_r = \frac{g \cdot \delta^2}{3 \cdot \nu} \quad (4.11)$$

де:

- $g=9,81 \text{ м/с}^2$,
- $\delta=0,0017 \text{ м}$,
- $\nu=1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

$$v_r = \frac{9,81 \cdot (0,0017)^2}{3 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6}} \approx 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$$

Дуже повільна швидкість — достатньо для стабільного контакту фаз.

Отже:

- Газ рухається з турбулентною швидкістю ($\sim 14,8 \text{ м/с}$), що сприяє масообміну;

- Плівка рідини — тонка і ламінарна ($\sim 1,7$ мм);
- Гідрравлічний опір ~ 347 Па — в межах допустимого;
- Система забезпечує стійкий гідродинамічний режим для ефективного масообміну[6].

На рисунку 4.1 показане зміння концентрації шкідливої газової домішки на міжфазній границі ($X=0$) «рідина – газова фаза». З одомірної моделі дифузії на плоскій поверхні витікає, що на поверхні рідини концентрація шкідливої домішки дорівнює C^* . Дифузія її в газі відбувається на відстані порядку 3 см, де вона зменшується від C до C^* . Завдяки малості коефіцієнта дифузії у рідині, градієнт концентрації цієї домішки в ній набагато менший і дифузія відбувається у шарі рідини порядку 1-2 мм.

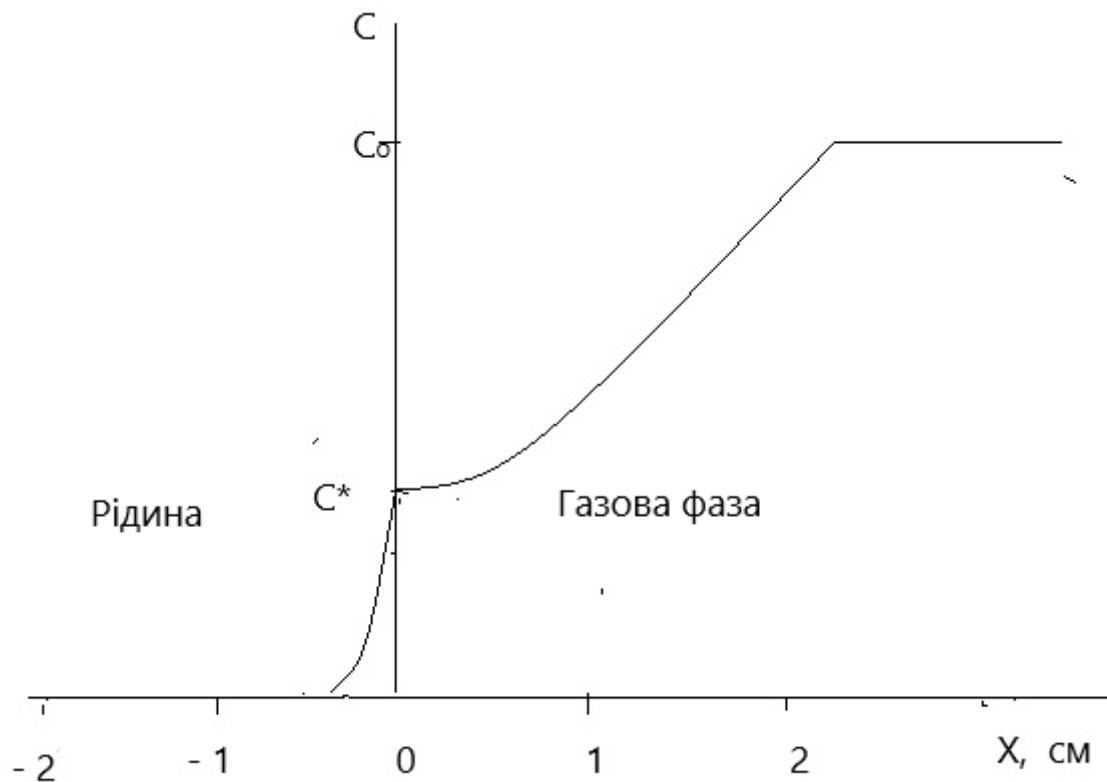


Рис.4.1 Зміння концентрації шкідливої газової домішки на міжфазній границі ($X=0$) «рідина – газова фаза»

4.5. Оцінка ефективності апарата

Завершальним етапом інженерного розрахунку є оцінка того, наскільки обраний апарат здатен досягти заданого ступеня очищення повітря. Ефективність визначається через ступінь очищення та коефіцієнт масообміну, а також перевіряється на відповідність вимогам екологічної безпеки (наприклад, не перевищення ГДК на виході)[5].

