

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет



На правах рукопису

УДК 502.174:66.074-963

ГУРЕЦЬ ЛАРИСА ЛЕОНІДІВНА

**НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕКОЛОГІЧНОЇ
БЕЗПЕКИ ПРИ ЗАБРУДНЕННІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ
ГАЗОПИЛОВИМИ ВИКИДАМИ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Дисертація на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант
доктор технічних наук,
професор,
Пляцук Леонід Дмитрович

Суми - 2017

Зміст

		Стор.
	Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень	6
	ВСТУП	8
1	РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	19
1.1	Техногенне забруднення довкілля як фактор екологічної небезпеки	20
1.2	Забруднення атмосферного повітря та стан екологічної безпеки в містах та промислових центрах	30
1.3	Аналіз систем газоочищення промислових підприємств	43
1.3.1	Методи інтенсифікації процесів газоочищення	48
1.3.2	Закономірності процесів газоочищення в апаратах з інтенсивним гідродинамічним режимом	53
1.3.2.1	Пиловловлення в апаратах з інтенсивним гідродинамічним режимом	59
1.4	Мета і завдання дослідження	67
2	РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	69
2.1	Підвищення рівня екологічної безпеки при техногенному навантаженні на довкілля від забруднення атмосферного повітря викидами промислових підприємств	69
2.2	Загальна методика проведення досліджень	81
2.2.1	Експериментальні установки для дослідження високо-ефективних конструкцій газоочисного обладнання	82
2.2.1.1	Експериментальна установка для дослідження апарату з провальними тарілками великих отворів	82
2.2.1.2	Експериментальна установка для дослідження апарату з регулярною рухомою насадкою	84
2.2.2	Методика дослідження гідродинамічних характеристик	

	апаратів	86
2.2.3	Методика дослідження масообміну в рідкій фазі	87
2.2.4	Методика дослідження масообміну в газовій фазі	89
2.2.5	Методика дослідження пилоочищення	90
	Висновки до розділу 2	91
3	РОЗДІЛ 3. ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ГАЗО- ПИЛОВИХ ВИКИДІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ НА СТАН ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСТ	93
3.1	Моделювання розсіювання шкідливих речовин з урахуванням міської забудови	95
3.2	Математична модель розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосферному повітрі	101
	Висновки до розділу 3	110
4	РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ГАЗООЧИЩЕННЯ	112
4.1	Оптимізація пилогазоочисних процесів з метою підвищення рівня екологічної безпеки	114
4.2	Методологія вибору та дослідження пилогазоочисного обладнання	135
4.2.1	Формулювання завдань	147
4.2.2	Прийняття рішень	153
	Висновки до розділу 4	156
5	РОЗДІЛ 5. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОІНТЕНСИВНОГО ГАЗООЧИСНОГО ОБЛАДНАННЯ	158
5.1	Дослідження гідродинамічних характеристик апаратів	158
5.1.1	Гідродинаміка апаратів з провальними тарілкам великих отворів	158

5.1.2	Гідродинаміка апаратів з регулярною рухомою насадкою	173
5.1.2.1	Розрахунок гідравлічного опору апаратів з регулярною рухомою насадкою	174
5.1.2.2	Визначення діаметру крапель в робочій зоні апарату з регулярною рухомою насадкою	177
5.2	Дослідження процесів абсорбції у високоінтенсивних апаратах	184
5.2.1	Дослідження процесів абсорбції в рідкій фазі	184
5.2.1.1	Визначення коефіцієнту масовіддачі при хемосорбції відхідних газів	184
5.2.1.2	Визначення коефіцієнта масовіддачі в краплі рідини	188
5.2.1.3	Експериментальні дослідження масовіддачі в рідкій фазі	193
5.2.3	Визначення коефіцієнта масовіддачі у газовій фазі	197
5.2.3.1	Експериментальні дослідження масовіддачі в газовій фазі	199
5.3	Дослідження пиловловлення у високоінтенсивних апаратах	204
5.3.1	Дослідження пиловловлення в апаратах з провальними тарілками великих отворів	204
5.3.2	Дослідження пиловловлення в апаратах з регулярною рухомою насадкою	208
5.3.2.1	Вплив конструктивних параметрів на ефективність пиловловлення в апараті з регулярною рухомою насадкою	209
5.3.2.2	Вплив режимних параметрів апарата з рухомою насадкою на ефективність пиловловлення	213
5.4	Вибір оптимальних режимних параметрів роботи газоочисних апаратів	217
	Висновки до розділу 5	220
6	РОЗДІЛ 6. ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ ВИСОКОІНТЕНСИВНОГО ГАЗООЧИСНОГО ОБЛАДНАННЯ	223
6.1	Дослідно-промислове впровадження газоочисного	223

	апарата на Сумській ТЕЦ	
6.1.1	Характеристика існуючого газоочисного обладнання та формулювання вимог підприємства – споживача	223
6.1.2	Розробка рішень по удосконаленню системи газоочищення	225
6.1.3	Дослідження ефективності газопилоочищення в запропонованому апараті	227
6.1.4	Рекомендації з проектування й експлуатації розробленого апарата	231
6.2	Дослідно-промислове впровадження газоочисного апарата на Охтирській ТЕЦ	236
6.2.1	Характеристика джерел викидів та формулювання вимог підприємства-споживача	236
6.2.2	Розробка рішень по виборі хемосорбента та газоочисного обладнання	237
6.3	Дослідно-промислове впровадження газоочисного апарата на ПАТ «Сумхімпром»	240
6.3.1	Характеристика існуючого газоочисного обладнання та формулювання вимог підприємства-споживача	240
6.3.2	Розробка рішень по удосконаленню системи пилоочищення виробництва титан (IV) оксиду	243
6.3.3	Оцінка зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря	244
	Висновки до розділу 6	248
	Загальні висновки	250
	Список джерел літератури	253
	Додатки	289

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ

Умовні позначення

G	– об'ємна витрата газу, $\text{м}^3/\text{с}$;
D	– коефіцієнт молекулярної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;
d	– діаметр, м;
d_{50}	– середній діаметр часток пилу, м;
w_2	– швидкість газу в перерізі апарату, $\text{м}/\text{с}$;
L	– щільність зрошення, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$;
H	– висота шару піни, м;
ρ	– густина, $\text{кг}/\text{м}^3$;
τ	– площа вільного перетину полотна тарілки, %;
f	– площа отворів тарілки, зайнятих рідиною, що стікає, %;
ξ	– коефіцієнт опору;
μ	– динамічний коефіцієнт в'язкості, $\text{Па} \cdot \text{с}$;
ν	– кінематичний коефіцієнт в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$;
ΔP	– гідравлічний опір, Па;
δ	– товщина, м;
η	– ефективність, %;
C	– концентрація, $\text{мг}/\text{м}^3$;
q	– стехіометричний коефіцієнт реакції;
r	– швидкість реакції, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$;
σ	– поверхневий натяг, $\text{Н}/\text{м}$;
t	– час, с;
E	– дисипація енергії, $\text{Вт}/\text{м}^3$;
H	– ефективність очищення газів, %.

Скорочення

ЗР	– забруднююча речовина;
СЗЗ	– санітарно-захисна зона;
ГДК	– гранично допустима концентрація;
ГДВ	– гранично допустимий викид;
ПТВО	– провальна тарілка великих отворів;
КУР	– кількість утримуваної рідини;
РРН	– регулярна рухома насадка;
НПС	– навколишнє природне середовище.

Символи

<i>b</i>	– бульбашка;
<i>г</i>	– газ;
<i>к</i>	– кінцева;
<i>к.з</i>	– контактна зона;
<i>кр</i>	– крапля;
<i>n</i>	– початкова;
<i>p</i>	– рідина;
<i>ч</i>	– тверда частинка.

Безрозмірні комплекси

$Re = \frac{wd\rho}{\mu}$ – критерій Рейнольдса; $Fr = \frac{w^2}{gl}$ – критерій Фруда; $We = \frac{\rho w^2 d_e}{\sigma}$ – критерій Вебера; $Pe' = \frac{wl}{D}$ – дифузійний критерій Пекле; $Nu' = \frac{\beta l}{D}$ – дифузійний критерій Нуссельта; $Pr' = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho D}$ – дифузійний критерій Прандтля; $St' = \frac{\beta}{w}$ – дифузійний критерій Стентона.

ВСТУП

Висока якість навколишнього природного середовища – головна та необхідна умова здорового та тривалого життя населення, яке, в свою чергу, є основою високого рівня економічного розвитку країни. Головні суспільні пріоритети, які чітко відображені в проекті Концепції сталого розвитку України, полягають в екологічному, економічному та соціальному добробуті населення, адже неможливо поліпшити умови життя наступного покоління, якщо економічний підйом не буде супроводжуватись соціальним комфортом і зменшенням техногенного навантаження на людину. Так само не можуть екологічні проблеми вирішуватись за рахунок згортання промислового розвитку та погіршення соціально-побутових умов.

Зростання масштабів господарської діяльності, науково-технічний прогрес зумовлює посилення антропогенного тиску на довкілля та порушення рівноваги в навколишньому природному середовищі. Це, в свою чергу, призводить до загострення соціально-економічних проблем. Поряд з вичерпанням запасів природних ресурсів зростає забруднення довкілля, особливо водних ресурсів та атмосферного повітря. Це суттєво підриває природно-ресурсний потенціал розвитку держави, негативно впливає на добробут і здоров'я населення, та створює загрозу екологічній безпеці держави. Антропогенне і техногенне навантаження на навколишнє природне середовище в Україні в кілька разів перевищує відповідні показники в розвинутих країнах світу. Тривалість життя в Україні становить у середньому близько 66 років. Значною мірою це зумовлено забрудненням навколишнього природного середовища.

Атмосферне повітря є життєво важливим компонентом навколишнього середовища, від якості якого у вирішальній мірі залежить здоров'я населення, в першу чергу, міст та селищ, де зосереджено до 70 % населення та основна частина промислових підприємств країни. За даними Державної

служби статистики, в 2015 році викиди забруднюючих речовин в атмосферу від стаціонарних та пересувних джерел склали 4521,3 тис. т. При цьому від стаціонарних джерел забруднення в атмосферу надійшло 2857,4 тис. т забруднюючих речовин, що складає 63,9% від загального обсягу. На кожного жителя України в 2015 році припадало 20 кг викидів сульфур (IV) оксиду, 10,6 кг – оксидів нітрогену. У територіальному розрізі на кожен квадратний кілометр території країни припадало 1,5 тонн сульфур (IV) оксиду і 0,8 тонн – оксидів нітрогену. Загальний рівень забруднення атмосферного повітря в Україні за індексом забруднення атмосфери (ІЗА) становив у 2015 році 7,7 і оцінювався як високий [1]. В Україні негативного впливу атмосферних забруднень зазнає близько 17 млн. осіб або 34% всього населення. Таким чином, забруднення атмосферного повітря має комплексний вплив на довкілля і здоров'я людини зокрема, що вимагає розробки управлінських рішень щодо підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря.

Промислові підприємства є основними джерелами забруднення навколишнього середовища в цілому й атмосфери зокрема. Через недосконалість технологічних процесів і устаткування діючих підприємств в атмосферу надходять гази, що містять різні по токсичності газоподібні компоненти, пари органічних рідин, дрібнодисперсні краплі й тверді частинки. Системи газоочищення підприємств застарілі, часто розроблялися й впроваджувалися без урахування сучасних економічних і екологічних вимог. Це призвело до того, що в промислово розвинених регіонах країни концентрації шкідливих речовин у багато разів перевищують норму. У зв'язку з екологічною обстановкою, що погіршується, проблема очищення газових викидів від газоподібних і дисперсних домішок давно стала проблемою загальнонаціонального характеру.

Особливе значення вона набула в нашій країні через те, що природоохоронним заходам не приділяється достатньої уваги. Основними причинами, що зумовлюють незадовільний стан якості атмосферного повітря

в населених пунктах, є недотримання підприємствами режиму експлуатації пилогазоочисного обладнання, невиконання заходів із зниження обсягу викидів забруднюючих речовин до встановлених нормативів, низькі темпи впровадження новітніх технологій [2]. Тому вирішення екологічної проблеми збереження якості атмосферного повітря неможливе без впровадження природоохоронних заходів, які включають застосування високоефективного газоочисного обладнання, здатного мінімізувати концентрацію забруднюючих речовин у викидах промислових підприємств.

Більша частина викидів промислових підприємств за своєю структурою – це аеродисперсні системи, дисперсну фазу яких складають органічний та неорганічний пил або дрібнодисперсні краплі, а дисперсійну – газоповітряна суміш, яка може включати декілька забруднюючих газоподібних компонентів. Компоненти відхідних газів у багатьох випадках мають аддитивну дію або здатні до трансформації в більш небезпечні сполуки, що в умовах фонових концентрацій, характерних для більшості промислово розвинутих районів, робить їх небезпечними навіть при відносно низьких концентраціях у викидах. Ця проблема різко загострюється в умовах зміни промислової інфраструктури, зближення промислових та селітебних зон, появи нових токсичних речовин із недостатньо вивченою дією.

Вирішення проблеми очищення багатокomпонентних викидів традиційно базується на використанні багатоступеневих систем очищення. Практика санітарного очищення відхідних газів у цих системах визначила сферу їх економічно обґрунтованого застосування – це великотоннажні викиди зі стабільним складом, властивостями та можливістю утилізації цільових компонентів у промислових масштабах. Але багатоступеневі системи очищення, які мають великі капітальні та експлуатаційні витрати, при зміні складу властивостей або об'ємів викидів стають малоефективними та вимагають переобладнання, пов'язаного з великими капіталовкладеннями.

Перспективним напрямком досягнення нормативних концентрацій забруднюючих речовин при невисоких витратах енергії є впровадження

принципу комплексного очищення відхідних газів в одному апараті.

Суміщення в одному апараті процесів газо- та пилоочищення значно розширює його функціональні можливості, дозволяє спростити апаратурне оформлення та знизити капітальні й експлуатаційні витрати при досягненні високої ефективності очищення. Розвиток цього напрямку пов'язаний із можливістю системного вирішення питань оптимізації режимно-технологічних параметрів очищення, з урахуванням закономірностей впливу, властивостей та складу компонентів відхідних газів. Універсальна можливість суміщення та інтенсифікації фізико-хімічних процесів у газорідних системах за рахунок створення розвинутого турбулентного руху фаз в одному апараті дозволяє досягти високої ефективності газоочищення.

На основі вищенаведеного можна стверджувати, що дослідження, спрямовані на ґрунтовне вивчення питань, пов'язаних з проблемою комплексного очищення відхідних газів промислових підприємств та вибором і проектуванням високоефективного газоочисного обладнання є актуальними і дають можливість зменшити техногенне навантаження на довкілля. Тому дисертаційна робота направлена на вирішення актуальної наукової проблеми щодо підвищення рівня екологічної безпеки населених пунктів при забрудненні атмосферного повітря викидами промислових підприємств шляхом застосування високоефективного газоочисного обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки в Україні на період до 2020 р. з розділу «Рациональне природокористування» і стратегічним пріоритетним напрямом інноваційної діяльності в Україні на 2011–2021 р.р. «Широке застосування технологій більш чистого виробництва та охорони навколишнього природного середовища».

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до планів науково-

дослідних робіт кафедри прикладної екології Сумського державного університету, пов'язаних з тематиками «Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології» згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти та науки України № держреєстрації 0194U029586 (2003-2008 р.р.), «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище підприємств хімічної та машинобудівної промисловості» № держреєстрації 0109U008929 (2009-2012 р.р.) та «Розробка шляхів поліпшення екологічної ситуації міст і промислових зон» № держреєстрації 0111U006335 (2013-2016 р.р.).

Результати роботи були частиною комплексних досліджень у рамках НДР на замовлення ТОВ «Сумитеплоенерго» (51.16-01.11 СП «Розробка документів, у яких обґрунтовуються обсяги викидів для об'єктів ТОВ «Сумитеплоенерго», 51.16-01.12 СП «Інвентаризація викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел», в яких здобувач була керівником.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є обґрунтування та розроблення науково-методологічних засад підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря шляхом застосування вискоелективного газоочисного обладнання. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- провести оцінку стану екологічної безпеки при забрудненні атмосферного повітря викидами промислових підприємств та обґрунтувати необхідність застосування вискоелективного газоочисного обладнання для зменшення техногенного навантаження на довкілля;
- з метою підвищення рівня екологічної безпеки населених пунктів та прогнозування забруднення атмосферного повітря провести математичне моделювання розповсюдження викидів промислових підприємств в умовах міської забудови;
- провести системний аналіз факторів впливу на стан екологічної безпеки при забрудненні атмосферного повітря та методів оптимізації пилогазоочисних процесів;

- розробити методологію вибору пилогазоочисного обладнання та здійснити на її основі вибір високоефективних газоочисних апаратів, які дозволять проводити комплексне очищення відхідних газів промислових підприємств та забезпечують стійку роботу систем газоочищення;

- обґрунтувати принципи вибору абсорбентів для хемосорбційного очищення викидних газів промислових виробництв з урахуванням вимог екологічної безпеки;

- провести теоретичні та експериментальні дослідження гідродинаміки, масообміну та пиловловлення у вибраних високоефективних газоочисних апаратах та визначити оптимальні режимні параметри проведення процесу газоочищення;

- провести випробування розроблених схем очищення та досліджуваних апаратів на дослідно-промислових установках і перевірку визначених параметрів проведення процесу газоочищення в умовах комплексного забруднення відхідних газів.

Об'єкт дослідження – техногенне навантаження на довкілля від забруднення атмосферного повітря викидами промислових підприємств.

Предмет дослідження – зниження рівня забруднення атмосферного повітря при застосуванні високоефективного пилогазоочисного обладнання.

Методи дослідження базуються на системному аналізі теоретичних досліджень, фізичному та математичному моделюванні та прогнозуванні. Використано методи математичного моделювання для дослідження процесу розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері, розрахунку параметрів процесу газоочищення, а також експериментальні методи дослідження гідродинаміки та ефективності роботи пилогазоочисних апаратів. У роботі використані фізичні методи для визначення дисперсного складу та механічних властивостей пилу, гравіметричний метод для визначення ефективності пиловловлення та визначення запиленості повітря на межі санітарно-захисної зони підприємства, рентгеноскопичний спектральний аналіз елементного складу пилу, методи хімічного аналізу для визначення

ефективності абсорбційних процесів. Теоретичні розрахунки та обробку експериментальних даних виконували із застосуванням комп'ютерних програм MapleSoft 12.0; Statistica 6.0; EOЛ 2000; Microsoft Excel, Advanced Grapher 2.2.

Наукова новизна отриманих результатів:

- дістав подальшого розвитку методологічний підхід аналізу процесів розсіювання забруднюючих речовин з урахуванням параметрів міської забудови на основі математичного моделювання цих процесів, що дало можливість забезпечити екологічну безпеку атмосферного повітря сельбищних та виробничих територій;

- вперше розроблені науково-методологічні основи екологічної безпеки атмосферного повітря шляхом застосування високоефективного газоочисного обладнання, яке працює в режимі розвинутої турбулентності, що дало можливість підвищити рівень екологічної безпеки міст та промислових зон;

- вперше на основі системного підходу запропонована концепція оптимізації пилогазоочисних процесів на основі використання в якості критерію оптимізації інтенсивності процесу газоочищення, що дозволило виявити фактори вибору газоочисного обладнання;

- вперше запропонована методологія вибору пилогазоочисного обладнання, яка враховує сучасний рівень наукових розробок та вимоги як споживачів, так і підприємств-виробників газоочисного обладнання, що дало можливість застосувати оптимальні методи газопилоочищення для конкретних екологічних ситуацій;

- удосконалено системний підхід для визначення фактору інтенсифікації процесу хемосорбції та коефіцієнта масовіддачі при протіканні хімічної реакції на основі аналізу положень плівкової теорії, що дозволило забезпечити максимальний ступінь очищення газопилових потоків;

- вперше на основі дисипативного підходу отримані залежності для

визначення коефіцієнтів масовіддачі в дисперсному турбулентному потоці рідини, що дало можливість розрахунку та оптимізації процесів газоочищення для досягнення максимального рівня екологічної безпеки атмосферного повітря.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблені математичні моделі розсіювання забруднюючих речовин дозволяють прогнозувати стан атмосферного повітря в промислових містах; застосування розробленої методології вибору газоочисного обладнання в умовах конкретного промислового виробництва дозволяє провести модернізацію існуючих систем газоочищення для мінімізації впливу на атмосферне повітря та підвищення рівня екологічної безпеки; за результатами досліджень отримано два патенти України. Використання апаратів запатентованих конструкцій дозволяє збільшити ефективність очищення відхідних газів, що, в свою чергу, призводить до підвищення рівня екологічної безпеки населених пунктів.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень та запатентовані конструкції газоочисного обладнання пройшли дослідно-промислово апробацію на об'єктах теплоенергетики та хімічної промисловості: в системах газоочищення Сумської ТЕЦ (акт впровадження результатів дисертаційної роботи від 21.01.2015), Охтирської ТЕЦ (акт впровадження результатів дисертаційної роботи від 03.11.2015), ПАТ «Сумхімпром» (акти впровадження результатів дисертаційної роботи від 10.05.2011 та 15.11.2011). Математичні моделі розсіювання забруднюючих речовин в умовах міської забудови та методологія вибору газоочисного обладнання передані в ДП «Український науково-технічний центр «Енергосталь», м. Харків (акт впровадження результатів дисертаційної роботи від 17.05.2016), Державний науково-дослідний і проектний інститут основної хімії «НІОХІМ», м. Харків (акт впровадження результатів дисертаційної роботи від 09.02.2016) та ПрАТ інститут «Сумипроєкт» (акт впровадження результатів дисертаційної роботи від 27.05.2014).

Впроваджені в навчальний процес Сумського державного університету розроблені математичні моделі розсіювання забруднюючих речовин від стаціонарних джерел в умовах міської забудови у дисципліні «Моделювання та прогнозування стану навколишнього середовища», методологія вибору пилогазоочисного обладнання у дисципліні «Процеси та апарати природоохоронного обладнання», оцінка впливу промислових підприємств на довкілля у дисципліні «Техноекологія» (акт впровадження від 26.05.2016).

Особистий внесок автора полягає в обґрунтуванні наукового напрямку, формулюванні мети роботи, розробці математичних моделей, установленні теоретичних залежностей, створенні лабораторних стендів для проведення досліджень гідродинаміки, масообміну та пиловловлення, участі у постановці і проведенні експериментальних досліджень та промислових випробувань, а також у аналізі та узагальненні результатів, формулюванні новизни, висновків та основних положень роботи, які виносяться на захист.

Особистий внесок в працях, опублікованих в співавторстві:

в роботах [58, 100, 106, 181-183] – основні поняття та концепція екологічної безпеки атмосферного повітря при впливі промислових підприємств; в роботах [212, 215] – математичні моделі розсіювання забруднюючих речовин в міській забудові; в роботах [115, 176, 243, 244, 257] – основні принципи методології вибору газоочисного обладнання; в роботах [109, 239, 240, 250, 252, 254, 255, 321, 322] – реалізація розробленої методології вибору газоочисного обладнання для підприємств хімічної промисловості України; в роботах [279-286, 289, 291, 299, 300, 311, 312, 320-322] – математичне моделювання процесів газопилоочищення та експериментальні дослідження високоефективного газоочисного обладнання; в роботах [317, 319] – розробка конструкцій високоефективного пилогазоочисного обладнання.

Апробація результатів досліджень.

Основні положення та результати дисертаційних досліджень доповідались на наукових конференціях різних рівнів: Науково-технічній

конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету, м. Суми, 2008; Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету ТеСЕТ, м. Суми, 2009; VI Міжнародній конференції «Сотрудничество для решения проблемы отходов», м. Харків, 2009; Міжнародній науково-практичній конференції «Современные проблемы инновационных технологий в образовании и науке», Республіка Казахстан, м. Чимкент, 2009; VIII Міжнародній конференції аспірантів та студентів «Охрана навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів», м. Донецьк, 2009; V Міжнародній ювілейній науково-практичній конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження», м. Суми, 2009; Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві», м. Суми, 2010; Всеукраїнській науково-практичній конференції «Екологія міст та рекреаційних зон», м. Одеса, 2010; Міжнародній науково-практичній конференції «Карпатська конференція з проблем охорони довкілля “Carpathian environmental conference” – СЕС-2011, м. Мукачеве, 2011; VIII Міжнародній науково-практичній конференції за участю молодих науковців «Еколого-правові та економічні аспекти екологічної безпеки регіонів», м. Харків, 2013; Міжнародній молодіжній науковій конференції «Экология и рациональное природопользование агропромышленных регионов», Російська Федерація, м. Белгород, 2013; II Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов», Російська Федерація, м. Пенза, 2013; Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки», м. Кременчук, 2013; Міжвузівській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Екологічний розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», м. Житомир, 2014; XXII Міжгалузевій науково-практичній конференції «КАЗАНТИП-ЭКО-2014. Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей,

екології, енерго- ресурсосбереження», м. Харків, 2014; III Всеукраїнській міжвузівській конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві», м. Суми, 2014; I Всеукраїнській науково-практичній конференції «Ресурсозбереження і хіміко-екологічні проблеми технологічних процесів», м. Харків, 2014; XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки», м. Кременчук, 2015; Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету ТеСЕТ, м. Суми, 2015.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 50 наукових працях, з них: 20 статей – у наукових фахових виданнях; 4 статті – у виданнях, які входять у наукометричні бази; 6 – в інших виданнях; 13 тез доповідей у збірниках праць конференцій; 2 – патенти України, 1 монографія – в співавторстві; 1 брошура – в співавторстві, 3 підручника.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку джерел літератури, який містить 322 найменування та додатків.