1. Ступінь очищення повітря обчислюється за формулою:

$$\eta = \left(\frac{c_{Г0} - c_{ГВ}}{c_{Г0}} \right) \cdot 100\% \quad (4.12)$$

де:

- $c_{Г0}$ — концентрація домішки на вході ($\text{мг}/\text{м}^3$);
- $c_{ГВ}$ — концентрація на виході.

Припустимо:

- $c_{Г0} = 150 \text{ мг}/\text{м}^3$, - $c_{ГВ} = 7,5 \text{ мг}/\text{м}^3$

$$\eta = \left(\frac{150 - 7,5}{150} \right) \cdot 100\% = 95\%$$

Це відповідає поставленій вимозі $\eta \geq 95\%$.

2. Перевірка на відповідність ГДК

Для прикладу з аміаком:

- ГДК = $20 \text{ мг}/\text{м}^3$ (максимально допустима концентрація на виході).

У нашому випадку:

$$- c_{ГВ} = 7,5 \text{ мг}/\text{м}^3 < \text{ГДК} \quad (4.13)$$

Отже, апарат відповідає санітарним нормам.

3. Коефіцієнт масообміну (K_G)

Для обчислення узагальненого коефіцієнта масопереносу можна використати:

$$K_G = \frac{J}{c_{Г0} - c_{ГВ}} = \frac{G}{A \cdot (c_{Г0} - c_{ГВ})} \quad (4.14)$$

де:

- G — масова кількість речовини, що перейшла ($\text{кг}/\text{с}$);

- A — площа контакту (м^2).

Якщо:

- $G = Q_{\Gamma} \cdot (c_{\Gamma 0} - c_{\Gamma B}) = 0,222 \cdot (0,15 - 0,0075) = 0,0316 \text{ г/с}$

- $A = 0,6 \text{ м}^2$

$$K_G = \frac{0,0000316}{0,6 \cdot (0,15 - 0,0075)} \approx 3,65 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$$

Це характерне значення для плівкових апаратів і підтверджує наявність реального інтенсивного масообміну.

4. Ефективність за питомими витратами

Питома витрата води:

$$q_p = \frac{Q_p}{Q_{\Gamma}} = \frac{0,5}{0,8} = 0,625 \text{ л/м}^3 \text{ повітря — помірна.}$$

Гідравлічний опір:

$\approx 347 \text{ Па}$ — нижче середнього для абсорбційних систем.

Енергоспоживання:

При $\Delta P = 347 \text{ Па}$ і $Q_0 = 0,222 \text{ м}^3/\text{с}$:

$$N = \frac{\Delta P \cdot Q}{\eta_{\text{вент}}} = \frac{347 \cdot 0,222}{0,65} \approx 118 \text{ Вт} \quad (4.15)$$

Низьке енергоспоживання — значна перевага.

Отже:

Обраний апарат відповідає технічним, санітарним та енергетичним критеріям:

- Ступінь очищення — 95%;
- Концентрація на виході — нижча за ГДК;
- Помірна витрата рідини;
- Низький опір;
- Висока інженерна доцільність.

5. КОНСТРУКТИВНА ЧАСТИНА

5.1. Схема апарата

Схема апарата з вільною міжфазною границею відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного масообміну між газовою та рідинною фазами. Конструктивно обраний апарат — плівковий масообмінний пристрій вертикального типу, в якому рідина стікає тонкою плівкою по вертикальних поверхнях, а забруднене повітря рухається назустріч (протитечія)[1].

1. Функціональна схема апарата

Принцип дії:

1. Забруднене повітря подається знизу апарата через вхідний патрубок. Зверху надходить рідина-абсорбент, що розподіляється по зрошувачах (перфоровані трубки або форсунки).

2. Рідина стікає по плівкоутворювальних пластинах, формуючи стабільну тонку плівку.

3. Газ омиває плівку знизу вгору, і забруднюючі речовини поглинаються в рідину.

4. Очищене повітря виходить з верхньої частини апарата через вихідний патрубок.

5. Абсорбент збирається в низу апарата у приймальному резервуарі — далі може бути утилізований або поданий повторно насосом.