Матеріали дисертаційної роботи викладені на 313 сторінках загального тексту, в тому числі список джерел літератури на 36 сторінках, додатки на 25 сторінках. Робота містить 79 рисунків та 17 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

До середини ХХ століття людина, за визначенням В.І. Вернадського, стала найбільш могутньою геологічною силою на нашій планеті [3]. Різко зріс вплив людської діяльності на довкілля, що призвело до порушення природних зв'язків. Антропогенне забруднення навколишнього середовища впливає на формування популяційного здоров'я населення, тому проблема несприятливого впливу чинників навколишнього середовища на стан здоров'я з кожним роком набуває все більшої актуальності. З високим рівнем викидів, скидів та інших забруднень, що характеризують екологічно несприятливу територію, пов'язують високу захворюваність і смертність населення. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) на здоров'я людини впливають: соціально-економічні чинники – на 50-60%, стан навколишнього середовища – на 20-30%.

Потенційно небезпечні виробництва мають значну питому вагу в структурі промисловості України, на них припадає майже третина обсягів випуску продукції. У зв'язку з високим рівнем фізичної зношеності, старінням техніки та неефективним режимом роботи обладнання спостерігається збільшення викидів унаслідок аварій і поломок. При існуючих технологіях і засобах виробництва, а також недостатньому фінансуванні природоохоронних заходів процес нарощування темпів виробництва неминуче пов'язаний із нанесенням непоправного збитку навколишньому середовищу. Сьогодні в Україні, незважаючи на певний спад виробництва, стабільно високим залишається забруднення повітряного середовища великих міст і промислових центрів. Проте питання щодо ступеня ризику за умов постійної тривалої дії шкідливих чинників повітряного середовища, якому піддається населення великих міст з різним

профілем промисловості, залишаються відкритими [4] .

Незадовільний екологічний стан та загрозливі демографічні тенденції, зростання захворюваності та смертності серед населення вимагають ретельного вивчення ситуації, аналізу, оцінки і прогнозу стану здоров'я населення та середовища життєдіяльності людини, виявлення причинно-наслідкових зв'язків між станом здоров'я населення та впливом на нього факторів довкілля для розробки й впровадження профілактичних заходів щодо покращення загального стану здоров'я населення.

1.1 Техногенне забруднення довкілля як фактор екологічної небезпеки

Основні принципи екологічної безпеки викладені в роботах Я.О.Адаменка, А.О.Бикова, М.М.Биченка, С.О.Боголюбова, В.І.Данілова-Данільяна, С.І.Дарагунцова, А.Б.Качинського, М.Ф.Реймерса, Г.І.Рудька, К.Ф.Фролова, В.М.Шмандія, [5-16] та інших вчених України та зарубіжжя.

Зокрема Реймерс Н.Ф. у [5] розглядає екологічну безпеку як систему взаємопов'язаних та взаємодоповнюючих визначень, а саме:

- система забезпечення гарантії запобігання екологічно значущих катастроф і аварій у результаті сукупності дій, станів і процесів, що прямо або опосередковано призводять до цих подій;
- ступінь відповідності існуючих або прогнозованих екологічних умов завданням збереження здоров'я населення та забезпечення тривалого і стійкого соціально-економічного його розвитку;
- комплекс станів, явищ і дій, що забезпечують екологічний баланс на Землі і в будь-яких її регіонах на рівні, до якого фізично, соціально-економічно, технологічно та політологічно готове людство.

У роботах провідних вчених екологічна безпека розглядається в контексті стійкого розвитку [6, 12, 13, 17-35].

У контексті вивчення проблем стійкого розвитку певна територія

розглядається як складний соціально-природно-техногенний комплекс, що характеризується органічною єдністю всіх його складових. Встановлено загальні взаємозв'язки як у середині цих складових, так і між ними. Їх врахування дозволяє простежити, як змінюються параметри життєдіяльності людини і навколишнього середовища залежно від промислової інфраструктури регіону. Під «виробничою/промисловою інфраструктурою регіону» в роботах [36, 37] розуміється сукупність промислових об'єктів, розташованих у межах його території. Серед головних вимог при формуванні та реструктуризації об'єктів промислової інфраструктури висувуються такі: підвищення ефективності використання міської території, підвищення екологічної безпеки регіону. Виробничі зони розглядаються як міські території «переважного розміщення промислових об'єктів, а також об'єктів інженерної і транспортної інфраструктур, що забезпечують їх функціонування».

Останнім часом набув розвитку комплексний підхід до управління екологічною безпекою, який базується на всебічному вивченні умов формування небезпеки та домінуванні технічних методів регулювання її станів. Так, Шмандій В.М. [9] зазначає, що оптимальне та ефективне управління можливе тільки на основі моніторингу екологічної небезпеки, об'єктивно присутньої в будь-якому регіоні, і застосування відповідних заходів щодо зменшення до мінімуму негативного впливу джерел небезпеки (або, за можливості, – ліквідація цих джерел).

Визначальний вклад у формування екологічної небезпеки, що пов'язана із техногенним забрудненням навколишнього середовища, в межах індустріально розвинених регіонів вносять техногенні об'єкти – промислові підприємства [38]. Будь-яка виробнича діяльність несе в собі приховану екологічну загрозу, тому визначення «екологічно безпечне виробництво» є умовним, його можна віднести до припустимого рівня потенційної небезпеки. Екологічні питання стосуються практично всіх аспектів діяльності виробництва, а екологічний ризик може виникнути на будь-якій

стадії діяльності підприємства. Факторами, які сприяють виникненню екологічного ризику, є антропогенні або техногенні зміни природних об'єктів і чинників; господарська діяльність людини; використання екологічно небезпечних об'єктів; значна зношеність виробничого обладнання. Рівень екологічного ризику зростає через те, що практично неможливо оцінити загальну реакцію природного середовища на сумарний вплив окремих видів антропогенної діяльності, що носять синергетичний характер.

Промислове підприємство залучає у виробниче середовище сировину та природні ресурси і направляє в навколишнє середовище відходи виробничих процесів. Природні та техногенні потоки речовини й енергії сприяють перерозподілу відходів за рахунок процесів міграції, трансформації й акумуляції.

Споживання промисловими підприємствами природних ресурсів території – води, повітря, землі, мінеральної сировини – зменшує запаси природних ресурсів і порушує процеси їх відновлення. У той же час забруднення навколишнього середовища промисловими відходами негативно впливає на якісний стан природних ресурсів, знижуючи їх продуктивність або роблячи непридатними для використання.

У роботі [39] розглянуто особливості формування екологічної небезпеки в техногенно навантаженому регіоні. Регіональна техногенна небезпека створюється сукупністю локальних її джерел – техногенних об'єктів (підприємства, споруди і т.п.), які формують просторові зони неприйнятної небезпеки. Для вирішення завдань управління безпекою автор вважає за доцільне аналізувати шкідливий вплив в основному за межами такого об'єкту, в зонах неприйнятної небезпеки, а також урахувувати стани небезпеки на території самого об'єкту (рис. 1.1). У більшості випадків основний вплив на процес формування техногенної небезпеки мають чинники, присутні в самому регіоні.

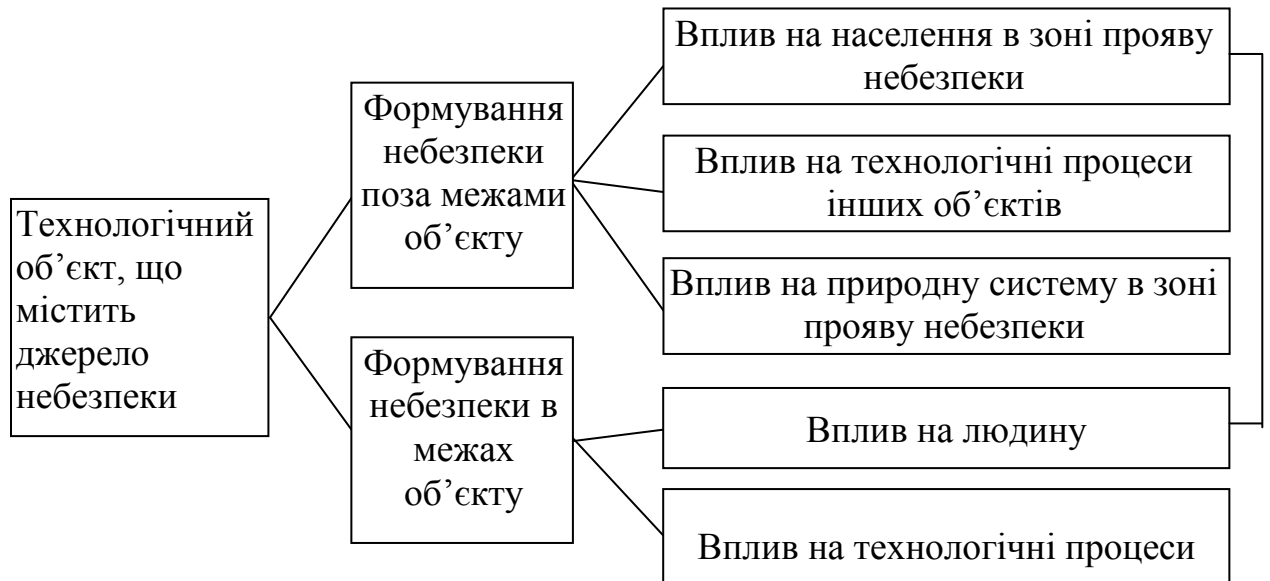


Рисунок 1.1 - Диференціація шкідливого впливу об'єкту формування техногенної небезпеки на елементи соціально-економічної та природної підсистем регіону [39]

Також особливої уваги заслуговує представлена в роботах [38, 39] модель формування техногенної небезпеки. Всі відходи авторами запропоновано класифікувати як забруднювачі, оскільки деякі з них взагалі невластиві навколишньому природному середовищу, а інші збільшують природний вміст речовини та енергії в компонентах природної підсистеми конкретного регіону. В моделі відзначено, що техногенні джерела ініціюють негативні процеси в навколишньому середовищі, які під дією природних і природно-антропогенних чинників розповсюджуються в ній і змінюють її стан, що призводить до екологічного дисбалансу соціально-економічної підсистеми, і, як наслідок, формується техногенна небезпека. Доведено, що на сучасному етапі розвитку суспільства техногенна небезпека щодо ступеню проявів є переважаючим класом антропогенної небезпеки.

У роботі [41] автором запропоновано до схеми забезпечення екологічної безпеки додатково включити блоки «Технологічні процеси виробництва», «Утилізація техногенної сировини», «Екологічні ризики», які

враховують, що основна маса забруднень довкілля утворюється в процесі виробництва, а утилізація відходів призводить до зменшення їх кількості, і, відповідно, до зменшення екологічних ризиків промислового виробництва.

В роботі [42] автором розроблена структурна схема техногенної небезпеки. Така ієрархічна структура, на відміну від інших, має явно визначені ознаки системності, ієрархічності стосовно основної структури екологічної небезпеки, а також елемент забезпечення динамічності (пластичності) структури. Техногенна небезпека включає види, які сформовані чинниками (підвидами небезпеки) забруднення навколишнього середовища: хімічними, фізичними, біологічними, трансформації ландшафтів.

Сутність процесів, що відбуваються в техносфері, полягає в трансформації речовини та енергії. При цьому в природне середовище неминуче надходять речовинні та енергетичні забруднювачі, формуючи техногенну небезпеку. Різноманіття процесів у техносфері визначає широкий спектр чинників формування техногенної небезпеки. Вид техногенної небезпеки, сформованої дією хімічних чинників, визначається наявністю шкідливих речовин, що містяться у викидах в атмосферу, скидах у водний басейн, відходах. Ці чинники можуть розрізнятися, наприклад: за способом утворення забруднювачів; за ступенем токсичності шкідливих речовин; за рівнем сформованого ними забруднення і т.п.

Для оцінки рівня впливу на біосферу конкретного підприємства необхідні показники та методика оцінки за цими показниками, які дозволять намітити напрямки підвищення екологічної ефективності його діяльності.

Для оцінки техногенної небезпеки промислових підприємств доцільно проводити їх ранжування за рівнем техногенної небезпеки, що дозволить виділити ті підприємства, для яких, у першу чергу, повинні бути реалізовані управлінські рішення [43]. Останні складають основу регіональних програм управління екологічною безпекою.

Складність проведення оцінки рівня техногенної небезпеки промислових об'єктів полягає в особливості технологічних процесів різнопрофільних підприємств, відмінності умов утворення шкідливих речовин, специфічності природоохоронних заходів щодо запобігання надходженню їх у природне середовище.

Розроблені на сьогоднішній день методики для інтегральної оцінки впливу на довкілля можна розділити на три групи: методики, які базуються на виділенні укрупнених показників, що вимагають експертної оцінки; методики розрахунку екологічних індикаторів; методики розрахунку завданого економічного збитку. В Україні застосовуються в основному методики третьої групи, в яких не враховується міграція забруднюючих речовин у біосфері, їх накопичення в харчових ланцюгах, утворення вторинних забруднювачів та ін. Крім того, прийняті методики не враховують життєвий цикл існування продукції. Я наслідок, отримані результати часто важко порівнювати та аналізувати.

Авторами [44] на основі екологічної оцінки повного життєвого циклу продукції запропоновано показник якості екологічної діяльності підприємства, який враховує негативний хімічний та «парниковий» вплив:

$$E_{нар} = \sum_{\xi=1}^n N_{\xi} , \quad (1.1)$$

де $E_{нар}$ – забруднення довкілля від хімічного та «парникового» впливу;

N_{ξ} – негативний вплив.

$$N_{\xi} = N_{атм}^{НПГ} + N_{атм}^{ПГ} + N_{вод} + N_{відх} ,$$

де $N_{атм}^{НПГ}$ – негативний вплив на довкілля викидів в атмосферу «не парникових» газів;

$N_{атм}^{ПГ}$ – негативний вплив на довкілля викидів в атмосферу «парникових» газів;

$N_{вод}$ – негативний вплив на довкілля скидів у водні об'єкти;

$N_{відх}$ – негативний вплив на довкілля відходів.

Запропонований метод підходить для виробництв, в яких фактор хімічного забруднення переважає над фізичними забруднювачами навколишнього середовища, наприклад, для підприємств хімічної, нафтохімічної, целюлозно-паперової та інших видів промисловості.

У роботі [45] наведено модель оцінки стану екологічної небезпеки, яка побудована на лінійній залежності індексу техногенної небезпеки від величини чинника, що її формує, а також безпорогової дії цього чинника. Реалізацію приведеної моделі в умовах регіону автор пропонує розглядати таким чином. Спершу для регіону досліджень необхідно встановити характерні значення узагальнених показників техногенної небезпеки, потім обчислюють значення вказаного показника для реального стану. Якщо останні перевищують рівень прийнятності, то на підставі моніторингових досліджень розробляють комплекс заходів щодо зниження рівня небезпеки. Після реалізації вказаних заходів регіон характеризуватиметься прийнятним станом техногенної небезпеки.

У роботі [46] представлено модель визначення рівня техногенної небезпеки, яка дозволяє оцінити негативний вплив надходження в навколишнє середовище забруднювачів, що містяться у викидах в атмосферне повітря, скидах у водний басейн, у відходах. Запропонована модель апробована в конкретному техногенно навантаженому регіоні [46], визначено ступінь техногенної небезпеки промислових підприємств для вибору управлінських рішень. Однак за допомогою проаналізованого алгоритму складно провести ранжування промислових підприємств –

основних забруднювачів навколишнього середовища.

Автором у роботі [41] запропоновано методику визначення інтегрального показника екологічної безпеки об'єкта, що дає змогу не тільки характеризувати вплив конкретного підприємства, а й порівняти різні об'єкти за рівнем екологічної безпеки.

Інтегральний показник екологічної безпеки об'єкта визначається за формулою:

$$I_{ПЕБО} = \left[\frac{K_a + K_e + K_m + K_p}{K_p} - \frac{K_3}{K_n} \right] \cdot 100, \quad (1.2)$$

де K_a, K_e, K_m – коефіцієнти забруднення атмосфери, гідросфери, техносфери відповідно, які визначаються як відношення кількості забруднюючих речовин за рік до ліміту забруднюючих речовин;

K_p – коефіцієнт ризиків;

K_3 – коефіцієнт екологічних витрат, який визначається відношенням загальних затрат на природоохоронні заходи до вартості товарної продукції;

K_n – коефіцієнт забруднення загальної площі, який враховує забруднення санітарно-захисної зони.

За результатами проведеного аналізу можна зазначити, що завдання управління екологічною безпекою полягає у визначенні реального показника техногенної небезпеки та наближення його до оптимального для даної урбосистеми значень. Повинна існувати можливість за допомогою цих показників характеризувати окремі складові урбосистеми, порівнювати їх та планувати конкретні заходи щодо забезпечення умов екологічної безпеки.

Таким чином, можна зазначити, що на сьогодні існує деяка невизначеність щодо методів та моделей оцінки стану екологічної небезпеки, що насамперед проявляється у складності ранжування промислових об'єктів за рівнем небезпеки, з урахуванням характеристик конкретних техногенно навантажених регіонів.

При оцінці техногенного навантаження виникають розбіжності стосовно визначення кількісних характеристик техногенного навантаження й на нормативному рівні. Згідно з Рекомендацією ВООЗ кількісною мірою техногенного навантаження є ризик, що визначається як «очікувана частота небажаних ефектів, що виникають від заданої дії забрудника», тоді як Американське Агентство Охорони Довкілля (EPA US) характеризує його як «ймовірність ушкодження, захворювання або смерті при певних обставинах» [48]. У роботі [49] залежність екологічного ефекту технологічних процесів, що виражається рівнем техногенного навантаження, визначається показниками екологічного ризику і мірою дії, приведених до відносних одиниць методом визначення пріоритетів при експертно-оціночному аналізі.

Більшість спеціалістів в області природної та техногенної небезпеки ризик визначається як ймовірні збитки, які можуть бути встановлені шляхом добутку вірогідності (частоти) негативних подій на величину можливого збитку від неї [50].

Основними елементами сучасної теорії ризику є оцінка ризику через небезпеку та облік ймовірності негативного впливу різних рівнів антропогенних факторів навколишнього середовища [51]. Так, за визначенням В.Маршалла [52], ризик – це частота реалізації небезпеки. Е.Дж. Хенлі, Х. Кумамото [53] розглядають ризик як імовірність людських і матеріальних збитків чи ушкоджень.

Н.Реймерс [5] розглядає екологічний ризик як «імовірність несприятливих для екологічних ресурсів наслідків будь-яких (навмисних або випадкових, поступових і катастрофічних) антропогенних змін природних об'єктів і чинників». У роботі В. Деньга [54] екологічний ризик розглядається як «шкода, що прогнозується екосистемі внаслідок настання події, що спричиняє негативний вплив джерела екозагрози». Авторами в роботах [55, 56] визначено, що екологічні ризики – це порушення екологічних стандартів, збільшення виробничих витрат через підвищені витрати на охорону навколишнього середовища, припинення або навіть

повне закриття об'єкта через причини екологічного характеру. Відповідно до А. Субетто [57] екологічний ризик є мірою екологічної якості проекту, господарського рішення, програми розвитку регіону, що ідентифікується як міра появи небажаного екологічного наслідку через реалізацію цього рішення (проекту, програми і т.п.) відносно середовища проживання, стану здоров'я людини, довкілля. Шкода довкіллю в цьому випадку виражається у вигляді забруднення або знищення лісових, водних, повітряних і земельних ресурсів, завданні шкоди біосфері і сільськогосподарським угіддям.

У роботі [51] наведена така класифікація екологічного ризику: 1) ризик руйнування природних систем; 2) ризик для здоров'я населення; 3) ризик техногенних систем для конкретного промислового підприємства; 4) ризик у керуванні природними ресурсами; 5) ризик природних катастроф; 6) ризик впливу регіональних військових конфліктів; 7) ризик екологічного тероризму.

Складність у формулюванні поняття екологічного ризику зумовлюється різними цілями досліджень учених, складністю аналізу екосистем, виникненням все нових видів ризиків, соціально-економічними змінами в суспільстві [58]. На думку Скнанай Л.В.[59] та Грачової М.В.[60], у процесі управління ризиками доцільно зосередити основні зусилля на аналізі чинників ризику, а також на пошуку найбільш ефективних шляхів його зниження. Таким чином, встановлення закономірностей формування екологічної небезпеки і особливостей її проявів повинне служити базисом для розробки системи управління екологічною безпекою. Одним із основних методів забезпечення безпечного екологічного стану довкілля є попередження забруднень шляхом прогнозування та вживання необхідних природоохоронних заходів.

1.2 Забруднення атмосферного повітря та стан екологічної безпеки в містах та промислових центрах

Якість атмосферного повітря є одним з основних факторів формування екологічної безпеки в цілому. Потрапляючи до атмосфери, ЗР досить швидко розсіюються. Середня тривалість знаходження газів у тропосфері становить 2-4 місяці, аерозолів – 4 місяці біля тропосфери, 1 місяць – у верхній та 6-10 діб – у нижній тропосфері. У результаті змінюються фізичні та хімічні властивості атмосфери, її радіаційні та електричні характеристики. Змінюється склад тропосфери, збільшується концентрація CO₂, метану, нітрогену, фреонів, аерозолів антропогенного походження та інших забруднювачів. Усі ці фактори чинять негативний вплив на клімат, елементи біосфери, призводять до порушення екологічної рівноваги, змінюють характер біоценозів, впливаючи на стан живих організмів та здоров'я людей.

Атмосферні забруднення можуть проникати в рослини внаслідок їх газообміну, осаду на поверхні листя та пагонах. При тривалій дії навіть невисоких концентрацій забруднень у рослин виникають хронічні пошкодження (депресія фотосинтезу, порушення росту, відмирання клітин тощо). Потрапляючи на поверхню ґрунту, ЗР включаються у вертикальні потоки і при цьому можуть значно трансформувати їх налагоджений механізм. Це пов'язано з тим, що багато ЗР здатні руйнувати деякі важливі ландшафтно-геохімічні бар'єри, створювати нові, змінювати тип тих, які були раніше, внаслідок зміни кислотно-лужних або окиснювально-відновлювальних властивостей ґрунту змінювати і швидкість міграції різних речовин.

Проходячи крізь ґрунт, забруднені води можуть частково або й повністю очищуватись, проте сам ґрунт при цьому забруднюється. Хімізм цього забруднення та вертикальний розподіл акумульованих речовин залежить від типу ландшафтно-геохімічних бар'єрів та їх місцеположення в геосистемі. Будь-яку забруднюючу речовину, що потрапила до ґрунту, мо-

жуть поглинати живі організми. З рослин-автотрофів, які акумулюють забруднюючі речовини, починається забруднення всієї трофічної сітки геосистеми. Накопичення токсичних речовин у живих організмах збільшується з кожним наступним трофічним рівнем. Тому навіть незначна концентрація забруднюючих речовин у рослинах може викликати токсикацію тварин вищих трофічних рівнів.

За даними наукових досліджень, внесок забруднень атмосферного повітря складає від 80 до 90% від сумарного канцерогенного та неканцерогенного ризику, пов'язаного з впливом забруднень інших об'єктів навколишнього середовища. Забруднення атмосферного повітря за ступенем хімічної небезпеки для людини посідає перше місце. Це обумовлено, в першу чергу, тим, що забруднюючі речовини з атмосферного повітря мають найбільш широке розповсюдження та випадають у різні середовища [4]. Наприклад, атмосферні опади дають до 10% забруднення водних об'єктів басейну Дніпра, значно забруднюють ґрунт і т.п. Крім того, людина споживає за добу і в цілому за життя в об'ємному відношенні повітря набагато більше, ніж води та їжі.

Промислові підприємства є джерелами комплексного забруднення повітряного середовища. Обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел наведені в табл. 1.1.

Основними забруднювачами атмосферного повітря, за даними Держкомстату [1], є підприємства чорної металургії, теплової енергетики, вугільної, нафтогазовидобувної, цементної промисловості, викиди забруднюючих речовин яких складають майже 90 відсотків від загального обсягу викидів ЗР в атмосферне повітря в Україні.