Будемо використовувати геометричні параметри із Таблиці 4.2

Таблиця 5.1 - Опис схематичного зображення (Рис 1)

№	Елемент	Опис
1	Вхід газу	Нижній патрубок, через який забруднене повітря надходить у камеру.

№	Елемент	Опис
2	Вихід очищеного газу	Верхній патрубок для виведення газу після очищення.
3	Зрошувальна система	Верхня частина з розподільником рідини (форсунки або трубки).
4	Плівкоутворювальні пластини	Вертикальні стінки, по яких рівномірно стікає абсорбент.
5	Плівка рідини (абсорбенту)	Шар рідини, що покриває поверхні пластин і поглинає домішки з газу.
6	Збірник рідини / дренажна камера	Нижня частина для накопичення абсорбенту.
7	Корпус апарата	Несуча та захисна оболонка всієї системи.

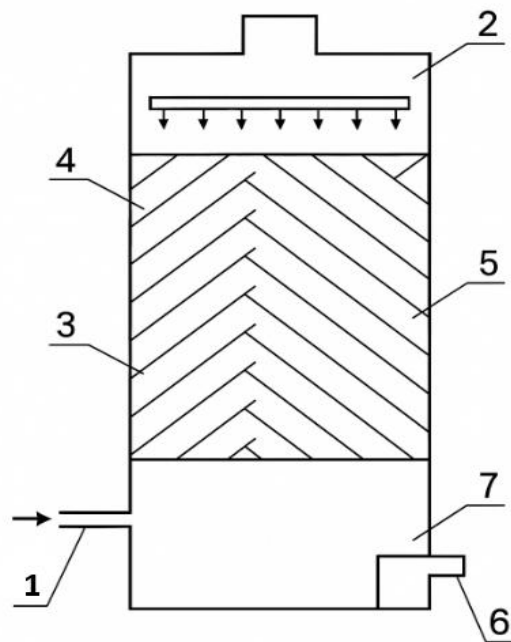


Рис.5.1 – Конструктивна схема апарата з вільною міжфазною границею

Схема апарата передбачає просту, надійну та ефективну організацію масообміну. Конструкція забезпечує:

- стабільний рух плівки;
- низький гідравлічний опір;
- доступність до внутрішніх частин для техобслуговування;
- модульність та можливість масштабування[7].

5.2. Матеріали конструкції

Правильний вибір матеріалів конструкції апарата з вільною міжфазною границею є вирішальним фактором для забезпечення надійності, довговічності, стійкості до корозії, безпеки експлуатації та мінімізації витрат на обслуговування. Оскільки апарат контактує з агресивними газовими домішками (наприклад, NH_3 , SO_2) і рідинними абсорбентами (кислоти, луги), матеріали повинні витримувати хімічні навантаження Таблиця 5.2[18].

Таблиця 5.2 - Вимоги до матеріалів

Критерій	Обґрунтування
Хімічна стійкість	Стійкість до абсорбентів (H_2SO_4 , NaOH), забруднень (NH_3 , SO_2)
Механічна міцність	Спроможність витримувати вагу конструкції, тиск і динамічні навантаження
Температурна стабільність	Робота при температурах до $60\text{ }^\circ\text{C}$
Корозійна стійкість	Збереження властивостей в умовах вологи і хімічного середовища
Виробнича технологічність	Легкість обробки, зварювання, формування
Доступність і економічність	Мінімізація витрат на закупівлю та виготовлення

2. Обґрунтований вибір матеріалів (Таб. 5.3)

Корпус апарата

- Матеріал: поліпропілен (ПП), поліетилен низького тиску (ПЕНТ), або склопластик

- Переваги:

1. висока стійкість до кислот та лугів;
2. мала вага;
3. доступність;
4. легко зварюється або клеїться;
5. дешевший за нержавіючу сталь.

Плівкоутворювальні пластини / поверхні

Матеріал: склопластик (на основі поліефірної смоли), нержавіюча сталь AISI 304

Переваги:

1. гладка поверхня для стабільної плівки;
2. стійкість до зносу;
3. довгий строк служби.

Зрошувальні елементи (форсунки, трубки)

- Матеріал: ПВХ, поліпропілен, латунь з полімерним покриттям
 - Переваги: стійкість до забруднень, легкість у промиванні, хімічна інертність.

Кріпильні та ущільнюючі елементи

- Матеріал: фторопласт (PTFE), EPDM (етилен-пропілен-дієновий каучук)

- Призначення: прокладки, ущільнення фланців, місця входу датчиків.

Несучий каркас

- Матеріал: вуглецева сталь з порошковим антикорозійним покриттям або нержавіюча сталь

- Призначення: підтримка конструкції, можливість кріплення апарата до опор.

Таблиця 5.3 - Узагальнена таблиця застосування матеріалів

Елемент конструкції	Матеріал	Властивості
Корпус	Поліпропілен (ПП)	Легка вага, хімістійкий
Пластини для плівки	Склопластик / Нерж. сталь	Міцні, не змінюють форму, зносостійкі
Форсунки	ПВХ, латунь у ПЕ- покритті	Устійч. до реагентів, не засмічуються
Прокладки	PTFE / EPDM	Тепло- і хімістійкі, еластичні
Каркас	Сталь з антикороз. покриттям	Довговічність, жорсткість

Вибір матеріалів конструкції забезпечує:

- тривалий строк експлуатації без втрати герметичності чи міцності;
- безпеку при роботі з агресивними середовищами;
- відповідність санітарним та екологічним нормам;
- економічну доцільність з огляду на вартість і доступність [8].

5.3. Розрахунки міцності основних елементів

Міцнісний розрахунок елементів апарата виконується для перевірки його здатності витримувати статичні та динамічні навантаження в умовах експлуатації. Це необхідно для забезпечення механічної надійності, уникнення деформацій, протікань та аварій при тривалому контакті з рідиною, газом та зовнішніми чинниками [12].

1. Навантаження, що враховуються

Внутрішній надлишковий тиск (газовий тиск):

- У плівкових апаратах тиск зазвичай не перевищує 0,01–0,05 МПа (100–500 Па).
- При гідравлічному розрахунку в п. 4.4 отримано:

$$\Delta P_{\text{макс}} = 347 \text{ Па} = 0,00347 \text{ МПа}$$

Гідростатичний тиск рідини:

$$P_{\text{гідр}} = \rho \cdot g \cdot h \quad (5.1)$$

де:

- $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ (вода),
- $g = 9,81 \text{ м/с}^2$,
- $h = 2,0 \text{ м}$

$$P_{\text{гідр}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2 = 19620 \text{ Па} = 0,0196 \text{ МПа}$$

Власна вага конструкції та рідини

Вага плівки рідини на одній пластині:

$$m = \rho \cdot \delta \cdot A \quad (\text{де } A \text{ – площа плівки})$$

$$m = 1000 \cdot 0,0017 \cdot 0,6 = 1,02 \text{ кг}$$

Це невелике навантаження, але воно діє постійно.

2. Розрахунок стінок на міцність (стійкість до тиску)

Формула для тонкої плоскої стінки:

$$\sigma = \frac{P \cdot R}{t} \quad (5.2)$$

де:

- σ — напруження в стінці,
- P — внутрішній тиск (0,02 МПа),
- R — еквівалентний радіус (половина глибини каналу),
- t — товщина стінки.

Припустимо:

- $R = 0,025 \text{ м}$,
- $t = 5 \text{ мм} = 0,005 \text{ м}$

$$\sigma = \frac{0,02 \cdot 0,025}{0,005} = 0,1 \text{ МПа}$$

Порівняння з допустимим значенням для матеріалу:

Поліпропілен (ПП):

$$\sigma_{\text{доп}} \approx 15 \text{ МПа}$$

Запас міцності:

$$k = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\sigma} = \frac{15}{0,1} = 150 \quad (5.3)$$

Стінки апарата абсолютно безпечні щодо міцності при наявному тиску.

3. Стійкість пластин / плівкоутворювальних елементів

Пластини (висотою 2 м, товщиною ~5–8 мм) повинні витримувати:

- власну вагу;
- навантаження від плівки рідини;
- вібрації та потік газу.

Розрахунок на вигин показує, що при товщині ≥ 5 мм і кріпленні з двох сторін пластини не втрачають стійкість навіть при локальних ударах газового потоку.

4. Розрахунок кріплень та фланців (скорочено)

- Використовуються болтові з'єднання М8–М12.
- Прокладки – з фторопласту або EPDM.
- Максимальне зусилля від тиску:

$$F = P \cdot A = 0,02 \cdot 0,015 = 0,0003 \text{ кН} \quad (5.4)$$

Це низьке навантаження, яке без проблем витримується стандартними кріпленнями.