Середня концентрація метанолу у містах України, де проводились спостереження, була на рівні 2,3 гранично допустимих концентрацій (ГДК), нітроген (IV) оксиду – 1,5ГДК, завислих речовин – 1,1ГДК. Середньорічна концентрація фенолу становила 1,0ГДК. Перевищення середньорічних концентрацій відповідних ГДК спостерігалось: з метанолу у 29 містах;

нітроген (IV) оксиду – у 24; завислих речовин – у 19; фенолу – у 9; карбон (II) оксид – у 7; амоніаку – у 4; нітроген (II) оксиду і гідроген флуориду – у 2, гідроген хлориду і сажі – в одному [4].

Таблиця 1.1. Обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел у 2010 - 2015 роках [1]

Забруднююча речовина	Обсяги викидів, тис.т			
	2010 р.	2013р.	2014р.	2015р.
Кількість підприємств	9312	8095	7963	7815
Разом забруднюючих речовин	4131,6	4295,1	3190,4	2857,7
Метали та їхні сполуки	33,15	33,5	27,9	13,8
Речовини у вигляді суспендованих твердих часток (мікрочастинки та волокна)	562,07	516,8	378,2	349,6
Сполуки нітрогену	344,25	370,9	300,2	262,4
Діоксид та інші сполуки сульфуру	1215,88	1390,0	1078,5	905,1
Оксид карбону	1063,83	1007,2	775,6	764
Неметанові леткі органічні сполуки (НМЛОС)	4762	54,2	49,7	47,3
Метан	4036	920,9	579,3	514,1

Наведені статистичні дані свідчать про високе техногенне навантаження на атмосферне повітря, що негативно відбивається на загальному рівні екологічної безпеки в цілому по країні. При цьому говоримо про комплексне забруднення атмосферного повітря, що часто призводить до виникнення синергетичних ефектів.

Хімічне забруднення атмосферного повітря та довкілля в цілому є істотним чинником ризику для здоров'я населення. Знаходячись в довкіллі навіть на рівнях, що не викликають виражених токсичних ефектів, певні ксенобіотики чинять хронічну дію, що призводить до дезадаптації організму, в першу чергу у людей з підвищеною чутливістю [52]. У роботі [61] відзначається залежність зростання захворювань органів дихання, у виникненні яких провідна роль належить якісному складу повітря (фарингіт, ларингіт, полінози, бронхіальна астма), від близькості місця проживання до промислових підприємств, що забруднюють атмосферу.

У роботі [62] зіставлення зміни рівня забруднення повітряного басейну, інгредієнтів питної води, метеочинників і захворюваності населення м. Запоріжжя свідчить, що підвищення рівня забруднення атмосферного повітря відіграє провідну роль у збільшенні захворюваності дитячого і дорослого населення. При цьому пониження рівня забруднення повітряного басейну внаслідок спаду виробництва виникло в 1997 р., а зниження рівня захворюваності – через три роки. Це доводить, що вплив профілізації об'єктів промислової інфраструктури – досить інертний процес і обов'язковими умовами для достовірної оцінки техногенного навантаження від забруднення атмосфери мають бути реальні зміни в показниках здоров'я населення або стані урбанізованої екосистеми та досить тривалий часовий інтервал.

У роботі [63] після проведеного аналізу залежності рівня соматичної захворюваності дитячого населення від якості атмосферного повітря отримані математичні залежності типу "середовище – здоров'я" і "повітря – здоров'я". Найбільш тісний кореляційний зв'язок з показниками забруднення

довкілля відзначається у захворюваності на анемію, діатез, трахеїт, бронхіт, фарингіт. Найбільший внесок у формування захворюваності дітей вносять вміст пилу, сполук мангану і карбону в повітрі, що характерні для викидів об'єктів машинобудівних, металургійних галузей, а також підприємств хімічного профілю.

Аерозольні забруднення атмосфери впливають на здоров'я людини, стан флори й фауни. Зниження потоку сонячного випромінювання зменшує утворення (під дією УФ-променів) вітаміну D₃, брак якого негативно позначається на формуванні кісткових тканин, викликаючи захворювання рахітом [64]. УФ-промені знищують деякі мікроорганізми, виконуючи стерилізуючу дію. Недостатність УФ-променів підвищує ризик інфекційних бактеріальних захворювань у рослин і тварин, тому у зонах інтенсивного пилового забруднення виникає ряд специфічних захворювань. На відміну від хімічно інертних часток кварцу й азбесту, що діють на організм чисто механічно, дрібні частки металів або іони металів викликають утворення в крові токсичних продуктів біохімічних реакцій [64, 65].

Особливо розповсюдженими захворюваннями є токсичні отруєння плюмбумом, кадмієм, алюмінієм, берилієм та їхніми сполуками, а також спалах інфекційних захворювань у людей, що мали тривалий контакт із пилом вольфраму, ванадію, титану й ряду шлаків металургійних виробництв. Багато видів пилу антропогенного походження є причинами алергічних захворювань. При цьому алергеном може бути пил як мінерального, так і органічного походження [66].

Населення сучасних міст має підвищений ризик розвитку як канцерогенних, так і не канцерогенних ефектів від забруднення атмосферного повітря. Встановлено, що тільки за рахунок дії бенз(а)пірену, бензолу, формальдегіду, нітрозаміну слід очікувати зростання захворювань органів дихання, імунної системи, вроджених вад розвитку тощо. Загалом сумарний канцерогенний ризик для здоров'я населення населених пунктів, що створюється ідентифікованими сполуками, у 2014 році досяг показників

1,8– 7,3 випадків раку на одну тисячу чоловік, який обумовлює щорічний приріст екологічно пов'язаної онкологічної захворюваності до 10,4 випадків на 100 тис. населення [4]. Такий рівень ризику суттєво перевищує міжнародні прийнятні показники ризику і потребує заходів до його зниження.

Таким чином, важливим резервом поліпшення здоров'я населення є поліпшення якості атмосферного повітря. Це вимагає проведення управлінських заходів по підвищенню рівня екологічної безпеки.

Управління якістю атмосферного повітря включає заходи щодо поліпшення його стану повітря в містах та при реконструкції або перепрофілізації промислових підприємств. Базисом управління слугують медико-гігієнічне нормування вмісту забруднюючих речовин, прогнозування розсіювання ЗР, розробка природоохоронних рішень.

Існуюча в Україні нормативно-законодавча база регулює техногенний вплив на навколишнє середовище шляхом введення поняття ГДК. Основою нормування викидів шкідливих речовин в атмосферу від промислових джерел служать фактичні викиди, які вимірюють при проведенні інвентаризації. Кількісні та якісні характеристики викидів визначаються в основному прямими вимірами про номінальному навантаженні технологічного обладнання. Медико-гігієнічне нормування вмісту ЗР, яке здійснюється через введення ГДК, має ряд недоліків, зокрема, не нормується допустима повторюваність перевищень ГДК як максимально разових, так і середньодобових; використання як еталону нормування фактичного викиду від джерела не дозволяє враховувати відхилення від номінальних показників та співставити їх з показниками іншого обладнання або альтернативних технологій; шкідливі викиди оцінюються не за джерелами, а на зрізі димової труби. Введення ГДК не передбачає вивчення впливу шкідливих речовин та їх сполук на всю біосферу, а також збитків від дії на матеріальні фонди.

Тому в ряді робіт [67-70] для оцінювання стану екологічної небезпеки автори використовують різні критерії оцінки техногенного впливу на навколишнє середовище, наприклад, результати біоіндикації і біотестування,

які базуються на здатності живих організмів концентрувати певні види забруднюючих речовин і адекватно реагувати на конкретний техногенний вплив [71-77]; господарські екологічні критерії (ресурсно-господарські норми та правила безпечної і стійкої економічної діяльності підприємств); екологічні нормативи навантаження на природне середовище.

В роботі [78] в якості показника токсичності забруднюючих речовин обрано ГДК_{с.д.}. Для оцінки токсичності запропоновано використовувати коефіцієнт токсичності, який дорівнює відношенню ГДК речовини до ГДК СО. Для більш повного врахування всіх джерел надходження шкідливих речовин в атмосферне повітря автори пропонують застосовувати теорію прийняття компромісних рішень, що дозволяє отримати більш точні результати в умовах невизначеності.

При прогнозуванні впливу промислових підприємств на атмосферне повітря використовують математичне моделювання розсіювання забруднюючих речовин. Розробці математичних моделей розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері присвячені роботи таких фахівців, як Алоян О.Є., Беляєв М.М., Берлянд М.Г., Згуровський М.З., Марчук В.Г., Нестеров А.В., Радкевич О.Р. та інші [79 - 96].

На розсіювання ЗР впливають параметри джерела викиду та метеорологічні умови. Параметрами джерела викиду ЗР є його висота, об'єм, температура, швидкість викиду та концентрація забруднюючої речовини. У випадку пилового забруднення потрібно також знати діаметр частинок пилу. До метеорологічних параметрів, які впливають на розсіювання забруднюючої речовини, належать швидкість та напрямок вітру, а також вертикальна температурна стратифікація. Інверсія перешкоджає турбулентному перемішуванню повітряних потоків, тому максимальні поверхневі концентрації спостерігаються при високій стабільності стратифікації. Навпаки, конвекційні явища підсилюють вертикальне перемішування, і показники концентрацій забруднюючих речовин у приземному шарі в цьому випадку є найбільш низькими.

Для опису процесу розсіювання в сучасній практиці застосовується широкий спектр математичних моделей. Трьохмірне гідродинамічне моделювання здійснюється за допомогою ейлеровських моделей розсіювання. При цьому способі збільшення або зниження вмісту конкретної забруднюючої речовини потрібно визначати в кожній точці уявної просторової сітки за окремі проміжки часу. Модель Ейлера [84] розв'язує рівняння збереження маси для даного забруднювача. Загальне рівняння виглядає таким чином:

$$\frac{\partial(c_i)}{\partial t} = -\bar{U}\nabla(c_i) - \nabla(c_i') + D\nabla^2\langle c_i \rangle + \langle S_i \rangle, \quad (1.3)$$

$$U = \bar{U} + U',$$

де U – головний вектор вітру $U(x, y, z)$;

\bar{U} – середній вектор області вітру;

U' – вектор коливань області вітру;

C – концентрація ЗР;

$\langle c \rangle$ – середня концентрація ЗР;

c' – концентрація ЗР коливанні;

D – молекулярний коефіцієнт дифузії;

S_i – початковий елемент.

Модель Ейлера використовує фіксовану решітку (вертикальну і горизонтальну) і розв'язує відповідні хімічні рівняння одночасно в усіх елементах решітки, при цьому враховуючи обмін забруднюючими речовинами між елементами. Оскільки цей метод дуже складний і вимагає тривалих комп'ютерних розрахунків, то аналітичне рішення ейлеровських моделей може бути отримане за таких припущень: незмінність умов виділення забруднюючих речовин у часі; незмінність метеорологічних умов під час перенесення; швидкість вітру менше 1 м/с. У результаті отримують моделі розсіювання Гауса [89], які застосовуються в нормативних методиках

ЕРА-US, МАГАТЕ. Параметри розсіювання залежать від метеорологічних умов, відстані, напрямку вітру, а також від висоти труби.

Гаусівська модель [90] ґрунтується на припущенні, що забруднююча речовина буде розповсюджуватись відповідно до нормального статистичного розподілу. Загальне гаусівське рівняння:

$$\frac{dC}{dt} + U \frac{dC}{dx} = \frac{d}{dy} \left(K_y \frac{dC}{dy} \right) + \left(K_z \frac{dC}{dz} \right) + S, \quad (1.4)$$

де x – вимірювана координата від джерела вздовж напрямку вітру;

y – вимірювана координата від джерела перпендикулярно напрямку вітру;

z – вертикальна координата, що відраховується від поверхні ґрунту;

$C(x, y, z)$ – середня концентрація дисперсної речовини при заданих координатах (x, y, z) точки;

K_y, K_z – коефіцієнти дифузії за напрямками y і z ;

U – середня швидкість вітру вздовж вісі x .

Якщо емісія ЗР або метеопараметри значно змінюються в часі або в просторі, використовується гаусівська модель димного клуба. При цьому вважається, що окремі клуби диму випускаються через фіксовані проміжки часу і кожен з них рухається за власною траєкторією у відповідності з метеоумовами на цей момент. На шляху кожен клуб диму збільшується у відповідності з турбулентним переміщенням. Параметри, які описують ріст димного клубу визначаються із емпіричних даних.

Однак гаусівська модель частіше використовується для прогнозу дисперсії безперервних викидів від поверхні землі або наземних джерел. Для випадкових викидів або аналізу окремих випадків рекомендується модель Лагранжа [85], або модель частинок. Її основна ідея – в розрахунку траєкторій багатьох частинок, кожна з яких містить фіксовану кількість забруднюючої речовини. Окремі траєкторії частинок формуються під дією

перенесення при середній швидкості вітру а також під впливом ймовірносних порушень. Через елемент ймовірності траєкторії описують суміш, яка утворюється внаслідок турбулентності. В принципі модель Лагранжа здатна описувати комплексні метеорологічні умови.

Алгоритм моделі Лагранжа [83] прогнозує дисперсію забруднюючої речовини, якщо відомі зміни базової решітки. Ця зміна базової решітки в цілому залежить від того, що напрямок вітру або вектор поля вітру накладається на напрямок забруднюючої області. Модель Лагранжа може бути представлена таким чином:

$$\langle c(r,t) \rangle \geq \iint p(r,t \| r',t') S(r',t') dr' dt', \quad (1.5)$$

де $\langle c(r,t) \rangle$ – середня концентрація забруднюючої речовини в місці r і момент часу t ;

$S(r',t')$ – параметр, що визначає джерело викиду;

$p(r,t \| r',t')$ – функція ймовірності переходу від місця r в момент часу t до місця r' в момент часу t' .

Ймовірнісна функція повинна бути визначена як функція повних метеорологічних даних біля джерела. Якщо джерело викиду містить механічний пил, то цей параметр повинен бути доданий в якості розподілу міри і щільності часток. Модель Лагранжа описує перенесення окремих повітряних потоків за певний період часу під впливом атмосферних полів, і розповсюдження домішок забруднюючих речовин. Цей підхід дає ефективну в розрахунковому плані систему, однак при цьому дуже важко належним чином охарактеризувати взаємодію газопилового потоку з атмосферними масами.

При моделюванні розсіювання на місцевості зі складним рельєфом необхідно враховувати вплив топографічних ефектів на розсіювання. Якщо такі ефекти мають місце в більш крупному масштабі, ніж область

моделювання, то їх вплив можна розглядати використовуючи метеодані. За відсутності таких даних, застосовуючи моделювання, можна отримати тривимірну структуру впливу топографічних особливостей місцевості на течію повітря. На основі цих даних при допущенні горизонтальної однорідності може проходити моделювання розсіювання забруднюючих речовин за моделлю Гауса. Однак якщо швидкість та напрямок вітру значно змінюються, то використовуються моделі Лагранжа або Ейлера.

У монографії Марчука Г.І. [93] пропонується складна динамічна модель забруднення повітряного басейну викидами техногенного походження. Для отримання розподілу усереднених значень концентрації домішок в заданій області були використані рівняння перенесення і дифузії домішок в атмосфері. Модель базується на тому, що концентрація домішки в елементі об'єму повітря залишається постійною, тому уздовж траєкторій руху цього елемента об'єму тотожно виконується нерівність $dq/dt = 0$, або

$$\frac{\partial q}{\partial t} + v_1 \frac{\partial q}{\partial x} + v_2 \frac{\partial q}{\partial y} + v_3 \frac{\partial q}{\partial z} = 0, \quad (1.6)$$

де $q(t, x, y, z)$ – ейлерове поле об'ємної концентрації;

v_1, v_2, v_3 – складові швидкості (x, y, z) потоку повітря.

У роботах Алояна А.Е., Пененко В.В. [92] при побудові чисельних моделей локальних атмосферних забруднень, використовуваних при спільному рішенні з рівняннями перенесення і дифузії домішки, вирішувалися повні рівняння гідротермодинаміки.

У роботі Баранової О.М. [61] застосовано модель оцінки величини потенціалу забруднення атмосфери для міських умов. При цьому в роботах [44, 69] запропоновано спрощену методику, що базується на можливості представлення щільності ймовірності концентрації домішки з використанням логарифмічно-нормального розподілу. В результаті проведених досліджень

виявлено зв'язок між шуканим значенням потенціалу забруднення атмосфери і такими імовірнісними метеорологічними характеристиками, як ймовірність інверсій, ймовірність слабого вітру та ймовірність туману.

Для опису осадження аерозолів в умовах змінного рельєфу Меньшовим М.В. [96, 97] при використанні моделі Гауса враховуються класи стійкості (стабільності) атмосфери за Пасквілом, що дозволило авторам провести вертикальне осереднення та розглядати двомірну задачу. Розв'язок моделі дозволяє отримати поле приземних концентрацій аерозолу, накладене на ізолінії рельєфу, що дає можливість аналізувати характер розподілу концентрацій у контрольних точках розрахункової області.

При необхідності розгляду термальних вітрових систем використовують прогностичні моделі, які дають можливість моделювати максимально можливе забруднення. В залежності від рельєфу застосовують гідростатичний або негідростатичний методи. Моделі цього типу вимагають складної комп'ютерної обробки.

Авторами в роботі [99] запропоновано комплекс методів та підходів для точнішого визначення необхідних для моделювання вхідних даних із використанням геоінформаційних технологій та методів просторового аналізу даних, що буде особливо ефективним за умов змінного рельєфу та малої кількості даних первинних спостережень. Запропоновані методи просторового аналізу та підходи дозволять підвищити точність моделювання та визначити заходи, які необхідно вжити першочергово для зниження негативного впливу викидів на населення та на вразливі природні об'єкти чи локальні екосистеми міст.

Найбільш добре вивченим на сьогодні є процес розсіювання забруднюючих речовин від високих точкових джерел. Існуючі моделі розсіювання забруднюючих речовин побудовані авторами без врахування впливу рельєфу і параметрів забудови [100]. Такі моделі не дозволяють прогнозувати реальні ситуації, пов'язані з архітектурно-планувальними рішеннями окремих будівель і фрагментів міської забудови. Існуючі моделі

поширення забруднюючих речовин поблизу будівлі являють собою або напівемпіричні залежності, справедливі лише для конкретних ситуацій і компоновок будівель, які передбачалися при постановці експерименту, або використовують апарат математичної статистики для обробки даних натурних вимірів. Крім того, вони не враховують усього розмаїття природних і кліматичних умов, хоча знайшли практичне застосування при розрахунках забруднення повітря на виробничій території.

Аналіз існуючих моделей поширення забруднень у місті показав, що застосування загальноприйнятих формул для розрахунку полів концентрацій домішок, які створюються джерелами, розташованими поблизу будівлі (будівель), часто призводить до неточних результатів [101]. Складність опису полів потоку, що виникають навколо будівлі, з різкими перепадами швидкостей і неоднорідною турбулентністю утруднює аналітичне рішення рівнянь дифузії. Крім того, великий обсяг інформації про форму будівель не дозволяє без розробки спеціальних методів параметризації міської забудови досягти кінцевої мети в галузі створення інженерних методів розрахунку перенесення і розсіювання компонентів забруднення атмосфери.

Нормативна методика ОНД-86, що застосовується в Україні [102], створює складності створення єдиних підходів до цього питання в рамках європейських і світових стандартів. ОНД-86 не дозволяє врахувати цілий ряд спеціальних процесів, що виникають під час розсіювання викидів шкідливих речовин в атмосфері, як «задимлення», «виснаження», вологе й сухе осадження, хімічні перетворення речовин в атмосфері. Досить приблизно проводиться облік регіонально залежних метеорологічних і фізичних характеристик атмосфери. Ця модель призначена, насамперед, для розрахунків найгірших полів концентрації, а не для розрахунків поточних концентрацій за конкретних метеоумов. У моделі ОНД-86 використовується спрощений опис розсіювання шкідливих речовин, і обмежений обсяг метеорологічної інформації, характерний для конкретної ділянки.

Аналізуючи різноманіття моделей, слід зробити висновок, що наразі

відсутні наукові публікації, де обговорювалися б результати експериментів з визначення коефіцієнтів дисперсії на території України (для обґрунтованого застосування їх в моделі Гауса при прогнозуванні міграції домішок), і знаходилось обґрунтування правильності використання емпіричних залежностей для коефіцієнтів дисперсії та інших параметрів. У цілому можна сказати, що аналітичні моделі не дозволяють комплексно врахувати ті закономірності, які суттєво впливають на перенесення домішок в атмосфері, в силу тих припущень, які застосовуються для отримання аналітичного рішення [92].

Існуючі моделі поширення забруднюючих речовин побудовано без урахування впливу рельєфу і параметрів забудови. Вони справедливі лише для конкретних ситуацій і компонувань будівель, які були задані при постановці експерименту, або ж використовується математичний апарат для статистичної обробки даних натурних замірів. Крім того, вони не враховують усього різноманіття природних і кліматичних умов, параметрів забудови і спрямовані на визначення лише мікрокліматичних параметрів повітряного середовища [103]. Це, насамперед, стосується практично не вивченої області перенесення маси, тепла і аерозольних частинок на рівні мікрошорсткості, тобто в середовищі перебування людини.

1.3 Аналіз систем газоочищення промислових підприємств

Питання захисту атмосферного повітря, впровадження високоефективного пилогазоочисного обладнання є однією із складових, що впливають на формування рівня екологічної безпеки в цілому. Аналіз основних забруднювачів, які викидаються в атмосферу промисловими підприємствами України, показує, що актуальною проблемою є вибір газоочисного обладнання для комплексного очищення відхідних газів від твердих та хімічних забруднювачів.

Ступінь забруднення атмосферного повітря значною мірою залежить

від ефективності природоохоронних заходів, які включають в себе і удосконалення методів пилогазоочищення. В 1996 р. ЄС опубліковано Директиву «Про інтегроване попередження забруднення й контролю над ним». Згідно із цією директивою, рішення про можливість одержання інтегрованого дозволу на викиди, скидання забруднювачів і розміщення відходів ухвалюється на основі екологічного аудита підприємства, в ході якого для кожного виду виробництва складається баланс забруднювачів, ураховуються всі викиди, скиди й відходи, здійснюється зіставлення екологічних показників з базовими показниками «найкращих доступних методів», оцінюється енергоефективність виробництва, ймовірність виникнення аварійних ситуацій, усунення їх наслідків, план реабілітації території у випадку закриття виробництва. Згідно з визначенням «найкращі доступні методи» – це найбільш ефективні шляхи розвитку й методи керування виробництвом, що забезпечують можливість попереджати викиди й негативні впливи на навколишнє середовище, а коли це неможливо, – знизити негативний ефект.

Необхідним стимулом інноваційних процесів є прийняття державних стандартів екологічного управління та керування [104, 105]. Орієнтація промислового виробництва на виконання вимог цих стандартів дозволяє оптимізувати та стабілізувати роботу основного технологічного обладнання, сприяє технічному переоснащенню промислових підприємств, удосконаленню систем газоочищення, що призводить до дотримання нормативів викидів забруднюючих газів.

За статистичними даними, з метою охорони атмосферного повітря підприємствами України у 2014 році виконано 323 природоохоронні заходи. Фактичне зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря після впровадження повітроохоронних заходів склало 153,4 тис.т. Зокрема, будівництво та введення в дію нових газоочисних установок та споруд дозволило зменшити викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря на 106,5 тис. т; підвищення ефективності існуючих очисних установок

(включаючи їх модернізацію, реконструкцію і ремонт) – на 18,2 тис. т [4].

Таким чином, аналіз існуючого стану виробництва та природоохоронних технологій, розробка та модернізація газоочисного обладнання у цілому призводить до зменшення забруднення атмосферного повітря та підвищення рівня екологічної безпеки.

Технологічні та аспіраційні викиди промислових підприємств являють собою складні аерозольні системи, що містять різні газоподібні компоненти, пил сировини або готового продукту, а також смолисті сполуки, пари кислот і води. Відмінною рисою промислових газів, що відходять, є те, що шкідливі речовини перебувають у різних агрегатних станах. Дисперсний склад твердих частинок, що містять газові викиди, змінюється в широких межах, середній діаметр часток, як правило, не перевищує 10 мкм. Концентрація шкідливих речовин у вентиляційних викидах промислових підприємств невелика, але через значні обсяги вентиляційного повітря валові кількості шкідливих речовин, що надходять в атмосферу, досить значні. Через недосконалість технологічних процесів та пилогазоочисного устаткування діючих підприємств в атмосферу надходять гази, що містять різні за токсичністю газоподібні компоненти, пари органічних рідин, дрібнодисперсні краплі та тверді частинки [106]. Всі наведені факти ставлять завдання правильного вибору і розроблення вискоєфективного пилогазоочисного обладнання, здатного здійснювати комплексну очистку газів.

Існуючі на промислових підприємствах схеми очищення газів мають одну, дві, а на деяких стадіях – і більшу кількість ступенів. У промислових схемах використовується як паралельне, так і послідовне з'єднання апаратів. При послідовному з'єднанні не відбувається поділу проміжних потоків. Така схема дозволяє підвищити ефективність газоочисної системи. Паралельне з'єднання застосовують при необхідності очищення великих обсягів газів і при малій продуктивності одиничних апаратів. Використовуватись також комбіновані схеми з'єднання апаратів, але і це не забезпечує необхідної

ефективності очищення. Така ситуація пояснюється експлуатаційними причинами [107], а також деякими особливостями технологічного устаткування та фізико-хімічними характеристиками газів, які викидаються [108].

Традиційні схеми газопилоочищення промислових підприємств представлені апаратами сухого та мокрого типу. Мокре очищення газів застосовують у тих випадках, коли припустиме охолодження і зволоження газів, що очищаються, і добре відпрацьовані заходи щодо запобігання бризковинесення та утилізації відпрацьованих стоків. Незважаючи на зазначені обмеження, мокре газоочищення в ряді випадків може виявитись більш доцільним і виправданим, ніж сухе. Наприклад, при використанні цього способу очищення в дробарних відділеннях витрати на експлуатацію обладнання скорочуються майже в 2 рази, а капітальні витрати на устаткування – в 12-15 разів у порівнянні із сухим пилоочищенням [109]. Апарати мокрого пиловловлення частіше більш прості за конструкцією і мають ефективність, властиву найбільш складним сухим пиловловлювачам. При використанні мокрих пиловловлювачів не відбувається вторинного пиловиділення, крім того, у комбінованих схемах у цих же апаратах здійснюється і процес абсорбції, тобто апарат стає багатофункціональним. Такі схеми більш компактні та прості в експлуатації, що дуже важливо при очищенні багатокomпонентних викидів.

У багатьох випадках вибір типу газоочисного апарата проводиться без достатніх обґрунтувань. Це призводить до застосування різних апаратів для очищення однакових викидів іноді навіть на одному підприємстві. Наприклад, для очищення газів виробництва кормових знефторених фосфатів використовуються абсорбери розпилюючого типу (АРТ), механічні, Вентурі, зі зрошуваною зваженою насадкою та ін.

Велика розмаїтість наявних типів пилогазоочисного обладнання ускладнює його раціональний вибір для кожного конкретного випадку. Правильну порівняльну оцінку газоочисних апаратів і обґрунтування їх

вибору можна зробити лише при одночасному врахуванні їх гідродинамічних і дифузійних характеристик. При цьому використовують різні співвідношення, що характеризують продуктивність апарату, енергетичні витрати на проведення процесу та ін. Однак проведення аналізу можливе тільки при наявності об'єктивних даних про процес, масообмінні та гідродинамічні характеристики порівнюваних апаратів.

Більшість апаратів для очищення газів від газовидних та твердих домішок, не може ефективно працювати із забрудненими газовими і рідинними потоками [110, 111] та характеризуються низькою пропускнуою здатністю, яка обумовлена невеликими гранично допустимими швидкостями газу в апаратах. Це призводить до того, що апарати мають великі габаритні розміри (наприклад, діаметр абсорбційних колон може досягати 10-12 м), а витрати на їх виготовлення, монтаж та транспортування – дуже великі. Крім того, в апаратах великого діаметру неможливо забезпечити рівномірний розподіл рідкої фази по перерізу апарату, що призводить до різкого зниження ефективності очищення.

Наведені проблеми служать причиною того, що багато промислових газових викидів взагалі не очищаються. Як приклад, можна навести димові гази підприємств металургії, енергетики, хімічної, нафтохімічної та інших галузей промисловості, танкові та продувочні гази різних підприємств, викиди пилу і парів органічних розчинників у виробничих приміщеннях підприємств.

Досвід експлуатації пилогазоочисних апаратів показує, що вони повинні відповідати таким вимогам [112, 113]:

- висока ефективність й інтенсивність;
- простота конструкції;
- універсальність (скорочення типів апаратів полегшує виготовлення, ремонт й експлуатацію);
- нечутливість до забруднень оброблюваних газів і рідин;
- відносно низька енергоємність.

Все вищенаведене висуває завдання підвищення інтенсивності процесів газоочищення та пиловловлення з метою зменшення техногенного навантаження на довкілля.

1.3.1 Методи інтенсифікації процесів газоочищення

Технологія газоочищення базується на дифузійних сорбційних процесах (фізичній абсорбції і хемосорбції). Закономірності пиловловлювання – масопередачі аналогічні закономірностям дифузійних процесів, оскільки тиск зважених частинок у турбулентному газовому потоці подібний до руху молекул. Підвищення ефективності процесів газоочищення можна досягти шляхом збільшення коефіцієнта масопередачі та збільшенням поверхні контакту фаз. Існує два підходи до вирішення цього завдання: режимний і конструктивний [114].

У першому підході визначальним параметром є проведення процесу газоочищення в інтенсивному турбулентному режимі. Останніми роками чітко визначився напрям, пов'язаний із проведенням дифузійних і подібних до них процесів в інтенсивних режимах розвиненої турбулентності при великих швидкостях потоків газів і рідин. У таких режимах працюють і пінні апарати, і насадкові інтенсифіковані колони, і швидкісні масообмінні апарати, і тому подібне устаткування, що дозволяє різко підвищити інтенсивність апарата [115]. Високих коефіцієнтів масопередачі можна досягти шляхом інтенсифікації турбулентної течії в одній або обох фазах і забезпечення високих швидкостей щодо їх руху. Ця перевага досягається за рахунок збільшення витрат на підведення енергії, необхідної для проведення тієї чи іншої операції. До якоїсь межі розмір контактної пристрою збільшується повільніше, ніж зменшується площа його поперечного перерізу, тому ефективний об'єм апарата знижується, і великі енергетичні витрати можуть бути компенсовані завдяки меншим капіталовкладенням.

Високі швидкості потоку призводять до збільшення не лише коефіцієнтів масопередачі, але і поверхні контакту фаз. Підвищення турбулізації двофазного потоку викликає безперервне проникнення вихорів кожної фази через межу їх поділу, тобто веде до її збільшення за рахунок роботи проти сили поверхневого натягу. Наслідком безперервного оновлення є зменшення середнього віку поверхні контакту фаз. Крім того, підвищення турбулентності призводить до зростання вихрового обміну і, зокрема, перенесення маси до межі поділу фаз, унаслідок чого зменшуються ефективність товщини дифузійних опорів, які стають тим меншими, чим сильніший турбулентний обмін

У найчастіше застосовуваних абсорберах із протиточним рухом фаз швидкості газу обмежені значеннями 1,5-2 м/с. Збільшення швидкості газу вище зазначеної межі призводить до виникнення виносу рідини і “захливання” колон. Підвищити швидкість руху фаз дозволяють апарати з прямоточним режимом взаємодії фаз. За способом подачі фаз прямоточні апарати поділяються на апарати із висхідним прямотоком і апарати із низхідним прямотоком.

Апарати із висхідним рухом плівки були запропоновані Семеновим [116]. При висхідному прямоточному русі фаз можуть досягатися швидкості газу порядку 25 м/с, однак робочі щільності зрошення в цих умовах обмежені. Розроблено різні конструкції прямоточних апаратів із висхідним рухом фаз: трубчасті, із висхідним рухом плівки, вихорові, розпилювальні, із висхідним закрученим потоком та ін. [117-120]. Недоліком апаратів із висхідним прямотоком є значний гідравлічний опір, нестійка робота при зміні навантаження, нерівномірний розподіл потоків по перетину апарата, великі витрати енергії [116].

В апаратах із низхідним прямоточним рухом фаз у зоні контакту досягаються високі навантаження за рідиною і відносна швидкість газу в них може змінюватися в діапазоні від 0,1 до 25 м/с. При швидкостях газу 2-10 м/с опір у випадку низхідного прямотока в 10-20 разів нижчий, ніж при

протитоці і висхідному прямотоці [116]. Крім того, при низхідному прямотоці в насадочних абсорберах вплив щільності зрошення на опір насадки в 1,5- 2,2 рази менший, ніж при протитоці [121]. При швидкостях газу вище 8-12 м/с при низхідному прямоточному русі фаз спостерігається різка інтенсифікація перенесення маси в плівці [122]. В міру збільшення швидкості газового потоку при постійному значенні критерія Рейнольдса Re_p відбувається приблизно пропорційне збільшення коефіцієнта масовіддачі в рідині. Наприклад, при швидкості газу 40 м/с інтенсивність масоперенесення в 10 разів перевищує інтенсивність масоперенесення в плівці рідини, що стікає під дією сили ваги при однаковому значенні Re_p [123]. Підвищення коефіцієнта масоперенесення в плівці рідини, що рухається прямоточно з потоком газу, викликано перемішуванням рідини по товщині шару за рахунок розвитку на вільній поверхні плівки хвиль різної амплітуди і частоти, а також дією крапель рідини, що з'являються при руйнуванні гребенів хвиль. Таким чином, застосування низхідного прямотока дає можливість інтенсифікувати масообмін в абсорбційних апаратах при низьких енергетичних витратах на проведення процесу.

Конструктивний метод інтенсифікації процесу масообміну полягає в застосуванні різних контактних елементів, що забезпечують взаємодію фаз в апараті. Збільшення поверхні контакту фаз при цьому досягається розподілом рідини у виді плівки по поверхні насадки, організацією плівкового плинину рідини усередині труб чи пакетів пластин, диспергуванням рідини в потоці газу, створенням струминного режиму плинину рідини, диспергуванням газу в рідині шляхом барботажа, створенням шару піни в тарілчастих апаратах, створенням режимів інтенсивного перемішування фаз, які сприяють беззупинному відновленню поверхні рідини. Визначальними параметрами конструктивного підходу є розміри, форма і розташування елементів контактної пристрою.

Одним із способів турбулізації системи газ - рідина є перетворення її на дуже рухливу нестабільну піну за рахунок кінетичної енергії газу [124]. Чим

більша швидкість газу, тим рухливіша піна і менші розміри її чарунок. Із зростанням w_2 чарункова структура поступово зникає і замінюється на вихрові потоки бульбашок і струменів газу і плівок рідини. При $w_2 > 2,0-2,5$ піна має струминний характер. Подальше збільшення швидкості газу викликає закономірне зростання висоти піни, яке продовжується залежно від висоти початкового шару рідини до $w_2 = 3-3,5$ м/с і навіть до 4 м/с. При таких швидкостях газу різко зростає бризковіднесення [125].

Високотурбулізовані пінні шари утворюються в колонному обладнанні з тарілчастими контактними елементами провального типу, яке дозволяє поєднувати процеси абсорбції і пиловловлювання. При цьому застосування тарілок провального типу обумовлене наступними чинниками: низькі капітальні витрати на виготовлення і монтаж провальних тарілок в порівнянні з тарілками з переливом рідини; гідравлічний опір при рівних навантаженнях на 40-80 % менше, ніж ковпачкових [126]; висота колони з провальними тарілками на 1/3 нижче, а пропускна спроможність на 20-100% вище ковпачкової [127]. Відомі різні конструкції провальних тарілок: дірчасті, ґратчасті, трубчасті, хвилясті, ступінчасті, з відігнутими кромками щілин, з подвійною перфорацією, клапанні і ін. [128]. Основними конструктивними параметрами, які впливають на робочі показники провальних тарілок, є розмір отворів і вільний перетин тарілки. В більшості випадків вільний перетин провальних тарілок складає 18-20% [129], проте в деяких конструкціях перевищує 30%. Підвищення вільного перетину тарілки призводить до зростання продуктивності колони і, поряд з цим, до зменшення діапазону стійкої роботи устаткування. Тарілки з великим вільним перетином менш схильні до заростання при обробці запиленних газів і рідин, що містять речовини, які створюють відкладення на кромках отворів тарілок [130-131]. Іншим конструктивним параметром, що впливає на показники роботи провальних тарілок, є розмір отворів. Встановлено, що із збільшенням діаметру отворів знижується вплив забруднень і відкладень на стійку роботу провальних тарілок [132, 133] і за інших однакових умов

збільшується висота газорідинного шару [124, 135]. У роботах [136 - 140] наголошується, що збільшення діаметру отворів в провальній тарілці понад звичайні 30 мм призводить не лише до кількісних, але і до якісних змін характеру протиточного руху фаз. Якщо для тарілок із звичайною перфорацією характерне пульсуюче проходження газу і рідини через отвори (рідина зливається через одну групу отворів, а газ проходить через іншу), то для провальних тарілок з крупною перфорацією характерне одночасне проходження рідини і газу через один і той же отвір, причому рідина стікає в центрі отвору, а газ проходить периферійною кільцевою зоною, утвореною кромкою отвору і струменем стікаючої рідини. Такий характер проходження потоків через отвори призводить до зниження швидкості їх заростання відкладеннями при роботі із запиленими газовими потоками і рідинами, що викликають утворення інкрустацій.

Дуже часто для створення розвинутої міжфазної поверхні рідку фазу диспергують. Інтенсивний турбулентний режим призводить до подрібнення рідинного потоку на краплі, що призводить до підвищення ефективності процесів пилогазоочищення за рахунок багатократного оновлення поверхні контакту фаз. За даними роботи [141] при крапельному режимі течії рідини коефіцієнт масопередачі в три рази перевищує значення коефіцієнтів при плівковій течії рідини. Для реалізації такого режиму використовують апарати відцентрової, вихорової, розпилювальної, ударної дії. Це апарати, течія в яких характеризується високим ступенем турбулентності. Крім цього, гідродинаміка таких апаратів дозволяє здійснювати розпил рідини на дрібні краплі, що призводить до значного прискорення процесу масопередачі та підвищення ефективності пиловловлювання [142 - 149]. Від розміру крапель залежить ефективність газоочищення. При розпилюванні рідини форсунками або подрібненні рідини за рахунок енергії газового потоку (скрубери Вентурі) утворюються краплі розміром від 50 до 500 мкм. Зрошувачі, що використовуються в тарілчастих скруберах, утворюють великі краплі діаметром 600 - 800 мкм і більше. У цих же апаратах утворення крапель може

відбуватися в процесі розриву бульбашок. В цьому випадку утворюються краплі, діаметр яких лежать в двох інтервалах: 20 - 30 і 600 - 1200 мкм.

Але, як свідчать дані [148, 149], при зменшенні розміру краплі відбувається зниження інтенсивності внутрішньої циркуляції рідини в краплі, що, відповідно, знижує перенесення речовини. В умовах, коли перенесення речовини лімітується опором в рідкій фазі, це є обмежуючим фактором при застосуванні такого способу інтенсифікації процесів газоочищення.

В газоочисних апаратах з інтенсивним турбулентним гідродинамічним режимом інтенсифікація масообміну відбувається при ударній дії струменя або краплі рідини на плівку рідини [152 - 153]. При цьому спостерігаються наступні явища: рідина у середині плями розтікання рухається в плівці, товщина якої вимірюється десятими частинами міліметра; швидкість руху рідини в тонкій плівці плями розтікання досягає 10- 25 м/с; у міру розтікання рідини в плямі товщина її шару залишається незмінною і, як наслідок цього, із збільшенням радіуса віддалення від місця удару струменя або краплі швидкість рідини знижується, що створює умови для розриву граничного шару, і веде до оновлення поверхні контакту фаз. Всі наведені явища сприяють інтенсифікації процесів пилогазоочищення.

1.3.2 Закономірності процесів газоочищення в апаратах з інтенсивним гідродинамічним режимом

На даний час математичний опис гідродинаміки багатофазних середовищ розвивається за кількома напрямками, кожен з яких спирається на моделі, в основі яких лежить ряд спрощуючих припущень, що дозволяють застосувати сучасний математичний апарат для якісного опису картини перебігу процесу. Такий підхід пов'язаний зі складністю структури двофазного середовища, наявністю тепло- і масообмінних процесів, фазових переходів. Для опису гідродинаміки двофазних газокрапельних потоків

використовують різноманітні фізичні моделі [149], такі, як рух в пористому середовищі, усереднені рівняння руху з урахуванням фазових переходів, усереднені рівняння без фазових переходів та інші. При описі протитечійного руху крапель і газової фази часто розглядають рух одиночної краплі, що пояснюється наступним: високі відносні швидкості газу і рідини дозволяють отримати спектр крапель, близький до монодисперсних; на краплі однакового розміру діють однакові сили, і рух крапель відбувається за однаковими траєкторіями; при русі крапель на відстані, більшій десятикратного діаметра краплі, гідродинамічним впливом крапель між собою можна знехтувати. Що стосується визначення коефіцієнта масовіддачі, то справедливність таких розрахунків для одиночної краплі обґрунтована в роботі [154] і експериментально підтверджена дослідниками масообміну в полідисперсних системах [155, 156].

За відсутності циркуляційного руху середовища в краплі процес масоперенесення у сферичній частинці описується рівнянням молекулярної дифузії. На практиці такі випадки мають місце при дифузії у краплях і бульбашках при незначній циркуляції рідини або газу.

При малих значеннях часу в критерії Фур'є Fo відстань, на яку пошириться зона дифузії від поверхні частинки, набагато менша її радіуса [157]. У цьому випадку залежність критерію Нуссельта від числа Fo має вигляд:

$$Nu = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{Fo}}. \quad (1.7)$$

Для $Fo > 0,25$:

$$Nu' = \frac{2}{3} \pi^2 - \frac{1}{6Fo} \ln \frac{6}{\pi^2}. \quad (1.8)$$

У краплях, що рухаються в рідині, формується циркуляційна течія, лінії струму якої утворюють тороїд. Течія рідини в краплі призводить до інтенсифікації процесів масоперенесення. Процес описується циркуляційною моделлю Кроніга-Брінка, згідно з якою концентрація розчиненого компонента зберігається практично постійною уздовж ліній струму і змінюється тільки при переході від однієї лінії струму до іншої. Циркуляційна картина течії в краплі спостерігається при числах Рейнольдса $Re < 200$. При більш високих значеннях Re починається осциляція поверхні краплі. Усе це призводить до інтенсивного перемішування рідини усередині краплі. Циркуляційна картина всередині краплі представлена системою правильних торів, вкладених один в одного. Масоперенесення між циркуляційними лініями струму відбувається винятково за рахунок турбулентної (вихрової) дифузії, яка виникає внаслідок випадкових радіальних переміщень елементів рідини, які відбуваються під дією коливань краплі.

Масоперенесення у бульбашці відбувається значно швидше, ніж у краплях, внаслідок того, що коефіцієнти дифузії в газі на чотири порядки вищі, ніж у рідині. Ступінь вилучення різних газів з бульбашки діаметром 4 мм, що дорівнює 99 %, може досягатися вже при висоті шару рідини від 2 до 10-12 см. Процес масоперенесення в бульбашці складається з таких стадій: масоперенесення під час утворення, руху і коалесценції на поверхні рідини. При цьому ступінь поглинання в процесі утворення бульбашки і виходу її на поверхню рідини може становити до 50 % і вище. Крім того, у зв'язку з дуже великою швидкістю масоперенесення в процесі руху стає помітним вплив поверхневого опору.

У бульбашках невеликого розміру $d < 0,5$ мм, що рухаються у рідинах, циркуляція загальмована, і внутрішнє масоперенесення визначається молекулярною дифузиею. Для бульбашок з $d < 4$ мм процес масопередачі в бульбашках близький до стаціонарного практично на всій ділянці руху. Для бульбашок з $d > 0,5$ мм циркуляційний рух усередині бульбашки може

впливати на коефіцієнт опору і відповідно на швидкість підйому. Циркуляція впливає і на масоперенесення всередині бульбашки. Однак, вплив внутрішнього руху на масопередачу в бульбашці менш виражений, ніж у краплі. Так, для досить великих бульбашок з $d \gg 4,5$ мм дифузійне число Пекле Pe' , що характеризує відношення конвективного масоперенесення до дифузійного, становить усього 20-25.

Швидкість циркуляції біля поверхні бульбашки знаходять за формулою [158]:

$$w_{\omega} = 1,5w_{\sigma} \sin \Theta, \quad (1.9)$$

де w_{ω} – швидкість циркуляції біля поверхні бульбашки, м/сек;

Θ – кут між радіус-вектором і напрямком руху бульбашки, град.

Зміна форми краплі або бульбашки чинить істотний вплив на відносну швидкість руху дисперсної фази в суцільному потоці, поверхню контакту фаз, інтенсивність тепло- і масоперенесення, хемосорбції. При $Re_{кр} > 100$ необхідно враховувати вплив деформації краплі на коефіцієнт опору [159]. При розрахунку швидкості руху краплі в газовому потоці основним завданням є визначення коефіцієнта опору ψ_k , який враховує як сили тертя, так і різницю тиску в лобовій і кормовій її частинах. Відомо безліч емпіричних формул, що описують стандартну експериментальну криву коефіцієнта опору частинок сферичної форми (крива 1, рисунок 1.2) для певного інтервалу зміни числа Рейнольдса $Re_{кр}$.

Дослідження, проведене [159] з метою визначення швидкості руху твердих частинок округлої, але неправильної форми, показало, що при числі Рейнольдса $Re < 100$ коефіцієнт опору відповідав стандартній кривій опору. В інтервалі значень $Re = 100-3000$ експериментально знайдені значення коефіцієнта опору були вище розрахункових, причому при $Re=3000$ до 100%.

Це пояснюється коливанням частинок при їх діаметрі більше 0,2 мм і $Re > 100$, внаслідок того, що форма частинок впливає на утворення і відрив вихорів. Із збільшенням Re потужність вихору зростає, а інерційна складова сили опору збільшується по відношенню до сили в'язкості потоку. Зрив вихорів призводить до виникнення поперечних сил, в результаті дії яких рух частинки приймає складний характер з розгойдуванням і обертанням.

Можна припустити, що збільшення коефіцієнта опору частинок $\psi_{\text{ч}}$ викликано не тільки коливанням, так як коливання тіла дає максимальне збільшення $\psi_{\text{ч}}$ до 25% при $Re = 3000$, але і неправильністю форми, коли збільшення досягає 100%.

Питання врахування впливу форми крапель при визначенні коефіцієнта опору в літературі недостатньо узагальнено, і багато дослідників обмежуються рекомендаціями щодо використання розрахункових формул, отриманих для сферичних твердих тіл.

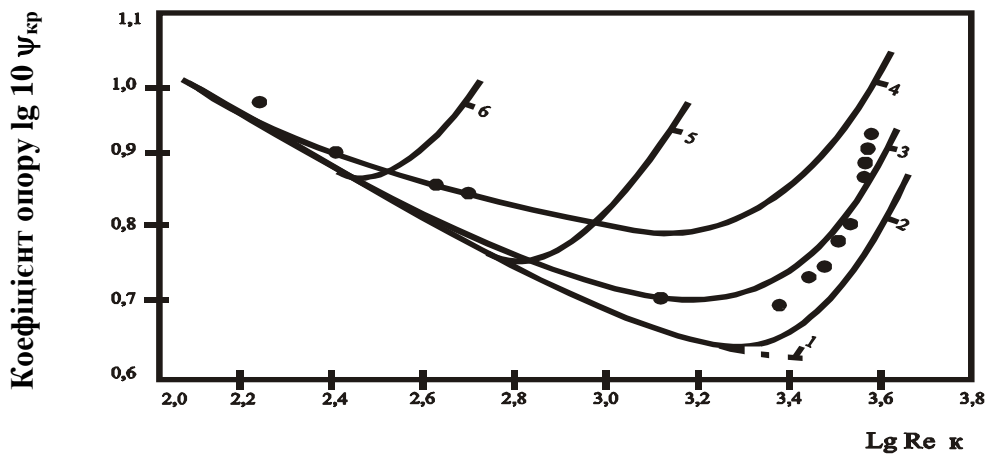


Рисунок 1.2 – Залежність коефіцієнту опору краплі від числа Рейнольдса: 1 – сферична крапля; 2 - 6 – деформовані краплі; 2 – $Z \cdot 10^{-3}$; 4 – $Z \cdot 10^{-3}$; 6 – $Z = 10^{-2}$; 2,5,6 – за даними [160]; 3,4 – розрахункові;

експериментальні точки [161] при $Z = (1,6 \div 1,9) \times 10^{-3}$, де $Z = v_c \left(\frac{\rho_c}{\sigma \cdot d_{\text{кр}}} \right)^{1/2}$ –

безрозмірне число

Вони справедливі у вузькому діапазоні зміни числа Рейнольдса: 10-100; 100-300; 300-600; 600-1000. При $Re \geq 1000$ практично немає жодного рівняння для розрахунку коефіцієнта опору краплі.

Тому рекомендується [162] визначити значення коефіцієнта опору краплі ψ_k за експериментальними кривими типу 2, 5, 6 (рисунок 1.2), побудованим в залежності від числа Рейнольдса для краплі.