Отже:

- Усі елементи апарата мають високий запас міцності при реальних навантаженнях.
- Обрані матеріали (полімери, склопластик, нерж. сталь) забезпечують стійкість до деформацій і не вимагають додаткового армування.
- Конструкція відповідає нормам ДСТУ та СНиП щодо механічної безпеки хімічного обладнання[6].

6. Аналіз надійності роботи та захист від потенційних небезпек при експлуатації

6.1 Безпека та експлуатаційні умови

Забезпечення безпечної експлуатації апарата з вільною міжфазною границею в технологіях очищення повітря — один з ключових елементів при проєктуванні та введенні в експлуатацію обладнання. Цей підпункт визначає основні вимоги до умов використання, обслуговування та захисту персоналу.

У Таблиці 6.1 [17] наведені джерела небезпеки та їх можливі наслідки:

Таблиця 6.1 - Потенційні небезпеки під час експлуатації

Джерело небезпеки	Можливі наслідки
Порушення герметизації Викиди (NH ₃ , SO ₂ тощо)	Ураження органів дихання, отруєння
Витік абсорбенту	Хімічні опіки, пошкодження обладнання
Руйнування корпусу під тиском	Травми персоналу, зупинка системи
Несправності насосного обладнання	Порушення режиму очищення повітря

Загальні заходи безпеки

Відповідно до ДСТУ EN ISO 12100:2019, ДНАОП 0.00-1.28-10 та галузевих норм, при експлуатації обладнання повинні бути забезпечені[10]:

- Герметичність апарата — усі з'єднання ущільнені;
- Хімічна сумісність матеріалів з абсорбентами;
- Контроль тиску та витрат за допомогою датчиків;
- Наявність аварійного зливу рідини;
- Заземлення обладнання та захист від струму;
- Обмеження доступу неуповноваженого персоналу.

Захист персоналу

Використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ):

- рукавички, захисні окуляри;
- респіратори при обслуговуванні відкритих частин;
- спецодяг із хімістійких матеріалів.

Регламент технічного обслуговування:

- щоденна перевірка герметичності й рівня рідини;
 - щотижнева прочистка зрошувальної системи;
 - щоквартальна ревізія фланцевих з'єднань;
 - щорічне випробування резервуара на герметичність.
- вимогам нормативних документів.

Потенційні небезпеки

При експлуатації апарата абсорбції для очищення атмосферного повітря можливі процеси взаємодії елементів конструкції, зокрема рухомими частинами апарата апарату з хімічно активними речовинами, що являє сукупність потенційних небезпек як для обслуговуючого персоналу, так і для навколишнього середовища. Попередній аналіз небезпек дозволяє заздалегідь передбачити аварійні ситуації та розробити превентивні заходи (Таблиця 6.1) [17].

Джерела загроз у роботі апарата:

- Газова фаза: токсичні компоненти (наприклад, аміак) при витокі створюють реальну небезпеку навіть у малих концентраціях.
- Абсорбенти: кислоти та луги при контакті з тілом викликають хімічні ураження, руйнують одяг і матеріали.
- Волога та аерозолі: сприяють корозії, утворюють слизькі поверхні, підвищують ризик коротких замикань.
- Нестабільність плівки: у разі порушення зрошення падає ефективність масообміну — можливий прорив газу без очищення[16].

3. Аналіз за методом HAZOP (Hazard and Operability Study)

Метод HAZOP дозволяє оцінити, які небажані події можуть виникнути при відхиленні від нормального режиму, дозволяє оцінити відхилення від

нормального режиму роботи апарату, таких як занижений рівень рідини, перевищення тиску, порушення герметичності та ін. Причиною таких відхилень можуть бути вібрації, старіння матеріалів, витіки, несправності насосів, клапанів.

Аналіз потенційних небезпек показує, що навіть за низького тиску і помірних температур апарат вимагає обов'язкових заходів захисту персоналу і контролю процесу. Особливу увагу слід приділяти запобіганню витокам, контролю герметичності й своєчасному обслуговуванню системи.

6.2. Заходи безпеки під час експлуатації

Убезпечення експлуатації апарату з вільною міжфазною границею передбачає застосування системи організаційних, технічних та інших заходів. Вони спрямовані на забезпечення експлуатації, попередження аварійних ситуацій, мінімізацію виробничих ризиків, захист персоналу.