Аналогічне становище спостерігається і при визначенні коефіцієнта опору бульбашок, які спливають в рідині. З рис. 1.2 видно, що ψ_b при $Re_b = 60 - 450$ нижче коефіцієнта опору твердої сфери і знижується до 0,15, а при $Re_b = 500-1500$ підвищується до 2,6 і стає практично постійним.

Цьому явищу дано пояснення в роботі [162], де виділяють три області руху:

– область недеформованих бульбашок

$$0 \leq Re_b \leq 666;$$

– перехідна область з періодичною деформацією бульбашок:

$$666 \leq Re_b \leq 1530;$$

– область стохастичної деформації бульбашок:

$$Re_b > 1530.$$

У другій області коефіцієнт опору бульбашок підвищується з 0,09 до 2,61, а в третій його величина стає постійною і рівною 2,61.

Таким чином, в принципі в механізмі деформації бульбашок і крапель немає ніяких відмінностей, що видно з порівняння залежностей їх коефіцієнтів опору від числа Рейнольдса (рис. 1.2). Але проведені дослідження не враховують вплив поверхневих і в'язкісних сил.

1.3.2.1 Пиловловлення в апаратах з інтенсивним гідродинамічним режимом

У пиловловлюючих апаратах звичайно діють відразу кілька механізмів осадження одночасно. Загальну ефективність уловлювання η визначають за виразом [163]:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_G)(1 - \eta_{Stk})(1 - \eta_R)(1 - \eta_D), \quad (1.10)$$

де η_G – ефективність гравітаційного уловлювання;

η_{Stk} – ефективність інерційного уловлювання;

η_R – ефективність відцентрового уловлювання;

η_D – ефективність дифузійного уловлювання.

У барботажних апаратах осадження відбувається під дією гравітації, інерції та дифузії одночасно. Газ у вигляді бульбашок проходить із невеликою швидкістю через шар рідини. При цьому усередині бульбашок виникає циркуляція газів.

Інерційне осадження твердих частинок у бульбашці відбувається за рахунок дії відцентрової сили, що виникає при циркуляції газів.

Коефіцієнт інерційного осадження η_{Stk} дорівнює [164]:

$$\eta_{Stk} = \frac{18w_o\tau_p}{d_o^2}, \quad (1.11)$$

де $\tau_p = \frac{d_p^2 \rho_p}{18\mu_2}$ – час релаксації – величина, що характеризує тривалість осадження частки, с.

Ефективність гравітаційного осадження при барботажі дорівнює:

$$\eta_G = \frac{3g\tau_p}{2d_o w_o}. \quad (1.12)$$

Для розрахунку ефективності дифузійного осадження в [165] запропонована наступна залежність:

$$\eta_D = 5,1\sqrt{D_u/w_o d_o^3}. \quad (1.13)$$

Зі зменшенням діаметра бульбашок збільшується ефективність осадження частинок. Механізм осадження при барботажі залежить від розміру частинок. Для частинок з $d_u \leq 0,5$ мкм основним механізмом осадження є дифузійний, для частинок більшого розміру переважає інерційний механізм осадження.

Інерційне осадження частинок відбувається і при вході запиленого газового потоку в шар піни на ґратах. При набіганні газових струменів на поверхню бульбашки за рахунок сил інерції відбувається інтенсивне осадження частинок пилу на поверхні плівки. Ефективність подібного виду осадження (названого «механізмом удару») визначається критерієм Стокса. За даними [164], ефективність пиловловлення при круглих отворах розміром d_0 у півтора раза більше, ніж при щілинних отворах шириною $b = d_0$.

При роботі скрубєрів у конденсаційному режимі відбувається інтенсифікація пиловловлення за рахунок конденсації пари. Для розрахунку ефективності пиловловлення часток медіанним діаметром $d_m \geq 0,4$ мкм в умовах конденсації η_k у [166] запропоновано залежність:

$$\eta_k = \frac{\Delta x}{1,1\Delta x + 0,41}, \quad (1.14)$$

де Δx – зміна вологовмісту в скрубєрі, кг/кг сухого газу.

У розпилювальних пилоочисних апаратах відбувається рух часток різного розміру при різних швидкостях. При цьому пилоочищення здійснюється за рахунок інерційного, дифузійного осадження, а також процесу захоплення.

Для тіла кулястої форми (сюди можна віднести і краплю) коефіцієнт осадження складе [167]:

$$\eta_{Stk} = \frac{4h^2}{d_k^2}, \quad (1.15)$$

де h – відстань від осі кулі до крайньої лінії струму, рухаючись по якій частинки захоплюються кулею, м.

Існує визначене мінімальне, критичне число Стокса, $Stk_{кр}$, при якому інерція частинки виявляється достатньою, щоб перебороти захоплення її газовим потоком, і вона досягає поверхні тіла. Таким чином, захоплення частки можливе при $Stk > Stk_{кр}$.

При ламінарній течії ефективність осадження не залежить від критерію Рейнольдса. При значеннях Re_z більших критичного (потенційне обтікання) лінії течії сильніше згинаються і обтікають тіло на ближчій від нього відстані, унаслідок чого при тій же значенні Stk ефективність осадження буде вищою.

При $Stk \geq 0,1$ при потенційному обтіканні коефіцієнт осадження на кулі визначають за емпіричною формулою [164]:

$$\eta_{Stk} = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,125)^2}. \quad (1.16)$$

Для розрахунку дифузійного осадження було запропоновано ряд формул. Так, при обтіканні газовим потоком кулі ефективність дифузійного осадження складає [167]:

$$\eta_D = 2\sqrt{2}(PeD_k)^{1/2}, \quad (1.17)$$

де $Pe = \frac{w_z l}{D_q}$ – критерій Пекле;

l – лінійний параметр, що характеризує обтічне тіло (у випадку кулі $l = d_k$), м.

Розглядаючи процес дифузійного осадження частинок за аналогією з дифузійними тепловими процесами, одержано інший вираз для розрахунку η_D на кулі [165]:

$$\eta_D = \frac{4}{Pe} \left(2 + 0,55 Re^{1/2} Sc^{3/8} \right), \quad (1.18)$$

де $Sc = \frac{w_z}{D_q}$ – критерій Шмідта.

Розмір частинки відіграє важливе значення при захопленні частинок за рахунок торкання частинкою поверхні обтічного тіла. Ефективність захоплення більше нуля й у тому випадку, коли інерційне осадження відсутнє. Ефект захоплення характеризується параметром R , що являє собою відношення діаметрів частинки й обтічного тіла (d_q/d_k).

Ефект захоплення дозволяє врахувати вплив розміру частинки на ефективність осадження, який не враховується при інерційному осадженні.

При потенційному обтіканні кулі, коли величина R настільки мала, що можна зневажити інерційними ефектами, ефективність захоплення складає [166]:

$$\eta_R = (1 + R^2) - \frac{1}{1 + R} \approx 3R. \quad (1.19)$$

В іншому граничному випадку, коли траєкторії осідаючих частинок прямолінійні:

$$\eta_R = (1 + R)^2 - 1 \approx 2R. \quad (1.20)$$

У критеріальному виді вираз для визначення ефективності захоплення має вигляд:

$$\eta_R = f\left(Stk; \frac{d_v^2 \rho_v}{d_k^2 \rho_z}\right). \quad (1.21)$$

Як впливає з виразів (1.20, 1.21), ефект захоплення стає значним при осадженні частинок на сферах дуже маленького діаметра.

У скруберах Вентурі реалізується механізм захоплення твердих частинок розпиленою рідиною. При введенні крапель води в потік газу ефективність захоплення зростає зі зменшенням розміру краплі і досягає великих значень для дуже дрібних частинок. Це пояснюється тим, що при такому способі пиловловлення створюються відносно великі швидкості частинок і краплі.

Ефективність скрубєрів Вентурі підвищується зі збільшенням кількості рідини, яка розпилюється, відносної швидкості газового потоку, розміру частинок і зі зменшенням величини краплі. Ефективність скрубєра Вентурі описана емпіричною залежністю [168]:

$$\eta = 1 - \exp\left(-KmStk^{1/2}\right), \quad (1.22)$$

де K – константа,

m – питома витрата рідини, м³/м³ газу.

Інша модель осадження пилу в трубі Вентурі запропонована в роботі [169]. Показано, що велика різниця між швидкостями газу та рідини дозволяє розглядати процес, що відбувається, як фільтрацію газів через об'ємний дрібнозернистий фільтр, зернами якого є крапельки води. Звідси й випливає висока ефективність скрубєрів Вентурі, в порівнянні зі ступенем очищення, який досягається у фільтрах.

Подальше дослідження процесу пиловловлення в скрубєрі Вентурі при розгляді моделі зернистого фільтра дозволило одержати вираз для розрахунку фракційної ефективності уловлювання пилу [168]:

$$\eta_{фр} = 1 - \exp\left(-1,5 \frac{m}{1-m} \frac{H}{d_{кр}} \eta_{кр}\right), \quad (1.23)$$

де H – ефективна товщина зернистого шару, м;

$\eta_{кр}$ – ефективність пиловловлення одиночною краплею за рахунок інерційного та дифузійного механізмів.

У гідроциклонах осадження твердих часток відбувається за рахунок сил інерції. Ефективність відцентрового пиловловлювача для часток даного діаметру визначається з рівняння [165]:

$$\eta_{\omega} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi w_2 \tau_p n}{2h}\right), \quad (1.24)$$

де w_2 – швидкість газу в патрубку, що підводить, м/с;

h – ширина патрубку, м;

n – число оборотів зовнішньої спіралі в циліндричній частині циклона.

При осадженні частинок на плівку рідини велике значення має змочуваність пилу. Частинки, що погано змочуються, залишаються на поверхні рідини, не проникають у глибину і можуть бути причиною зіткнення з частинками, які підводяться до поверхні. Таким чином, відбувається вторинне віднесення часток та знижується ефективність пиловловлення.

Частинки, що змочуються, занурюються в рідину. При товщині плівки, більшій поперечного перерізу частинки, робота відриву частинки значно перевершує роботу, необхідну для її занурення в шар рідини. А враховуючи те, що товщина плівки звичайно складає не менше 0,3 мм, вторинне віднесення частинок газовим потоком неможливе.

Однак у роботі [169] показано, що ефективність осадження зважених частинок визначається інтенсивністю їхнього підведення до поверхні осадження і змочуваність частинок починає позначатися при роботі пиловловлювача на зворотній воді. Це дозволяє розраховувати ефективність мокрого пиловловлення при зрошенні чистою водою без урахування змочуваності пилу.

При проектуванні мокрих пиловловлювачів необхідно враховувати в'язкі властивості деякого пилу, велике забруднення газів і рідин, а також можливість утворення різного роду відкладень. Для запобігання зазначених явищ можна рекомендувати застосування апаратів з контактними пристроями, що не піддаються заростанню.

Перспективними в цьому відношенні є апарати з рухомою насадкою. Введення на тарілку додаткового елемента насадки поліпшує структуру шару і служить додатковим пристроєм, який турбулізує взаємодіючі потоки [115].

У той же час, можливості спрямованого керованого впливу на структуру турбулентного потоку найбільш повно реалізуються в апаратах із

регулярною рухомою насадкою (РРН). Регулярне розташування елементів насадки на гнучких струнах або твердих стрижнях дозволяє організувати вихрові зони із визначеним заданим кроком як у поздовжньому, так і в поперечних перерізах, забезпечує рівномірний розподіл потоків і однорідність газорідного шару.

Дослідження апарата ударно-інерційної дії [170] із РРН показали, що переважними механізмами осадження є інерційний і дифузійний. Отримано вираз для розрахунку ефективності інерційного пиловловлення:

$$\eta_{Stk} = 1 - \exp\left(-\frac{3 m_y K_3 w_{відн} t_e}{2 w_{кр} d_{кр}}\right), \quad (1.25)$$

де m_y – питоме зрошення, л/м³;

t_e – вертикальний крок розміщення насадочних елементів, м;

$w_{кр}$ – дійсна швидкість краплі, м/с;

$w_{відн}$ – відносна швидкість краплі, м/с;

Для коефіцієнта захоплення отримано рівняння, яке враховує умови взаємодії частинок із краплею рідини і фізико-хімічні властивості пилу:

$$K_3 = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,25)^2} \left[\exp\left(-5,1 \cdot 10^{-4} \frac{d_{кр}}{d_u}\right) - \exp\left(-4,5 \frac{l_k}{d_{кр}}\right) \right], \quad (1.26)$$

де $l_k = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_s - \rho_p)}}$ – капілярна постійна.

Для урахування турбулентно-дифузійного механізму осадження частинок розміром 1-2 мкм і більше у насадковій зоні апарата отримане рівняння для розрахунку ефективності пиловловлення:

$$\eta_D = 3,57 \left(\frac{w_2 d_{кр}}{D_2} \right)^{-1/4}. \quad (1.27)$$

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок про перспективність застосування апаратів цього типу в процесах пилоочищення.

Велика розмаїтість наявних типів газоочисного обладнання утруднює раціональний вибір його для кожного конкретного випадку. Правильну порівняльну оцінку обладнання і обґрунтування його вибору можна зробити лише при одночасному врахуванні гідродинамічних і дифузійних характеристик [171]. При цьому використовують різні співвідношення, які характеризують вихід продукції з одиниці об'єму апарата в одиницю часу, енергетичні витрати на проведення процесу та ін. Для об'єктивного вибору типу масообмінного апарата розроблено методики техніко-економічних розрахунків [172]. Однак проведення такого аналізу можливе тільки при наявності об'єктивних вихідних даних про процес, масообмінні та гідродинамічні характеристики порівнюваних апаратів.

1.4 Мета і завдання дослідження

Як впливає з аналізу літературних джерел, вирішення екологічної проблеми збереження якості атмосферного повітря неможливе без впровадження природоохоронних заходів, які включають застосування високоефективного газоочисного обладнання, здатного мінімізувати концентрацію забруднюючих речовин у викидах промислових підприємств. Тому мета дисертаційної роботи полягає в обґрунтуванні та розробленні науково-методологічних засад підвищення екологічної безпеки шляхом застосування високоефективного газоочисного обладнання. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

– провести оцінку стану екологічної безпеки при забрудненні атмосферного повітря викидами промислових підприємств та обґрунтувати необхідність застосування високоефективного газоочисного обладнання для зменшення техногенного навантаження на довкілля;

– з метою підвищення рівня екологічної безпеки населених пунктів та прогнозування забруднення атмосферного повітря провести математичне моделювання розповсюдження викидів промислових підприємств в умовах міської забудови;

– провести системний аналіз факторів впливу на стан екологічної безпеки при забрудненні атмосферного повітря та математичне моделювання оптимізації пилогазоочисних процесів;

– розробити методологію вибору пилогазоочисного обладнання та здійснити на її основі вибір високоефективних газоочисних апаратів, які дозволять проводити комплексне очищення відхідних газів промислових підприємств та забезпечують стійку роботу систем газоочищення;

– провести теоретичні та експериментальні дослідження факторів впливу на інтенсивність вибраних високоефективних газоочисних апаратів;

– обґрунтувати принципи вибору абсорбентів для хемосорбційного очищення викидних газів промислових виробництв з урахуванням вимог екологічної безпеки;

– провести випробування розроблених схем очищення викидних газів на дослідно-промислових установках і перевірку визначених параметрів проведення процесу газоочищення у умовах переходу від лабораторних до промислових апаратів.

Основні положення розділу опубліковані в роботах [58, 100, 106, 109,115].

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Підвищення рівня екологічної безпеки при техногенному навантаженні на довкілля від забруднення атмосферного повітря викидами промислових підприємств

У сучасних умовах поняття безпеки визначається як оптимальний, нормативний стан функціонування людиноємних систем із здатністю активно протистояти негативним змінам цього стану.

Екологічну безпеку в цілому можна розглядати як велику систему, що складається з ієрархічно пов'язаних між собою елементів, структур, підсистем різних рівнів організації, між якими існують тісні матеріально-енергетичні та ієрархічні зв'язки. Згідно з визначенням В. І. Вернадського, система – це сукупність різних функціональних одиниць (біологічних, людських, інформаційних тощо), які пов'язані з середовищем та служать для досягнення певної загальної мети шляхом дії над матеріалами, енергією, біологічними явищами та керування ними.

Системний підхід до розгляду поняття екологічної безпеки базується на всебічному вивченні умов формування небезпеки та домінуванні технічних методів регулювання її станів. Системний аналіз є одним із напрямів системного підходу та у вузькому сенсі є методологією ухвалення рішень, а в широкому сенсі – синтезом методології загальної теорії систем, системного підходу і системних методів обґрунтування та ухвалення рішень. Він дозволяє розділити складне завдання на сукупність простих завдань, розчленувати складну систему на елементи з урахуванням їх взаємозв'язку. Таким чином, системний аналіз виступає як процес послідовної декомпозиції вирішуваної складної проблеми на взаємозв'язані складові проблеми [173 –

176].

Математично велика система S може бути представлена у вигляді багатомірної складової структури:

$$S = \sum_{k=1}^n S_k, \quad (2.1)$$

де S_k – підсистеми великої системи;

n – розмірність або число підсистем великої системи.

Кожну підсистему S_k великої системи S , у свою чергу, можна представити у вигляді багатомірної складової структури, яка складається з m лінійно незалежних компонент – узагальненого ряду Фур'є [177]:

$$S_k = \sum_{i=1}^m c_{ki} \eta_i, \quad k = \overline{1, n}, \quad (2.2)$$

де η_i – ортонормовані базисні компоненти;

c_{ki} – коефіцієнти розкладення;

m – розмірність узагальненого ряду Фур'є.

Таким чином, з урахуванням (2.2) вираз (2.1) запишемо у вигляді:

$$S = \sum_{k=1}^n S_k = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m c_{ki} \eta_i. \quad (2.3)$$

Як витікає із виразу (2.3), велика система – це з одного боку, багатомірна сукупність підсистем S_k , з другого – багатомірна сукупність компонентів $c_{ki} \eta_i$.

Функціонування компонентів великої системи «Екологічна безпека» спрямовано на досягнення єдиної мети – поліпшення стану навколишнього

середовища [178, 179]. Усі підсистеми і компоненти великої системи об'єднані в єдину цілісність для досягнення єдиної мети.

Крім виразу (2.3), для математичного опису великої системи можна також використовувати вираз:

$$S = \sum_{k=1}^n S_k = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{m_k} c_{ki} \eta_{ki}, \quad (2.4)$$

де η_{ki} – базисні компоненти, характерні для кожної підсистеми S_k ;

m_k – число базисних компонентів ряду, характерних для кожної підсистеми S_k .

Таким чином, принцип декомпозиції будемо застосовувати до підсистем в системі екологічної безпеки та до компонентів підсистем. Система екологічної безпеки включає в себе підсистеми, які характеризують рівень екологічної безпеки в різних компонентах довкілля: екологічна безпека атмосферного повітря, екологічна безпека гідросфери; екологічна безпека літосфери. Кожна із складових системи екологічної безпеки взаємопов'язана з іншими і є складною та багаторівневою системою, яка характеризується певними функціями, характеристиками, здатністю до розвитку та удосконалення. Суцільна деградація довкілля починається з деградації одного компонента і поступово охоплює всі інші. Саме тому взаємодію малих систем в великій системі потрібно розглядати комплексно.

Оскільки атмосферне повітря є найрухомішим середовищем біосфери, то забруднюючі речовини разом з повітряними масами переносяться на значні відстані і можуть впливати на екологічну ситуацію цілих регіонів, порушуючи рівновагу екологічних циклів основних біогенних речовин в усіх компонентах екосистеми. Газопилові викиди промислових підприємств відрізняються багатоконпонентністю, великими обсягами, наявністю забруднюючих речовин різних класів небезпеки, при взаємодії яких можуть

виникати синергетичні ефекти, що призводить до зниження рівня екологічної безпеки навколишнього середовища. Техногенний вплив газопилових викидів промислових підприємств здатен викликати деградацію компонентів екосистем і впливати на стан екологічної безпеки атмосферного повітря безпосередньо та інших компонентів навколишнього середовища при міграції забруднюючих речовин і, таким чином, на систему екологічної безпеки в цілому. За інтенсивністю впливу і характеру процесу перенесення ЗР виділяють зони безпосереднього (ядро) і опосередкованого впливу (рис.2.1), які відрізняються інтенсивністю та межами впливу на довкілля і людину [106].



Рисунок 2.1 – Зони впливу викидів промислового підприємства на довкілля

Ядро або зона безпосереднього впливу – це штучно перетворена територія, на якій розташовані основні промислові об'єкти й споруди підприємства. Ця зона піддається різнобічному концентрованому впливу забруднюючих речовин, які викидаються з відхідними газами. Межа цієї зони визначається розмірами СЗЗ.

Зона опосередкованого впливу представлена територіями, які зазнають впливу забруднюючих речовин при їх перенесенні повітряними потоками та їхній міграції в компонентах середовища. Межа цієї зони визначається природно-кліматичними умовами, які впливають на розсіювання ЗР, та містобудівними умовами, якщо розглядаємо розповсюдження забруднюючих речовин в межах міста.

Розглянемо систему екологічної безпеки атмосферного повітря стосовно території населеного пункту (рис. 2.2). Одним із компонентів цієї системи є підсистема впливу відхідних газів промислових підприємств на якість атмосферного повітря. Компоненти цієї підсистеми можна класифікувати таким чином – природно-кліматичні: кліматичні фактори, які впливають на перенесення та розсіювання забруднюючих речовин (вітровий режим, температурна стратифікація, сонячна радіація); рельєф місцевості; містобудівні: віддаленість підприємства від районів житлової забудови, щільність та висотність забудови, озеленення території міста, стан санітарно-захисних зон підприємства; пов'язані з підприємством: служби управління екологічною безпекою (контроль за викидами), характеристика джерел викиду (висота, діаметр), характеристика технологічного процесу, об'єм, температура відхідних газів, концентрація та властивості забруднюючих речовин, природоохоронні процеси (системи газоочищення, газоочисне обладнання).

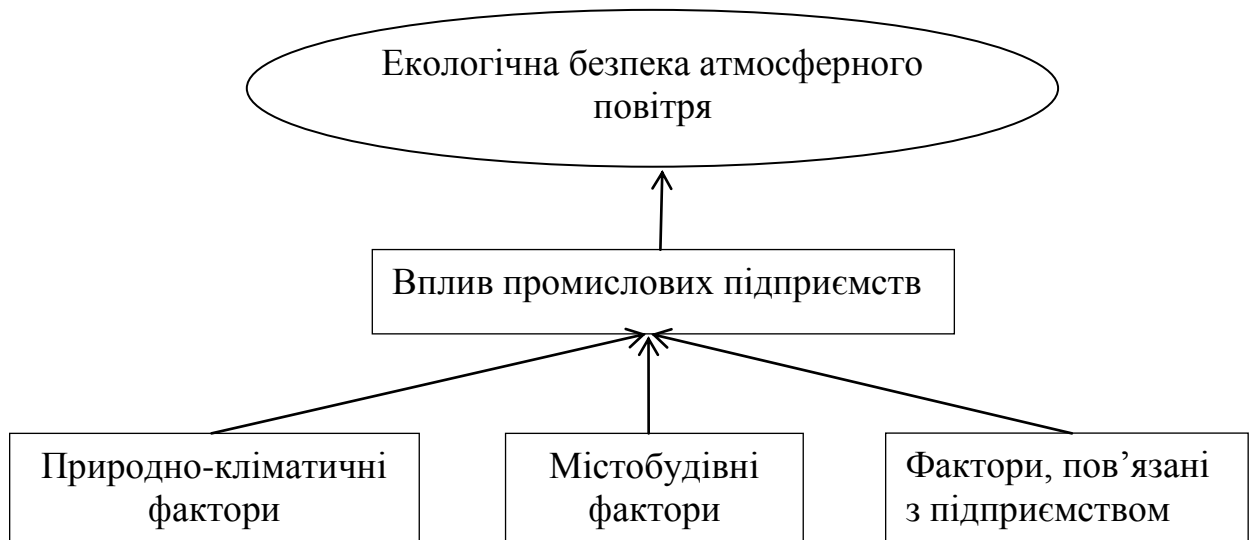


Рисунок 2.2 – Схема системи екологічної безпеки атмосферного повітря при впливі промислових підприємств

Зв'язок між якістю атмосферного повітря та станом екологічної безпеки встановлюють при оцінці техногенного навантаження на довкілля.