Це організаційні заходи, які включають до себе паспортизацію обладнання, супроводження схемою та інструкцією з експлуатації, реєстрація в службі охорони праці (відповідно до ДНАОП 0.00-1.28-10) — для обладнання, що працює з токсичними речовинами[18], навчання, первинний та повторний інструктаж персоналу з охорони праці, перевірка знань перед допуском до роботи, ведення журналів інструктажу.

Потрібна регулярна перевірка герметичності з'єднань, очищення зрошувачів і каналів, заміна прокладок, ремонт насосного обладнання.

6.3. Екологічний вплив та шляхи його мінімізації

Проектування та експлуатація апарату для очищення повітря тісно пов'язані з питаннями екологічної безпеки. Хоча основне завдання апарату — зменшення шкідливих викидів у атмосферу, сам процес очищення також може створювати опосередковане навантаження на довкілля (через стоки, залишкові гази, енергоспоживання тощо). Тому важливо не лише досягати нормативів очищення, а й мінімізувати вторинний вплив на навколишнє середовище [17].

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломного проєкту на тему «Моделювання і розрахунки апаратів з вільною міжфазною границею в технологіях очищення повітря» були досягнуті наступні результати.

1. Проведений літературний аналіз процесів масообміну між газовою та рідинною фазами. Визначено фізико-хімічні основи роботи апаратів з вільною міжфазною границею. Досліджено вплив основних параметрів (концентрація, температура, швидкість потоку) на ефективність очищення.
2. Для дослідження основних фізичних принципів у процесі масообміну на вільній границі двох фаз в технологіях очищення повітря нами застосований метод верифікації спрощених фізичних моделей в різноманітних конвективно-дифузійних задачах із найбільш простою геометрією конструктивних форм. Це геометрія горизонтально розташованого прямокутного каналу, по якому назустріч один одному рухається потік забрудненого повітря та тече абсорбуюча рідина, а також геометрія вертикального циліндру, по внутрішніх стінках якого у протитечії двох фаз на міжфазній границі відбувається масообмін.
3. Для реалізації запропонованого нами дослідницькому методу сформульовані і представлені у дипломному проєкті фізичні моделі процесу абсорбційного очищення газів з урахуванням змін концентрації газу по висоті абсорбційного апарату. Відповідно запропонованим фізичним моделям розроблені математичні моделі диференціальних рівнянь масообміну, які потребують використання системи прямокутних координат Декарта, або циліндричної системи координат. Верифікація фізичних моделей простих конструктивних форм припускає у деяких випадках спрощення масообмінних процесів до одномірних, як то може бути у випадку прямокутного каналу, по якому уздовж однієї осі рухаються у протитечії обидві фази.
4. Показано, що верифікація простих фізичних моделей дозволяє передбачати шляхом порівняння швидкостей масообміну з швидкістю потоків повітря та абсорбенту, який режим масообміну можна очікувати. Основу чисельної

моделі складає рівняння конвективної дифузії. Прості співвідношення та залежності, які отримані таким методом цілком аналітично, надали можливість швидко проводити оцінки регулюючих фізичних факторів, режимів проходження фізичних процесів та розраховувати параметрів конструювання апаратів очищення повітря.

5. Розраховані геометричні параметри апарата (висота, ширина, товщина плівки, площа контакту). Оцінені гідродинамічні умови роботи (швидкість газу, плівки, опір, стабільність плівки). Визначена ефективність процесу — очищення до 95%. Запропоновано оптимальну конструкцію апарата — вертикальний плівковий модуль із циліндричними каналами.