Зазвичай для аналізу і оцінки ступеня реальної небезпеки забруднення атмосферного повітря рекомендується використовувати наявні по місту статистичні дані результатів обстежень: здоров'я населення (фізіологічна реакція організму, захворюваність населення); стану зелених насаджень (біологічна продуктивність, накопичення шкідливих речовин в корі і листі); визначення рівня небезпеки (шкідливості) забруднень [180]. Ці результати узагальнюються з використанням відомих стандартних і нормативних методик. До них відносять:

- методи розрахунку середньорічного забруднення повітряного басейну (за роботами М.Е.Берлянда, Е.Ю.Безуглої, С.С.Чічеріна та ін.);

- критерії та методи оцінки небезпеки забруднення повітряного басейну для здоров'я населення (за роботами К.А.Буштуєвої, М.А.Пінігіна, В.М.Прусакова, Ю.М.Жаворонкова та ін.);

- критерії оцінки небезпеки забруднення повітряного басейну для рослинності (за роботами Р.Гударіна, Г.М.Ілька, В.С.Ніколаєвського та ін.);

- методи оцінки соціально-економічного збитку від забруднення повітряного басейну (за роботами О.Ф.Балацького та ін.).

Оцінка техногенного навантаження на довкілля при забрудненні атмосферного повітря викидами промислових підприємств в загальному вигляді включає процес ідентифікації, оцінки і прогнозування негативної дії на довкілля і/або здоров'я людей у результаті функціонування промислових виробництв, що можуть представляти небезпеку для населення і довкілля після досягнення певної величини, яку можна назвати «порогом техногенного навантаження» або «порогом техногенного впливу». Значення порогу техногенного навантаження спирається на поняття стійкості екосистеми або критичності стану екосистеми, або окремих її ланок і рівнів, якщо резерв міцності відсутній. Під принципом пороговості ефекту дії на біологічні системи потрібно розуміти не взагалі поріг будь-яких змін екосистем під час техногенного впливу, а вихід реакції біоти за межі звичайних фізіологічних коливань, що спостерігаються у процесі гомеостазу. Пороговість ефекту дії на угруповання (біогеоценоз) розглядаємо і розцінюємо за кінцевим, інтегральним ефектом на всю систему. Йдеться про поріг шкідливої дії, що призводить до виходу реакцій екосистеми за межі нормальних фізіологічних «системних» флуктуацій, а не про поріг прояву окремих біологічних реакцій. Визначення допустимих для екосистеми антропогенних дій (на фоні природної мінливості її стану) ґрунтується на понятті екологічного резерву цієї системи та інтервалі допустимих коливань її стану.

Для більш точного урахування дії забруднювачів порогові характеристики пропонуємо ранжувати таким чином [181]:

- при яких починаються зворотні зміни екосистеми;
- при яких починаються безповоротні зміни екосистеми;
- при яких спостерігається інтегральна міра трансформації екосистеми за рахунок модифікації або загибелі її компонентів.

Концептуальну модель оцінки техногенного навантаження з урахуванням послідовності настання екологічної небезпеки, наведено на рис. 2.3 [181].

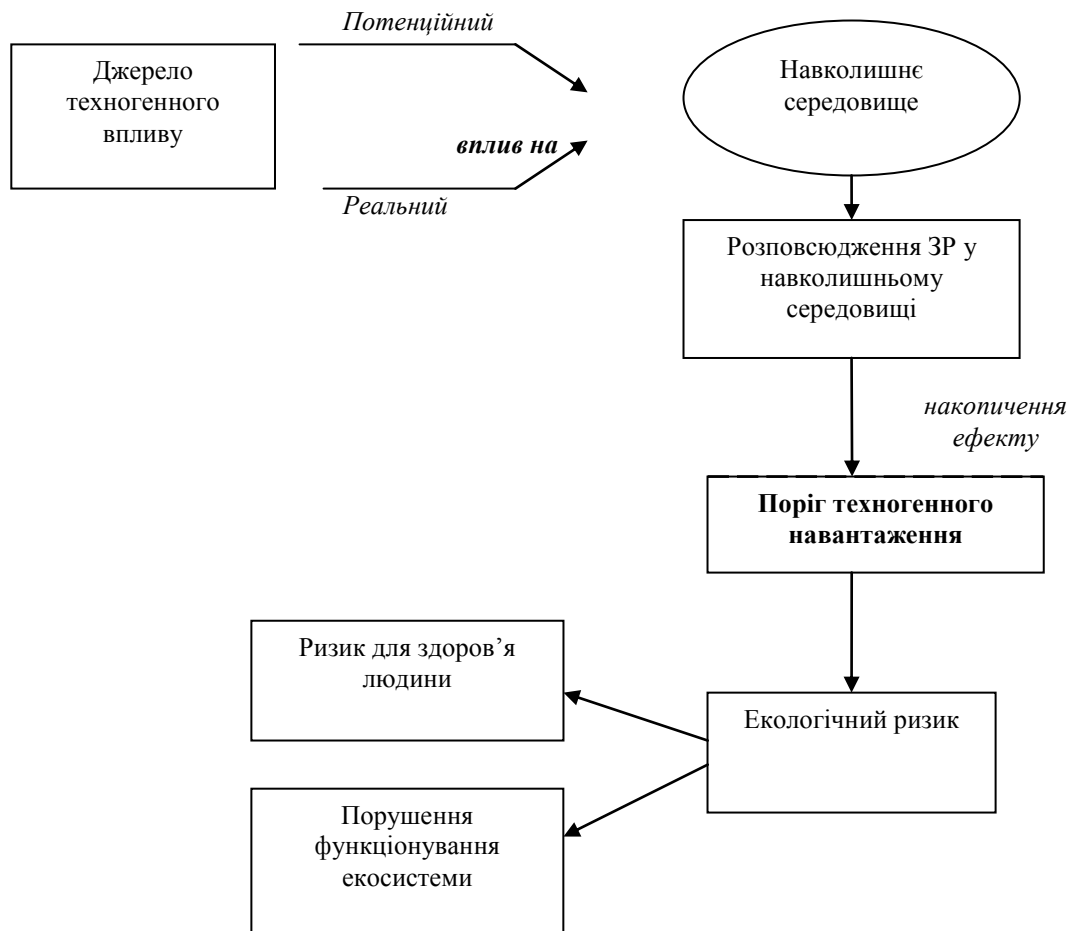


Рисунок 2.3 – Концептуальна модель оцінки техногенного навантаження з виявленням порогових характеристик

Вибір порогової характеристики техногенного навантаження пояснюється необхідністю, насамперед, екологічного нормування, яке до того ж не суперечить санітарно-гігієнічному нормуванню та концепції ГДК, а у певній мірі, доповнює їх, посилюючи діючі стандарти.

Оцінка техногенного навантаження включає в себе послідовні етапи загального аналізу забруднення об'єктів довкілля в результаті викидів стаціонарних джерел [182].

Крок 1. Ідентифікація джерел викидів.

Крок 2. Характеристика джерел викидів: об'єм та характеристика забруднюючих речовин, які містяться у відхідних газах на основі звітності підприємств 2ТП повітря. За наявності системи моніторингу можна скористатися даними прямих вимірів. За відсутності системи моніторингу або в разі, коли система не забезпечує повноти даних, можна розрахувати викиди на основі ГДВ.

Ідентифікація забруднюючих речовин, які містяться у відхідних газах промислових підприємств дозволяє провести оцінку впливу ЗР на довкілля та здоров'я населення шляхом урахування класу небезпеки речовини, комплексної дії забруднювачів, трансформації в навколишньому середовищі та здатності до міграції в компонентах довкілля. Вона буде обумовлювати і вибір методів газоочищення та вторинне забруднення компонентів довкілля відходами систем газоочищення (табл. 2.1).

Крок 3. Вибрати для вивчення передбачувану схему міграції забруднювачів у компонентах навколишнього середовища: повітрі, воді, ґрунті.

Крок 4. Використовуючи відповідні моделі, провести розрахунок розсіювання або міграції шкідливих речовин та розрахувати їх концентрації.

Крок 5. Використовуючи залежності «доза-ефект» при визначенні порогу техногенного навантаження, оцінити вплив забруднення атмосферного повітря на довкілля або здоров'я населення.

Оцінка техногенного навантаження на атмосферне повітря обґрунтовує необхідність проведення природоохоронних заходів як у населеному пункті, так і на промисловому підприємстві.

Прикладом природоохоронних заходів у місті щодо поліпшення якості атмосферного повітря буде раціональне планування населених пунктів, озеленення, організація транспортних потоків

Таблиця 2.1 – Вплив відходів газоочищення на компоненти НПС

№ п.п.	Вид забруднення	Властивості	Методи очищення	Відходи систем газоочищення	Компонент НПС
1	Тверді частинки	Дисперсність, фізико-хімічні властивості	сухе	Тверді	атмосферне повітря, літосфера
			мокре	Шлам	літосфера, гідросфера
2	Газоподібні ЗР	Фізико-хімічні властивості	сухе	Тверді (відпрацьовані адсорбенти, каталізатори)	літосфера
			мокре	Рідкі (відпрацьований абсорбент)	гідросфера
3	Комбіноване забруднення	Дисперсність, концентрація твердих частинок, фізико-хімічні властивості	мокре	Шлам	літосфера, гідросфера
			сухе + мокре	Тверді, шлам	атмосферне повітря, літосфера, гідросфера

Природоохоронні заходи на промисловому підприємстві будуть включати в себе дві групи заходів: перша – удосконалення технологічних процесів, модернізація технологічного обладнання з метою попередження потрапляння шкідливих речовин у відхідні гази; друга група – удосконалення систем очищення відхідних газів шляхом застосування високоефективного газоочисного обладнання з метою досягнення нормативних показників концентрації забруднюючих речовин на викиді з труби. При цьому будемо розглядати як введення в дію нових газоочисних установок, так і модернізацію існуючих систем газоочищення із, за можливості, мінімальними витратами [183].

Враховуючи вищесказане, управління якістю атмосферного повітря в системі населений пункт – промислове підприємство представимо у вигляді схеми (рис.2.4). Удосконалення систем газоочищення буде однією з ланок в забезпеченні екологічної безпеки атмосферного повітря населених пунктів.



Рисунок 2.4 – Управління якістю атмосферного повітря в системі населений пункт – промислове підприємство

Місце систем газоочищення як компонента підсистеми екологічної безпеки атмосферного повітря при забрудненні викидами промислових підприємств в системі екологічної безпеки представлено на рис. 2.5.

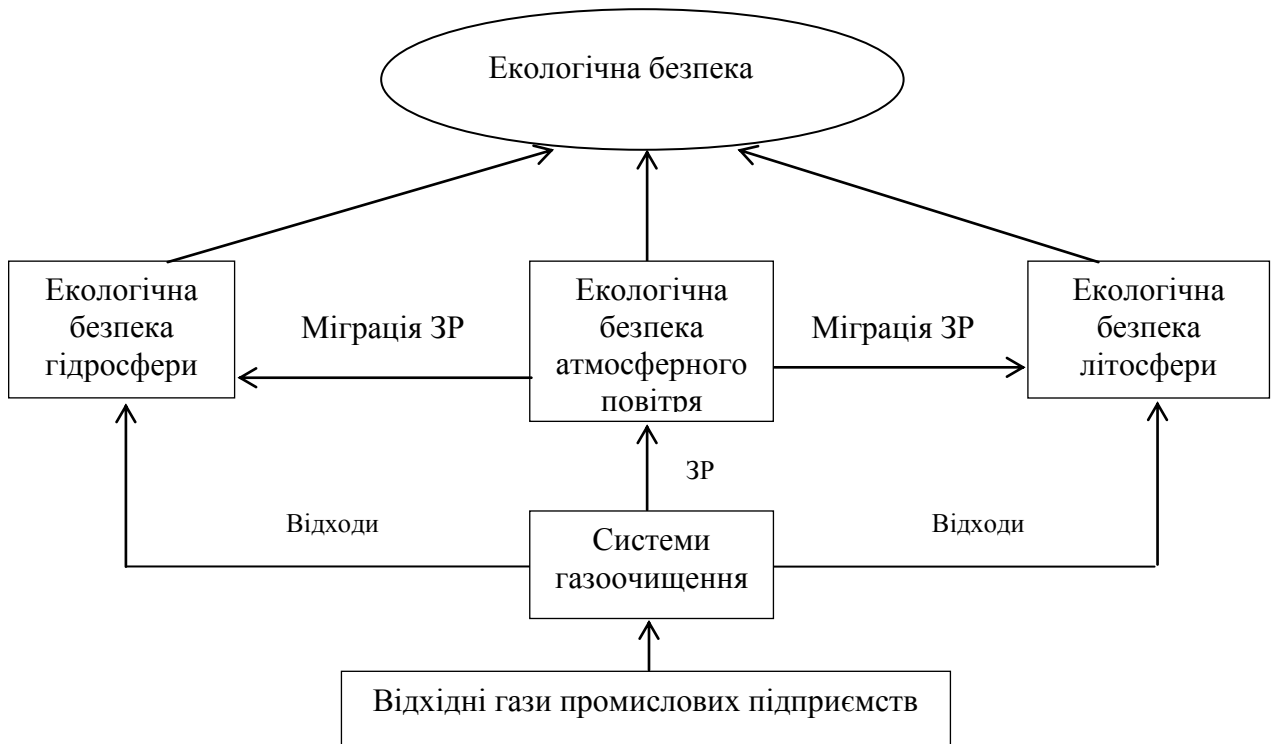


Рисунок 2.5 – Місце газоочисних процесів в системі екологічної безпеки

Таким чином, головні засади екологічної безпеки при забрудненні атмосферного повітря відхідними газами промислових підприємств повинні базуватись на наступних науково-методологічних принципах:

1. принцип комплексності: екологічна безпека атмосферного повітря повинна становити цілісну систему, яка розглядає фактори впливу на якість атмосферного повітря та зв'язок між якістю атмосферного повітря та станом довкілля в цілому та здоров'ям населення зокрема;

2. принцип стійкого розвитку: розробка та впровадження на промислових підприємствах технологічних процесів та технологічного

обладнання, які відповідають світовим стандартам та які мінімізують виділення забруднюючих речовин в ході виробничого процесу;

3. принцип мінімізації: зниження концентрації забруднюючих речовин у відхідних газах промислових підприємств шляхом застосування високоефективного газоочисного обладнання; зниження концентрації забруднюючих речовин у середовищі проживання людини за рахунок впровадження містобудівних заходів.

2.2 Загальна методика проведення досліджень

Для виконання експериментальних досліджень проводилося планування експерименту [184-189]. Експериментальні дослідження проводилися в такій послідовності: було зроблено вибір та обґрунтування факторів, що обумовлюють ефективність роботи газоочисного апарату, проведено серію експериментів, здійснено обробку та аналіз отриманих результатів. Визначення параметрів здійснювалася повіреними приладами. Перед розробкою плану експерименту на основі апріорної інформації були виявлені фактори, які впливають на ефективність роботи апарата. До таких факторів належать: L – щільність зрошення, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; τ – вільний перетин апарату, %; w_2 – швидкість газу в апараті, $\text{м}/\text{с}$; KUP – кількість утримуваної рідини в апараті, $\text{м}^3/\text{м}^2$.

Регресійний аналіз здійснювався на основі експериментальних даних. Обробка експериментальних даних здійснювалася за допомогою наступних програмних продуктів: Mathcad 14.0 [190]; Statistica 6.0 [191]; Advanced Grapher 2.2 [192].

2.2.1 Експериментальні установки для дослідження високоефективних конструкцій газоочисного обладнання

Експериментальні дослідження характеристик апаратів проводилися на укрупнених моделях з метою усунення явища масштабного переходу. Дослідження на укрупнених моделях дають більш надійні результати, які можна безпосередньо використовувати при проектуванні промислових апаратів [193, 194].

2.2.1.1 Експериментальна установка для дослідження апарату з провальними тарілками великих отворів

Експериментальні дослідження гідродинаміки, масообміну та пиловловлення апарату з ПТВО проводилися на лабораторному стенді (рис. 2.6).

Стенд являє собою колону 1 із розмірами: висота 2 м, довжина 0,3 м, ширина 0,25 м зі встановленою провальною тарілкою 2. Відстань від розподільного пристрою для газу до полотна тарілки складала 0,9 м, від полотна тарілки до зрошувального пристрою – 1 м.

Передня і задня стінки колони виконані з органічного скла, що дозволило провести візуальне спостереження, фотографування та відеозйомку.

В експериментальній установці проводились дослідження гідродинамічних характеристик та пиловловлення в режимі протитечії. Подача повітря на установку здійснювалась відцентровим вентилятором 8 (ВВД-9) в нижню частину колони. Регулювання продуктивності по газу проводилося шляхом зміни положення засувки 13, а контроль за цим показником здійснювався за допомогою комплексу приладів для автоматичного регулювання витрати 10, що встановлені на лінії подачі повітря на установку.

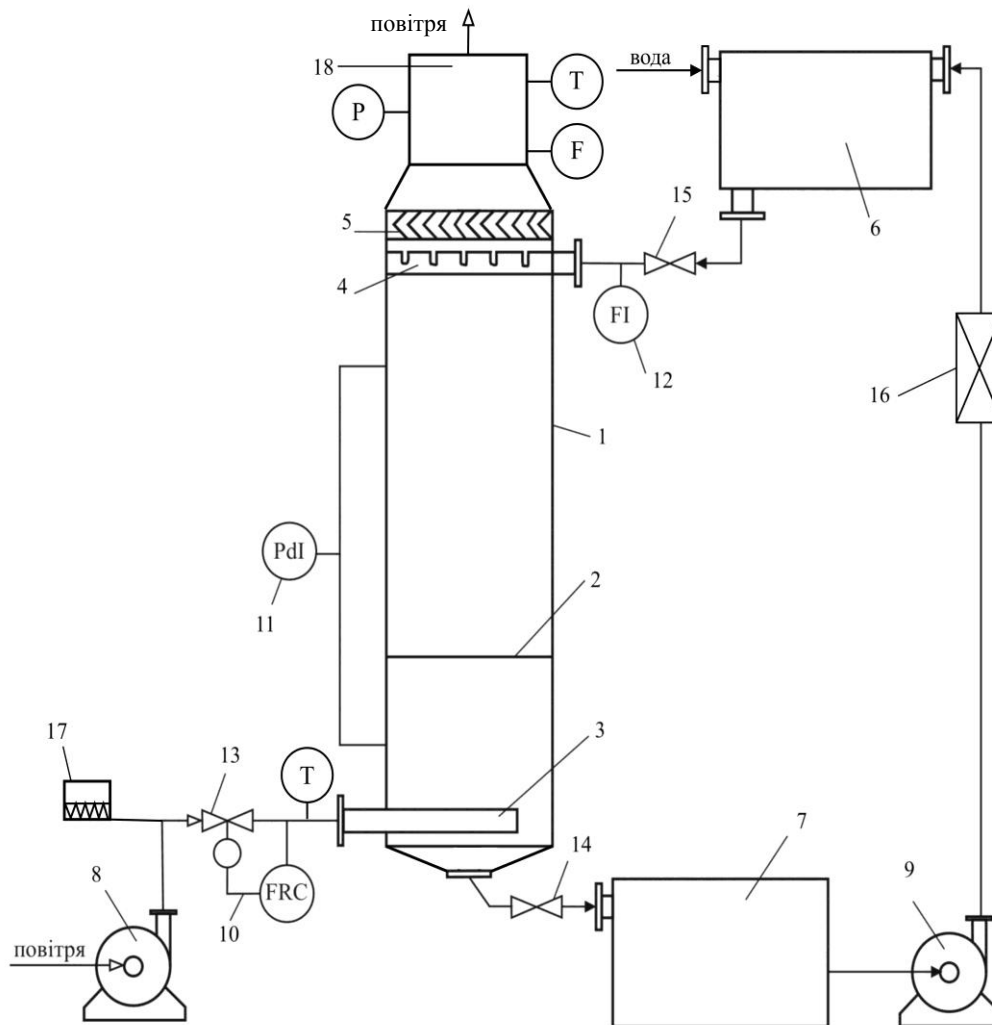


Рисунок 2.6 – Схема експериментальної установки для дослідження апарату з провальними тарілками великих отворів:

1 – колона; 2 – тарілка; 3 – розподільний пристрій для газу; 4 – розподільний пристрій для рідини; 5 – сепаратор; 6 – напірна ємність; 7 – ємність для збору рідини; 8 – вентилятор; 9 – насос; 10 – комплекс приладів для регулювання витрати газу; 11 – диференціальний манометр; 12 – ротаметр; 13 – засувка; 14, 15 – вентиля; 16 – фільтр; 17 – шнековий дозатор; 18 – точки відбору проб

Вода на установку подавалася з водопровідної мережі в напірну ємність 6, далі в верхню частину колони до розподільного пристрою 4. Для вимірювання витрати води використовувався ротаметр 12 (РС-7). Регулювання витрати води проводили за допомогою поступового відкриття

вентиля 15.

Газовий потік, взаємодіючи з рідиною на поверхні тарілки, створює високотурбулізований шар піни, а потім виходить назовні через верх колони. Бризковловлювач 5 дозволяє вловлювати краплі рідини, які транспортуються з газовим потоком під час роботи апарата.

Рідина, що стікала з тарілки, виходила через нижню частину колони і потрапляла в збірну ємність 7, потім насосом 9 подавалася через фільтрувальний пристрій 16 у напірну ємність 6, що дозволило створити циркуляцію рідини замкнутим контуром під час роботи апарата. Для дозування пилу використовували шнековий дозатор 17, який був вмонтований у патрубок подачі газу. Точки відбору проб пилу 18 знаходилися в трубі для відхідного газового потоку.

2.2.1.2 Експериментальна установка для дослідження апарату з регулярно рухомою насадкою

Лабораторний стенд для дослідження апарата з РРН (рис. 2.7) являв собою колону 1, розмірами 250 x 500 x 2000 мм із регулярно рухомою насадкою 2. Передня і задня стінки колони виконані з органічного скла, що дозволило провести візуальне спостереження, фотографування і використовувати стробоскопічні методи виміру.

Експериментальна установка має блок сепарації 7 з похилим днищем, що дозволяє постійно відводити рідину з блоку. Апарат працював в режимі спадної прямотечії. Повітря вентилятором 12 подається у верхню частину апарата 1. Газовий потік, підхоплюючи рідку фазу, потрапляє в шар насадки 2 і, рухаючись прямотечійно з потоком рідини, виходить через нижню частину установки в блок сепарації 7, оснащений відбійником 8. Рідина зі збірного бака насосом 9 подавалася в ємність для створення натиску 10, відкіля надходила в колону 1 через колектор 5.

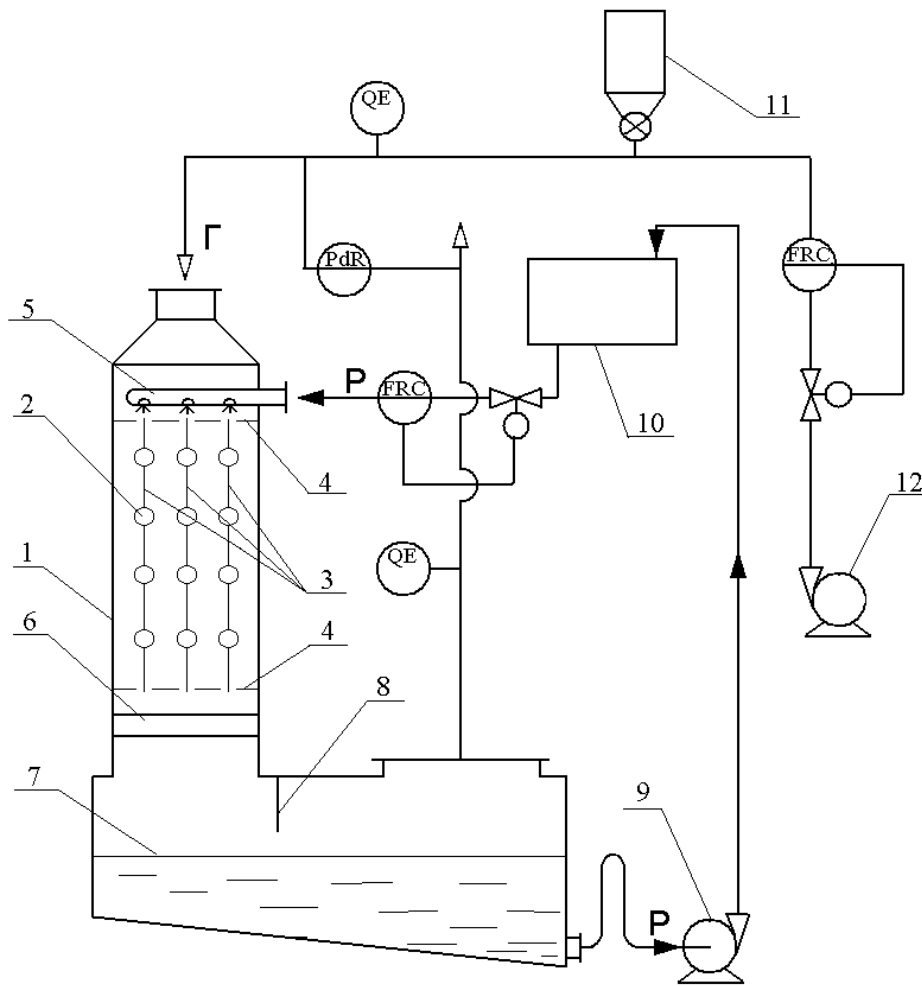


Рисунок 2.7 – Схема експериментальної установки для дослідження апарата з РРН:

1 – колона; 2 – насадка; 3 – струни; 4 – опорно-розподільні ґрати; 5 – колектор; 6 – мірна ємність; 7 – блок сепарації; 8 – відбійник; 9 – насос; 10 – ємність для створення натиску; 11 – живильник; 12 – вентилятор

Для контролю витрати газу і підтримки величини в заданому інтервалі використовувався такий комплект приладів: діафрагма камерна, перетворювач перепаду тиску з вихідним електричним сигналом і вторинний прилад з диференційно-трансформаторною вимірювальною схемою. Витрата рідини регулювалася вентилем і вимірялася ротаметром з електричним вихідним сигналом у комплекті з вторинним приладом з диференційно-

трансформаторною вимірювальною схемою.