6. Запропоновані заходи безпеки апарата, проведені розрахунки надійності його при експлуатації, оцінені його екологічні впливи (небезпечні промислові випромінювання: акустичні, шум та ін.), що підтверджує інженерну та екологічну доцільність впровадження апарата, який може бути рекомендований для практичного застосування для систем очищення повітря.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Склабінський В. І., Ляпощенко О. О., Симак Д. М. Масообмін у багатофазних системах і конструкції апаратів для очищення газів: навч. посіб. — Одеса: ОНАХТ, 2019. — 112 с.
2. Ветошкін А. І. Технології захисту навколишнього середовища: очищення газових викидів, стічних вод, відходів: навч. посіб. — Київ: Вища школа, 2006. — 416 с.
3. Синер М. Основи проектування хімічних виробництв та апаратів з масообміном. — Харків: ХНУРЕ, 2006. — 188 с.
4. ДСТУ EN ISO 12100:2019. Безпечність машин. Загальні принципи конструювання. Оцінювання ризику та зменшення ризику. — [Чинний з 01.07.2019]. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
5. ДНАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час експлуатації хімічного обладнання. — Офіц. вид. — Київ: Мінпраці України, 2010. — 82 с.
6. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»: Закон від 25.06.1991 № 1264-ХІІ. — Відомості Верховної Ради України. — 1991. — №41.
7. Coulson J.M., Richardson J.F. Chemical Engineering. Vol. 2: Unit Operations. — 4th ed. — Oxford: Pergamon Press, 1982. — 648 p.
8. Kunii D., Levenspiel O. Fluidization Engineering. — 2nd ed. — Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. — 491 p.
9. Boyjoo Y., Sun H., Liu J., Pareek V. K., Wang S. (2017). A review on photocatalysis for air treatment: From catalyst development to reactor design. *Chemical Engineering Journal*, 310, 537–559.
10. Zhang X., Wang Y., Liu J., Chen X. (2020). CFD modeling of mass transfer in gas-liquid-solid systems: A comprehensive review. *Chemical Engineering Science*, 226, 115860.

11. Mamaghani A. H., Haghghat F., Lee C.-S. (2017). Photocatalytic oxidation technology for indoor air pollutants: A review. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 338, 144–159.
12. Yang K., Zhang H., Yan Y. (2019). Preparation of novel iron-loaded microfibers entrapped carbon-nanotube composites for catalytic wet peroxide oxidation. *Separation and Purification Technology*, 212, 405–415.
13. Sebastia-Saez D., Gu S., Ranganathan P., Papadikis K. (2015). Micro-scale CFD modeling of reactive mass transfer in falling liquid films within structured packing materials. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 33, 40–50.
14. Shayegan Z., Haghghat F., Lee C.-S. (2019). Carbon-based materials for photocatalytic air purification: A review. *Catalysis Today*, 326, 82–93.
15. Innocentini M. D. M., Colombo P. (2015). Advances in ceramic filters for air and gas filtration. *Separation and Purification Technology*, 152, 180–191.
16. Cruz-Díaz M., Rivera F. F., Sandoval M. A. (2021). Modelling of flow distribution within spacer-filled channels fed by dividing manifolds as found in stacks for membrane-based technologies. *Chemical Engineering Journal*, 423, 130232.
17. Tang Q., Zhang J. (2019). Development of advanced air filtration systems with low pressure drop. *Robotics and Autonomous Systems*, 120, 103251.
18. Safonyk A., Bomba A. (2019). Mathematical modeling of liquid filtration taking into account reverse influence of process characteristics on medium characteristics. *International Journal of Applied Mathematical Research*, 8(3), 45–52.
19. Герасимов О. І., Курятников В. В. Фізичне моделювання в технологіях водоочищення // Фізика аеродисперсних систем : зб. ст. / ред. Д. І. Полищук [та ін.]. — Одеса; Київ: Вища школа, 1987. — Вип. 31. — С. 17–31.
20. Герасимов О.І. Технології захисту навколишнього середовища: підручник / Одеськ. держ. еколог. ун-т. Одеса: ТЕС, 2019. 268 с.
21. Герасимов О.І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища: навчальний посібник. Одеса: ТЕС, 2018. 228с.

22. Герасимов О. І. Фізичні основи технологій захисту навколишнього середовища: підручник. Одеса: Одеський державний екологічний у-т , 2023. 168 с.
23. Полянин А.Д. Справочник по дифференциальным уравнениям математической физики. - М.: ФМЛ, 2001. - 576 с.(с.64)
24. Герасимов О.І., Курятников В.В. Фізичне моделювання в технологіях водоочищення// Фізика аеродисперсних систем. 2023. №61. С.17-31.
<http://fas.onu.edu.ua/issue/view/17225>
25. Герасимов О.І., Курятников В.В. Розв'язання задач з «Технологій захисту навколишнього середовища»: навчальний посібник. Одеса; Одеський державний екологічний університет, 2024. 120 с. ISBN 978-966-186-298-1
<http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/13069>
26. Герасимов О.І., Курятников В.В. Моделювання динаміки радіоактивних домішок в умовах річкових стоків в райони морського узбережжя// Фізика аеродисперсних систем. – 2024. – № 62. – С.130-149
<http://fas.onu.edu.ua/article/view/318617>