Насадка 2 являє собою кулі діаметром 40 мм, жорстко закріплені з кроком t_6 на гнучких струнах 3. Кулі виконані з пористої гуми. Струни 3 прикріплені до верхніх і нижньої опорно-розподільних ґрат 4. Колектор-зрошувач 5 виготовлявся з труби діаметром 50 мм.

2.2.2 Методика дослідження гідродинамічних характеристик апаратів

Дослідження гідродинамічних характеристик апарата включали візуальні спостереження, експерименти з визначення гідравлічного опору і кількості утримуваної рідини, газовмісту газорідинного шару.

Гідравлічний опір колони вимірювали диференціальним манометром 11 (ДСЕН-МІ 0-5 мА), з вихідним електричним сигналом, підключеним до вторинного приладу з диференційно-трансформаторною вимірювальною схемою. Висоту шару піни вимірювали за шкалою, нанесеною на стінці стенду, що виконана з органічного скла.

Кількість утриманої рідини визначали методом відсічення. При цьому одночасно припиняли подачу рідини та газу в колону при перекритті засувки та вентилів. За об'ємом зібраної рідини визначали КУР.

Загальний газовміст в колоні вимірювали методом відсічення через співвідношення висоти газорідинного шару та висоти шару рідини на тарілці за формулою:

$$\varphi = \frac{(H - h)}{H}, \quad (2.5)$$

де φ – газовміст газорідинного шару,

H – висота газорідинного шару, м;

h – висота шару рідини на тарілці, м.

Локальний газовміст досліджували електроконтактним методом [195]. Реєстраційна система складалася з вимірювального зонда 9 і первинного приладу 10 марки ІГС-2, підключеного до цифрового осцилографа і персонального комп'ютера. Зонд складався з трубчастого контактного і голчастого електродів. Фіксуєчий електрод зроблений з покритою лаковою ізоляцією манганінового дроту діаметром 0,2 мм, коаксіально закріпленого в трубчастому електроді лаковим ізолюючим наповнювачем. При цьому неізольований торець фіксуєчого електрода виступав за межі трубчастого на 15 мм. Контактний електрод виконувався з бронзової трубки діаметром 0,8 мм з плавно загнутим на 90° наконечником довжиною 25 мм. Датчик мав можливість переміщення по висоті газорідного шару та площі поперечного перерізу апарата.

Питому поверхню контакту фаз a , $\text{м}^2/\text{м}^3$, визначали як величину хімічно активної поверхні контакту пінного шару [196] згідно методу П. Данквертса, заснованого на проведенні швидкої реакції псевдопершого порядку. В якості досліджуваної прийнята система, в якій газом-індикатором є CO_2 , а абсорбентом – водний розчин CaOH . Концентрація CO_2 в циркулюючому потоці вимірювалася безперервно інтерферометром. Це дозволило проводити вимірювання в широкому діапазоні значень константи швидкості реакції i , тим самим, визначати величину a з великою точністю.

За допомогою фото- та відеозйомки спостерігали поведження і структуру газорідного шару, виявляли режими руху фаз, визначали висоту газорідного шару.

2.2.3 Методика дослідження масообміну в рідкій фазі

Для вивчення масовіддачі в рідкій фазі використовуються системи, де компонентом, який десорбується, є важкорозчинний газ. Дослідження десорбції карбон (IV) оксиду [197] показали, що при попередньому насиченні рідини газом процес проводиться за великої рушійної сили і дозволяє

надійно проводити аналізи щодо визначення концентрації вуглекислоти в пробах рідини. Отже, можна одержати більш точні значення об'ємних коефіцієнтів масовіддачі в рідкій фазі.

Виходячи з цього, експериментальні дослідження масовіддачі в рідкій фазі були проведені на процесі десорбції CO_2 з води повітрям. Для визначення коефіцієнту масообміну в рідкій фазі лабораторна установка була укомплектована балоном, що містить CO_2 , приєднаним до напірної ємності.

Карбон (IV) оксид з балона подавався в нижню частину ємності б і барботував у вигляді дрібних пухирців через шар води. Витрата газу вимірялась і тарувалася за допомогою ротаметра й автоматично підтримувалася в заданому діапазоні. Після завершенні подачі CO_2 у ємність воду відстоювали протягом 25-30 хв для виділення пухирців непоглиненого CO_2 , а потім розчин подавали на зрошення.

Початкову концентрацію CO_2 у воді підтримували в межах 0,8-1,8 г/м³. Проби рідини відбиралися одночасно в чотирьох точках по висоті апарата, а також на вході та виході колони. Для визначення концентрації CO_2 у воді використана методика, заснована на зворотному титруванні 0,1N розчином в присутності індикатора – фенолфталеїну, надлишку $\text{VA}(\text{OH})_2$, що не прореагував, який утворився після добавки його до проби води, що містить CO_2 .

Коефіцієнт масопередачі K_p для досліджуваної системи можна прирівняти до коефіцієнта масовіддачі β_p . Коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі визначаємо за формулою:

$$\beta_p = L2,31g \frac{C_n}{C_k}, \quad (2.6)$$

де C_n – концентрація CO_2 на вході в колону, мг/м³;

C_k – концентрація CO_2 на виході з колони, мг/м³.

Число одиниць переносу визначали за формулою:

$$N_{op} = \frac{C_n - C_k}{\Delta C_{сер}}, \quad (2.7)$$

де $\Delta C_{сер}$ – середня рушійна сила, мг/м³.

2.2.4 Методика дослідження масообміну в газовій фазі

Експериментальні дослідження масовіддачі в газовій фазі проведені на процесі абсорбції амоніаку водою. Повітря розглядалося як інертний газ, що не розчиняється у воді. При цьому приймали, що $K_e \approx \beta_e$.

Експерименти проводили аналогічно методиці дослідження масообміну в рідкій фазі при витратах рідини від 15-20 м³/м²·год, швидкості газу – 2,5-3,5 м/с.

У низ колони подавали повітряно-аміачну суміш, яку одержували при змішуванні амоніаку із балона із повітрям, яке нагніталось газодувкою. Початкова концентрація амоніаку в повітрі становить 1,2 г/м³. Зрошувальну воду подавали наверх колони із водопровідної системи.

Аміачну воду слабкої концентрації, що утворилася в результаті абсорбції, скидали в каналізацію, а очищене повітря виводили в атмосферу. Витрати води та амоніаку регулювали вентилями і заміряли відповідно ротаметрами.

Вміст амоніаку визначали відбором проб із подальшим титруванням за допомогою фенолфталеїну, розчину сірчаної кислоти та розчину гідроксиду натрію.

Витрату і кількість абсорбованого амоніаку визначали матеріальним балансом абсорбції.

2.2.5 Методика дослідження пилоочищення

Дослідження пилоочищення в апараті містило в собі визначення ефективності дифузійного й інерційного пилоосадження.

Дисперсний склад вмісту пилу визначено за допомогою попереднього лабораторного дослідження в лабораторії ПАТ «Сумхімпром» за допомогою приладу X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78 [198]. Принцип виміру базується на різній швидкості седиментації частинок пилу в гліцерині під дією відцентрової сили, з подальшим комп'ютерним аналізом.

Ефективність пилоочищення визначали за формулою:

$$\eta = \frac{C_n - C_k}{C_n} \cdot 100\%, \quad (2.8)$$

де C_n – концентрація пилу на вході в апарат, г/м³,

C_k – концентрація пилу на виході з апарату, г/м³.

При вимірюванні концентрації пилу на виході з апарату, використовували гравіметричний метод у відповідності з «Методикою виконання вимірювань масової концентрації речовини у вигляді суспендованих твердих частинок (пилу) в організованих викидах стаціонарних джерел гравіметричним методом при температурі газопилового потоку до 600 °С (МВВ)» [199].

Результатам визначення концентрації пилу на виході з апарату передували попередні заміри параметрів газопилового потоку:

- швидкості (ГОСТ 17.2.4.06-90), повного та статичного тиску до та після контактної пристрою (ГОСТ 17.2.4.07-90);
- температури газопилового потоку (ГОСТ 17.2.4.07-90) та вологості (ГОСТ 17.2.4.08-90).

Температуру та вологість визначали за допомогою контактної цифрового термометра ТК - 5.06.

Визначення концентрації пилу проводилось методом зовнішньої фільтрації. У якості фільтрувального матеріалу використовували аерозольні фільтри АФА-ВП.

Похибку вимірів та результатів розрахунку отриманих експериментальних даних визначали у відповідності до загальноприйнятих методик та рекомендацій [200 - 202] щодо проведення інженерного експерименту та обробки отриманих даних.

Для визначення оптимальної кількості дослідів та досягнення найвищого ступеня точності й достовірності отриманих результатів, а також обробки цих результатів використано методи математичної статистики [200, 201]. Точність отриманих рівнянь регресії обчислювали за методом найменших квадратів [202].

Висновки до розділу 2

Системний підхід до розгляду факторів впливу на рівень екологічної безпеки довкілля дозволив виявити внесок забруднення атмосферного повітря в стан екологічної безпеки всіх компонентів довкілля.

Для оцінки техногенного навантаження на довкілля при забрудненні атмосферного повітря введено поняття порогу техногенного навантаження, яке спирається на поняття стійкості екосистеми, та розроблена послідовність етапів загального аналізу екосистем.

Проведене ранжування території системи промислове підприємство – населений пункт за інтенсивністю впливу дозволило описати процеси трансформації забруднюючих речовин в житловому середовищі населених пунктів.

Встановлено, що управління якістю атмосферного повітря в системі населений пункт – промислове підприємство включає в себе природоохоронні заходи на промисловому підприємстві: удосконалення технологічних процесів, модернізацію технологічного обладнання з метою

попередження потрапляння шкідливих речовин у відхідні гази; удосконалення систем очищення відхідних газів шляхом застосування високоефективного газоочисного обладнання з метою досягнення нормативних показників концентрації забруднюючих речовин на викиді з труби.

Встановлено місце газоочисних процесів в системі екологічної безпеки довкілля та атмосферного повітря зокрема.

Сформульовані науково-методологічні принципи екологічної безпеки атмосферного повітря при впливі відхідних газів промислових підприємств: принцип комплексності; принцип стійкого розвитку; принцип мінімізації.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [106, 173, 176, 181-183].

РОЗДІЛ 3

ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ГАЗОПИЛОВИХ ВИКИДІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ НА СТАН ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСТ

Переважна частина промислових підприємств (понад 80 %) України розташована в містах та селищах міського типу, де на обмеженій території сконцентровані підприємства різного масштабу та класів небезпеки, часто вкраплені в житлові масиви. Тому екологічний фактор стає визначальним при проектуванні міст. Він обумовлює вибір напрямів розвитку міст, прогноз екологічної та мікрокліматичної ситуації з урахуванням природних і антропогенних факторів.

Надходження забруднюючих речовин у навколишнє середовище в певній мірі є основним мотивом для роздільного проектування об'єктів міського будівництва і промислових підприємств. Однак сьогодні промислова та житлова забудова існують поруч, активно впливаючи одна на одну, особливо в історично сформованих промислових регіонах країни.

Це яскраво демонструють приклади забудови міста Суми (Додаток А), де промислові підприємства знаходяться в безпосередній близькості від житлової забудови, учбових, лікувальних закладів, що обумовлює комплексний негативний вплив на здоров'я населення міста та стан екологічної безпеки. Середні річні концентрації в атмосферному повітрі міста перевищували санітарні норми по пилу та нітроген (IV) оксиду у 1,4 рази, формальдегіду – у 1,1рази. Відмічалось перевищення максимально разових ГДК з вмісту пилу та нітроген (IV) оксиду [203]. Така ситуація обумовлена тим, що нема чіткого плану розвитку міста та забудови житлових районів.

В атмосферне повітря населених пунктів надходять викиди від

промислових підприємств, об'єктів енергетики, транспорту і т.д. Трансформація та міграція забруднюючих речовин у навколишньому природному середовищі відбувається за ланцюжком: атмосферне повітря – ґрунт – водний об'єкт – рослинність. У кінцевому підсумку, всі вони більшою чи меншою мірою, залежно від характеру виробничої діяльності та умов комфортності проживання в житловому середовищі, потрапляють в організм людини.

При розгляді питань екологічної безпеки промислових міст вводиться поняття урбосфери [204]. Урбосфера – це приземна частина атмосфери, всередині якої відчутно вплив міста на кліматичні та санітарно-гігієнічні умови навколишнього середовища. Компонентами впливу на урбосферу можуть бути: теплові випромінювання земної поверхні разом з випромінювачами від теплових та енергетичних установок, що утворюють тепловий ковпак над містом; гази, аерозолі та інші речовини – відходи технологічних виробництв, що утворюють туман і смоги над містом; вітровий режим, який змінюється в залежності від ландшафтних умов місцевості, характеру і поверховості забудови, планувальної структури міста. Розміри простору відчутного впливу перерахованих факторів на навколишнє середовище міста – урбосферу – залежатимуть від рельєфу і параметрів забудови міста, характеру і інтенсивності промислового виробництва. Межі урбосфери сягають по висоті до 5 км над поверхнею, територіально – в межах міста, включаючи природні лісопаркові зони.

Сформульовані в розділі 2 науково-методологічні принципи екологічної безпеки, зокрема принцип мінімізації, вимагає зменшення впливу промислового підприємства на навколишнє середовище шляхом скорочення маси, концентрації, температури відходів виробництва, а також за рахунок скорочення площі контакту технологічних об'єктів з навколишнім середовищем до повної ізоляції виробничих процесів від активних компонентів середовища. Це визначає стратегію й тактику розробки сучасних технологічних процесів та природоохоронних технологій

[205]. Але сучасні технології виробництва та захисту довкілля не дозволяють повністю виключити негативний вплив промислових виробництв, зокрема на атмосферне повітря. Людина живе в середовищі підстильної зони поверхні землі, на яку діють джерела природного та антропогенного забруднення атмосфери, що призводить до комплексного впливу забруднювачів та збільшує концентрації ЗР до небезпечних рівнів.

Все вищенаведене ставить завдання прогнозування розповсюдження шкідливих викидів в атмосферному повітрі з метою оцінки впливу промислових підприємств та підвищення рівня екологічної безпеки промислових міст та довкілля в цілому.

3.1 Моделювання розсіювання шкідливих речовин з урахуванням міської забудови

Вивчення стану повітряного середовища міст, особливо великих, з високим екологічним навантаженням від впливу промислових підприємств, свідчить про складні процеси трансформації ЗР у житловому середовищі [206, 207], що вимагає розробки прогнозних моделей для визначення концентрації забруднюючих речовин.

Практично всі проведені дослідження переносу забруднень в міському середовищі стосуються питань обтікання будівель і споруд по висоті, включаючи дах [208]. При цьому не враховується осадження важких компонентів на поверхні землі під час штилю та помірною вітру. На прикладі Сумського ПАТ «Сумхімпром», зареєстровано багато скарг населення на забруднення саме приземного шару повітря при інверсії, зокрема сульфур (IV) оксидом та туманом сульфатної кислоти.

При розгляді питання розсіювання ЗР в умовах міста необхідні знання дифузійного та турбулентного перенесення маси та тепла, взаємодії повітряного потоку з елементами забудови міста. Існуючі моделі розсіювання забруднюючих речовин в умовах міста не враховують вплив рельєфу та

параметрів забудови поблизу будівель, приводяться у вигляді напівемпіричних залежностей, справедливих лише для конкретного випадку, або у вигляді обробки даних вимірів. Таким чином, у випадку прогнозування розсіювання шкідливих речовин в умовах міста не можна використовувати спрощені методи, які базуються тільки на висоті будівлі, а потрібно враховувати вплив забудови.

Пил та забруднюючі речовини потрапляють у приземні шари атмосфери, підхоплюються циркуляцією повітря з підвітряного боку будівлі, тому значно впливають на атмосферне повітря міст. Амплітуда підвітряної циркуляції залежить від габаритів будівлі, а також від швидкості вітру. Необхідно також враховувати щільність забудови міста. У щільній міській забудові утворення кільцевих вихрів навколо будинків практично неможливе, повітряний потік фактично перетікає через дахи будинків. Тому при оцінці розповсюдження забруднюючих речовин значна увага повинна приділятися коефіцієнту провітрюваності, який характеризує аерацію житлових масивів:

$$A = \frac{P_3}{P_6} k, \quad (3.1)$$

де P_6 – нормативний швидкісний напір вітру на відкритій місцевості, який визначається за метеоданими, Па;

P_3 – напір вітру в житловій забудові, Па;

$$k = \frac{P_{бар}}{P_{нів}},$$

$P_{бар}$ – середній барометричний тиск, Па;

$P_{нів}$ – тиск нівелірної висоти, Па.

Чим більший A , тим краще провітрювання житлового масиву. Найкраща забудова з $A \rightarrow 1$. При $A \rightarrow 0$ відсутня циркуляція повітря, що

призводить до тривалого застою ЗР у житловій забудові.

На рис. 3.1 наведена модель трансформації забруднюючих речовин з урахуванням забудови житлового мікрорайону на місцевості з незначними змінами рельєфу та практично однаковою висотністю.

При моделюванні перенесення забруднюючих речовин виходимо з таких положень. Міська вулиця являє собою відкритий зверху канал висотою H та довжиною L . Повітря в ньому рухається під дією ініціюючого потоку, але при цьому на потік діє опір при течії вздовж нерівних поверхонь стін будівель. Приймаємо потік забруднюючої речовини рівномірно розподіленим і враховуємо його як стаціонарне джерело.

Для визначення зміни концентрації забруднюючих речовин по висоті будинків H розглянемо двовимірну модель, допускаючи, що перенесення речовини відбувається по висоті будинків H і довжині вулиці L при постійних параметрах забудови.

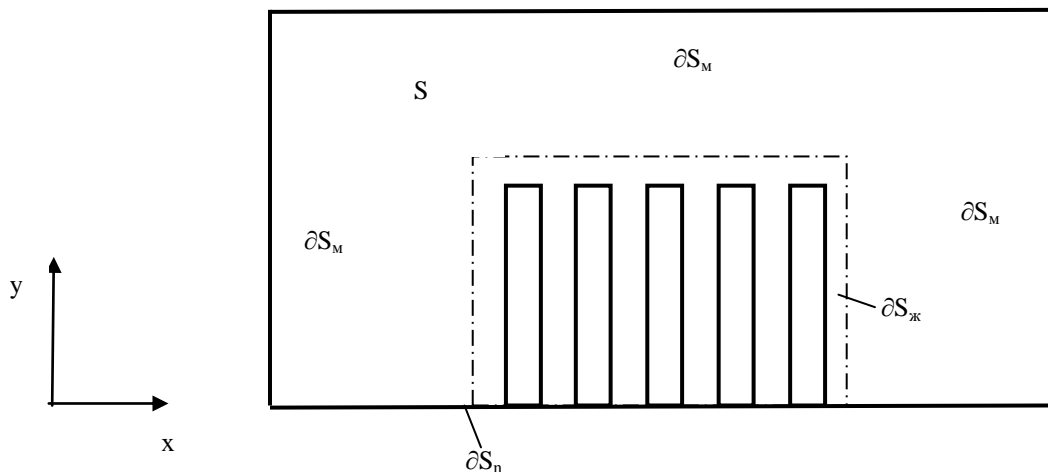


Рисунок 3.1 – Модель трансформації ЗР по висоті мікрорайону:

S – область розповсюдження ЗР; $S_{ж}$ – область житлового району;
 S_n – приземний шар; S_m – зона міської сфери

Запишемо систему диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, нерозривності та молекулярної дифузії для вертикального і горизонтального напрямків перенесення забруднюючої речовини в межах розрахункової площі $S=HL$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \sigma_x, \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial y} v \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \sigma_y, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial x} u + \frac{\partial C}{\partial y} v = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right), \end{array} \right. \quad (3.2)$$

де u, v – компоненти вектора швидкості повітряного потоку, м/с;

x, y – координати (x – по довжині вулиці; y – по висоті забудови);

σ – опір житлового масиву руху повітря, Па.

Початкові умови:

$$W(0, x, y) = W_s(x, y), \quad C(0, x, y) = C_s(x, y), \quad p(0, x, y) = p_s(x, y), \quad (3.3)$$

де W – вектор швидкості повітряного потоку з компонентами u, v .

Граничні умови:

$$W(t, x, y) = W_{cs}(t, x, y), \quad C(t, x, y) = C_{cs}(t, x, y). \quad (3.4)$$

При вирішенні задачі у відповідності з рисунком 3.4 необхідно врахувати наступне:

1) На межі $\partial S_{\text{ж}}$ вертикальна швидкість v на висоті H дорівнює нулю, горизонтальна швидкість вітрового потоку стабілізується, тобто, при

$$y = H, v = 0, \frac{\partial u}{\partial y} = 0;$$

2) На межі $\partial S_{\text{м}}$, на деякій віддалі від житлової забудови повітряний потік стабілізується, тобто $v = 0, \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial C}{\partial x} = 0;$

3) У приземному шарі $\partial S_{\text{н}}$ на поверхні землі $y = 0, u = 0, \frac{\partial C}{\partial y} = 0.$

При рівномірному розподілі забруднення приймаємо $\frac{\partial C}{\partial x} = 0.$

Опір житлового масиву руху повітря визначається за рівнянням:

$$\sigma = -\xi \rho S W^2 \cdot A, \quad (3.5)$$

де ξ – коефіцієнт аеродинамічного опору житлового масиву, що залежить від форми будинків і режиму обтікання.

Для найбільш поширеної призматичної форми будинків з навітряної сторони $\xi = 0,3 - 0,8$, з підвітряної сторони $\xi = (-0,3) - (-0,5)$ [209].

Поперечна площа визначається з урахуванням щільності забудови

$$S = S_{\sigma} (1 - \varepsilon), \quad (3.6)$$

де ε – щільність забудови, частка.

На межі $\partial S_{\text{ж}}$ та $\partial S_{\text{м}}$ сила опору σ зменшується, що витікає з рівнянь (3.5) та (3.6), оскільки в цій зоні ξ прямує до нуля.

Розв'язок системи (3.2) з урахуванням наведених початкових (3.3) та граничних (3.4) умов, а також з урахуванням запропонованих спрощень із

застосуванням методу розщеплення із використанням сіток з кількістю вузлів 25×121 [210-212] дозволив отримати залежність концентрації ЗР від коефіцієнта провітрюваності та залежність розповсюдження забруднюючих речовин за висотою H від швидкості вітру W (рис.3.2, 3.3).

Отримані дані свідчать, що зниження коефіцієнта провітрюваності призводить до того, що в підстильній зоні концентрація забруднюючих речовин залишається високою навіть при великих швидкостях вітру (крива 3 рис. 3.2). Це свідчить про актуальність раціонального планування та забудови населених пунктів.

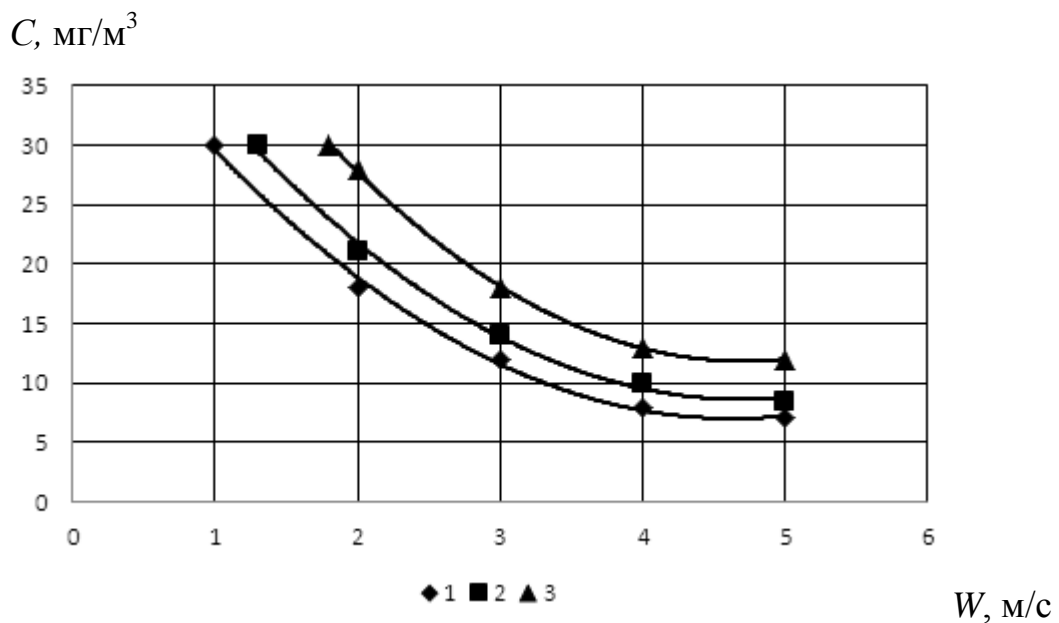


Рисунок 3.2 – Зниження концентрації забруднюючих речовин за рахунок провітрюваності території міста: 1 – $A=0,9$; 2 – $A=0,5$; 3 – $A=0,1$

Як видно з рис.3.3, компоненти повітряної суміші з густиною більше ніж $1,2 \text{ кг/м}^3$ до швидкості вітру 4 - 5 м/с знаходяться у приземній зоні висотою 2 - 2,5 м. При вищих швидкостях значний вплив чинять вихрові потоки, які мають вертикальний зсув та сприяють винесенню забруднюючих речовин у більш високі шари атмосферного повітря.

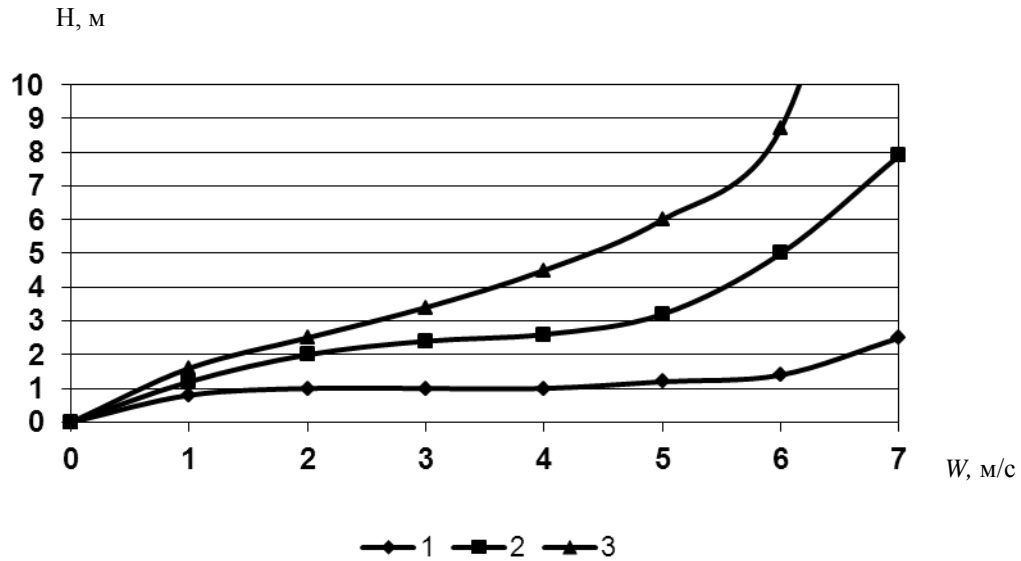


Рисунок 3.3 – Залежність розповсюдження забруднюючих речовин від швидкості вітру по висоті будови при різних густинах компонентів: 1 – $\rho = 2 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$; 3 – $\rho = 0,8 \text{ кг/м}^3$

Таким чином, найбільш великотоннажні забруднювачі атмосферного повітря, які чинять вплив на довкілля на всіх рівнях, до глобального, наприклад, оксиди карбону, нітрогену, сульфуру, пил, знаходяться у просторі переважного проживання людини, що завдає шкоди здоров'ю населення та висуває завдання розробки заходів щодо зменшення викидів забруднюючих речовин [213, 214].

3.2 Математична модель розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосферному повітрі

Як свідчать дослідження, пилове дослідження атмосферного повітря становить особливу небезпеку для довкілля та здоров'я людини. Тверді частинки в залежності від дисперсності, хімічного складу, розчинності, можуть чинити алергічну, подразнюючу, фіброгенну дію, призводити до отруєння організму. Крім того, тверді частинки, адсорбуючи на своїй поверхні бактерії, грибки, спори, можуть бути причиною бактеріологічного

зараження. Частинки дрібнодисперсного пилу з повітряними потоками переносяться на великі відстані від джерела викиду, діючи на людину в зоні прямого та опосередкованого впливу. Дрібнодисперсний пил має найбільшу фіброгенну активність, частинки його найглибше проникають і затримуються в альвеолах легенів, що викликає ряд специфічних захворювань, що обумовлює необхідність заходів із зменшення надходження забруднюючої речовини в повітря населених пунктів та прогнозування розповсюдження пилових частинок в атмосферному повітрі.

Пилові домішки, які викидаються в атмосферне повітря з відхідними газами промислових підприємств, як правило, мають полідисперсний склад. При очищенні відхідних газів від твердих частинок, найвища ефективність очищення досягається для крупнодисперсного пилу. Тому концентрація крупнодисперсного пилу у відхідних газах невелика. Крім того, крупні частинки пилу під дією сил інерції починають знижуватися і осідають на поверхні землі на території імпаکتної зони.

Розповсюдження твердих частинок в атмосферному повітрі відбувається під дією вітрових потоків, які мають крупно- та дрібномасштабні флуктуації. Середні флуктуаційні рухи частинок можна інтерпретувати як дифузю на фоні основного руху. При викиді забруднюючих речовин з димової труби, спостерігається захоплення димового факела потоком повітря і поступове розширення цього факела при віддаленні від джерела внаслідок впливу дрібномасштабної турбулентності. В результаті факел має форму витягнутого конусу, що розширюється в напрямку руху повітряних мас. Збільшуючись під впливом крупномасштабних турбулентних флуктуацій, факел розпадається на ізольовані вихрові утворення, які захоплюються повітряними масами і переносяться на велику відстань від джерела викиду.

Для розробки математичної моделі процесу розповсюдження дрібнодисперсного пилу використаємо на диференціальне рівняння дифузійного перенесення [83]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + \sigma^* C = \frac{\partial}{\partial z} \gamma \frac{\partial C}{\partial z} + \mu^* \nabla^2 C + k, \quad (3.7)$$

де u, v, w – компоненти швидкості вітру за віссю декартової системи координат, м/с;

μ^* – коефіцієнт горизонтальної дифузії в площині (x, y) , м²/с;

γ – коефіцієнт вертикальної дифузії в z - напрямку, м²/с;

$$\nabla^2 C = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2};$$

k – параметр джерела, що залежить від координат і часу, $k = f(x, y, z, t)$;

σ^* – величина, що пов'язана з трансформацією субстанції, с⁻¹.

Для дрібнодисперсного пилу нехтуємо силою тяжіння та розглядаємо одномірну задачу [93], і у спрощеному вигляді рівняння 3.7 в умовах штилю, з урахуванням перенесення в нескінченному середовищі $-\infty < x < \infty$ набуває вигляду:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \sigma^* C = \mu^* \frac{d^2 C}{dx^2} + Q \delta(x - x_0), \quad (3.8)$$

де Q – потужність джерела, що викидає в атмосферу пил, кг/с;

$\delta(x - x_0)$ – дельта-функція Дирака, що враховує інтегральний вміст частинок пилу, які дифундують в об'ємі повітря за висотою, а також кількість частинок, що осідають на поверхні землі, 1/м³:

$$\delta = \sigma^* + \alpha \gamma / H, \quad (3.9)$$

де α – функція, що характеризує взаємодію домішок з підстилаючою поверхнею;

H – висота джерела викиду, м.

Рівняння (3.8) можна використовувати, коли швидкість повітряних мас дорівнює нулю. При наявності вітру, а також з урахуванням постійної величини викиду (стаціонарний процес), воно набуває вигляду:

$$u \frac{dC}{dx} + \sigma^* C = \mu^* \frac{d^2C}{dx^2} + Q\delta(x - x_0). \quad (3.10)$$

Розв'язок рівняння проводимо при наступних граничних умовах: межею розсіювання пилу від стаціонарного джерела є розміри СЗЗ підприємства; джерело знаходиться в центрі координат; потужність викиду джерела є постійною величиною.

При чисельному розв'язуванні рівняння (3.10) можна скористатися явними або неявними кінцево-різницевиими схемами. Як явні, так і неявні схеми мають свої переваги та недоліки. В неявних схемах для апроксимації просторових похідних використовують значення на $n+1$ кроці по часу, і тому для продовження розрахунків на цьому кроці потрібно одночасно розв'язувати систему алгебраїчних рівнянь, що не завжди є легкою справою. Іншим досить суттєвим недоліком застосування неявних схем для розв'язування рівнянь переносу є їхня здатність часто призводити до нескінченної швидкості поширення збурень, тоді як у випадку застосування відповідних простих явних різницевих аналогів збурення поширюються на відстань, пропорційну просторовому крокові. Чисельний розв'язок задачі (3.10) було виконано за допомогою методу скінченнорізницевих рівнянь.

Для цього виконали дискретизацію простору, розбивши відстань від джерела до границі СЗЗ підприємства на розрахункові інтервали:

$$h = \frac{(b-a)}{n}, \quad (3.11)$$

точки розбиття $x_i = x_0 + ih, i = 0, 1, \dots, n; x_0 = a; x_n = b$.

Значення функції $C = C(x)$ та її похідних $C' = C'(x)$, $C'' = C''(x)$ позначимо відповідно через $C_i = C_i(x_i)$, $C_i' = C_i'(x_i)$, $C_i'' = C_i''(x_i)$.

Вводимо позначення:

$$\mu_i^* = \mu(x_i), u_i = u_i(x_i), \sigma_i^* = \sigma_i(x_i). \quad (3.12)$$

Замінімо похідні на односторонні скінченнорізницеві співвідношення

$$C_i' \approx \frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{2h}, \quad (3.13)$$

$$C_i'' \approx \frac{C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}}{h^2}. \quad (3.14)$$

Формули (3.13) та (3.14) приблизно виражають значення похідних у внутрішніх межах інтервалу $[a, b]$.

Для граничних значень припустимо:

$$C_0' \approx \frac{C_1 - C_0}{h}, \quad C_n' \approx \frac{C_{n-1} - C_n}{h}. \quad (3.15)$$

Використовуючи формули (3.13) та (3.14), диференційне рівняння (3.10) при $x = x_i$, ($i = 1, 2, \dots, n-1$) наближено можна замінити лінійним рівнянням:

$$\mu_i \frac{C_{i+2} - 2C_{i+1} + C_i}{h^2} + u_i \frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{2h} + \sigma_i C_i = Q\delta(x - x_0). \quad (3.16)$$

Перетворюючи рівняння (3.16) відносно C_{i-1} , φ_i та C_{i+1} , отримуємо формулу для розрахунку концентрації дрібнодисперсного пилу:

$$\left(\frac{\mu_i}{h^2} - \frac{u_i}{2h}\right)C_{i-1} + \left(\frac{-2\mu_i}{h^2} + \sigma_i\right)C_i + \left(\frac{\mu_i}{h^2} + \frac{u_i}{2h}\right)C_{i+1} = Q\delta(x - x_0). \quad (3.17)$$

Алгоритм розрахунку концентрації дрібнодисперсного пилу на відстані від джерела забруднення реалізовано на алгоритмічній мові C++ (додатак Б).

Отримане в результаті перетворень рівняння (3.17) дозволяє розраховувати концентрацію дрібнодисперсного пилу на заданій відстані від джерела розсіювання при певній швидкості вітру та заданій потужності джерела та отриманням результату у вигляді відсоткових значень від концентрації на виході з джерела викиду.

Графічну модель розв'язку рівняння (3.17) було побудовано в програмному продукті Maplesoft 12.0. Для коригування значень концентрації пилу в межах СЗЗ вводимо безрозмірний коефіцієнт $C_k = 1 \cdot 10^{-3}$.

Вихідні дані: потужність джерела викиду $10,4 \cdot 10^{-3}$ кг/с; швидкість вітру 4,5 м/с, відстань від джерела 1000 м, коефіцієнт горизонтальної дифузії приймаємо відповідно [82] як для аерозолу – 1,5 м²/с. Для розрахунку розсіювання пилу в атмосфері на основі експериментальних досліджень запиленості повітря було прийнято такі значення σ : для дуже дрібнодисперсного пилу 0,06 с⁻¹, для дрібнодисперсного 0,1 с⁻¹ [89, 93].

Результати моделювання, приведені на рис. 3.4., вказують на те, що профіль зміни концентрацій пилу від джерела викиду рівномірний.

Розрахунки та модель (рис. 3.4) у сукупності характеризують круговий напрямок вітру, а модель може враховувати лише один його напрямок. Найбільша кількість домішок випадає на деякій відстані від джерела викиду за рахунок перенесення. Це пояснюється високою інерційністю дрібнодисперсного пилу, частинки якого підхоплюються та переносяться з потоком вітру.

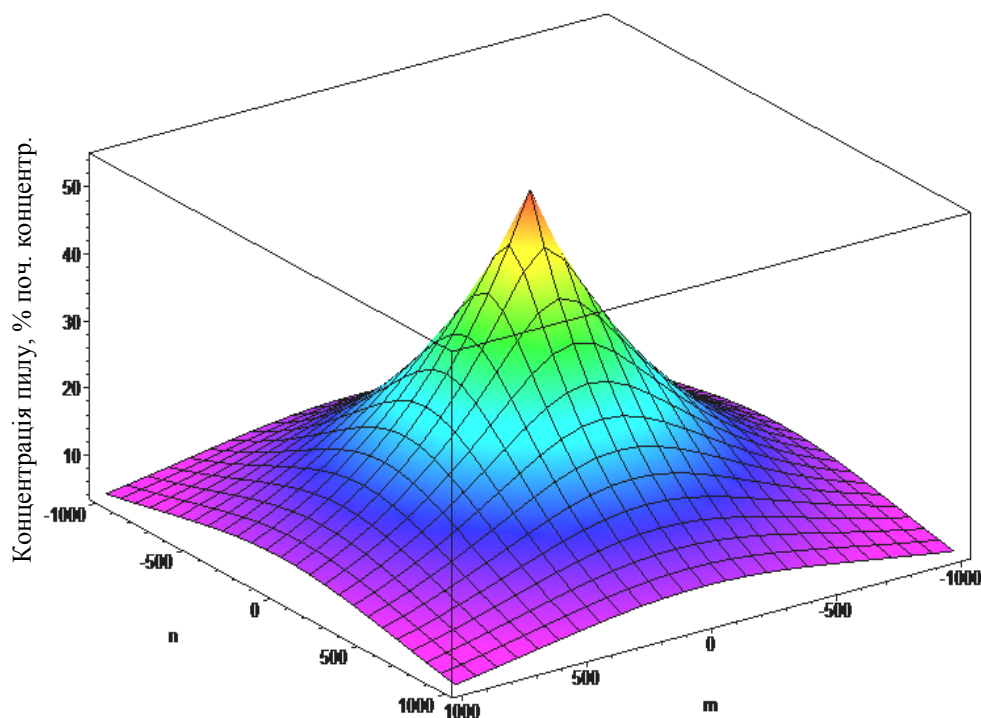


Рисунок 3.4 – Модель розподілу концентрацій дрібнодисперсного пилу від джерела викиду: n , m – вісі координатної сітки, м

Таким чином, проведене моделювання дозволяє визначити зону техногенного навантаження при пиловому забрудненні атмосферного повітря та свідчить про необхідність розробки природоохоронних заходів по мінімізації викидів аерозольних частинок.

З метою перевірки адекватності математичної моделі виконані заміри запиленості повітря в межах санітарно-захисної зони ПАТ «Сумихіпром», результати яких наведено в табл. 3.1 [215]. Всі виміри концентрації пилу припадали на період роботи лише виробництва титан (IV) оксиду на підприємстві.

В результаті обробки експериментальних даних встановлено, що викиди підприємства наближаються до значень ГДК і суттєво впливають на атмосферне повітря в прилеглих районах міста. Особливо цей вплив може бути відчутний при залпових викидах та низькій ефективності пилоочисного обладнання. Так, навіть на території за межею СЗЗ

підприємства на листі дерев протягом вегетаційного періоду постійно спостерігається наявність шару характерного для даного підприємства пилу.

Для перевірки дисперсного складу та елементного вмісту пилу за допомогою електроаспіратора було відібрано проби пилу на межі СЗЗ підприємства, враховуючи переважний напрямок вітру.

Проведені дослідження пилу показали, що він є дрібнодисперсним. Загальний вигляд пилу наведено на рис. 3.5.

Таблиця 3.1 – Стан запиленості повітряного середовища на територіях, прилеглих до ПАТ «Сумхімпром»

Місце відбору проб	Концентрація, мг/м ³			ГДК _{сд} , мг/м ³
	макс.	мінім.	середня	
400 м від джерела	2,8	2,4	2,6	0,15
500 м від джерела	2,1	1,7	1,9	0,15
600 м від джерела	1,7	1,5	1,6	0,15
800 м від джерела	1,6	1,2	1,4	0,15
1000 м (межа СЗЗ)	1,3	0,9	1,1	0,15
500 м від межі СЗЗ	1,1	0,7	0,9	0,15

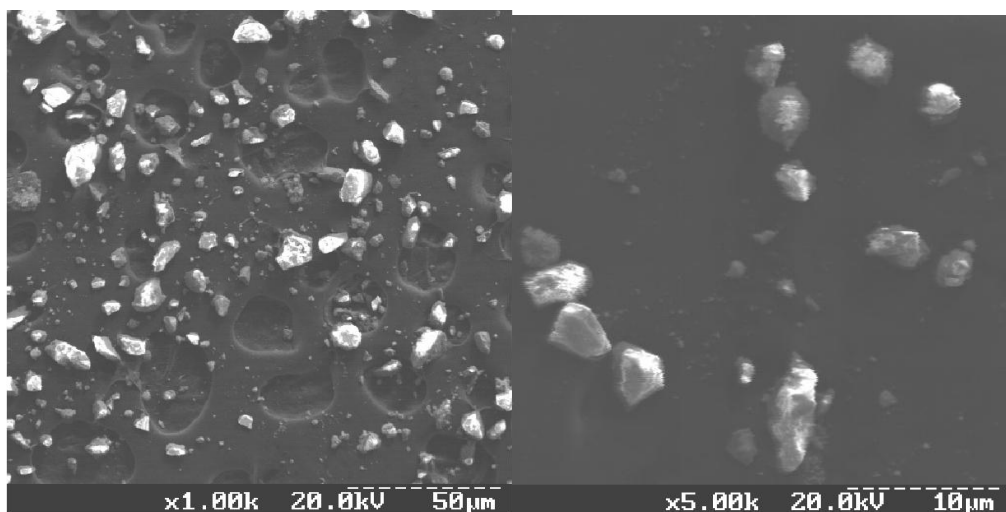


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд пилу

Результати растрової електронної мікроскопії з рентгенівським мікроаналізом відібраних проб пилу, реалізовані на приладі РЕММА-102 (SELMI), з використанням енергодисперсійного спектрометра EDX (ЕДАР). Вони вказують, що вміст елементного титану у відібраному зразку пилу становить близько 15% (мас.) (рис.3.6).

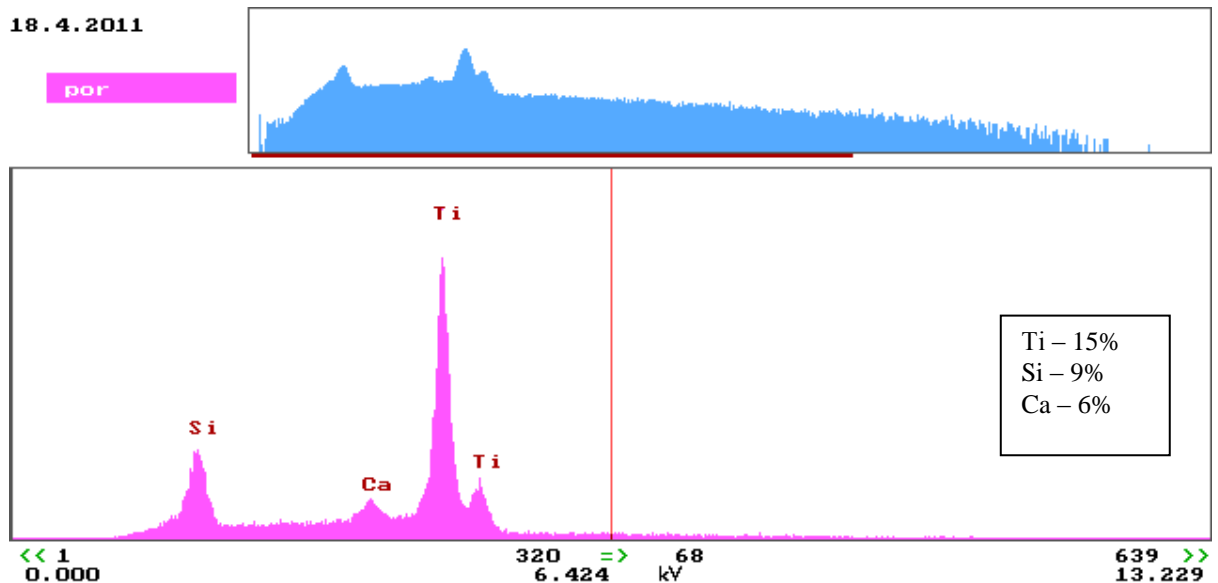


Рисунок 3.6 – Результати рентгенівського мікроаналізу пилу

За результатами перевірки адекватності математичної моделі розсіювання дрібнодисперсного пилу та експериментальних даних (рис. 3.7) встановлено, що відхилення розрахункових значень математичної моделі від результатів експерименту не перевищує 15% у всьому дослідженому діапазоні відстаней.

Отже, математична модель розсіювання з достатньою точністю описує процес розповсюдження пилу в атмосферному повітрі [216].

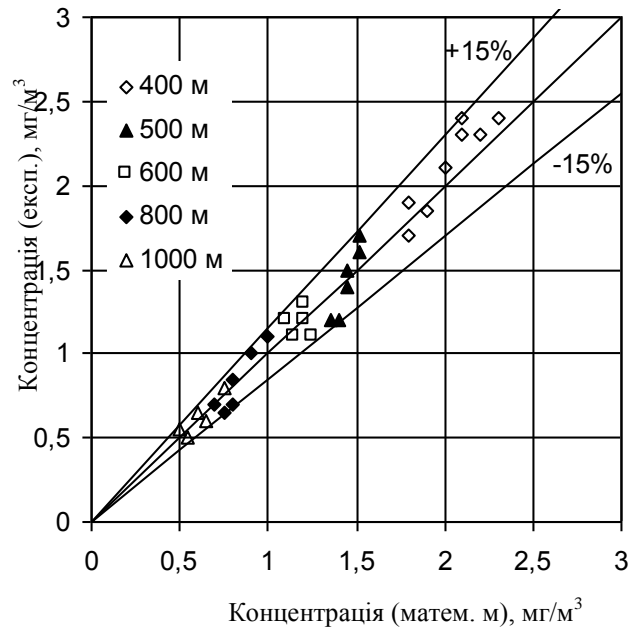


Рисунок 3.7 – Зіставлення результатів розрахунку за залежністю (3.17) та експериментальними даними пилу по визначенню концентрації пилу титан (IV) оксиду

Висновки до розділу 3

Математична модель розсіювання ЗР в умовах міста враховує дифузійний та турбулентний механізми перенесення забруднюючих речовин, взаємодію повітряного потоку з елементами забудови міста. Отримана залежність розповсюдження забруднюючих речовин по висоті житлової забудови в залежності від швидкості вітру з урахуванням коефіцієнта провітрюваності показала, що викиди забруднюючих речовин та пилу з густиною більше ніж $1,2 \text{ кг/м}^3$ до швидкості вітру 4 - 5 м/с розповсюджуються в просторі переважного проживання людини, тому це висуває завдання розробки заходів щодо захисту атмосферного повітря.

Введене поняття коефіцієнта провітрюваності, який враховує зміну напору вітру по висоті будинків та залежить від щільності забудови. Моделювання процесу розсіювання забруднюючих речовин в умовах міста

показало, що зниження коефіцієнта провітрюваності призводить до високих концентрацій забруднюючих речовин в середовищі проживання людини навіть при великих швидкостях вітру, що свідчить про актуальність раціонального планування та забудови населених пунктів.

На основі рівняння конвективної дифузії з метою прогнозування впливу забруднюючих речовин на атмосферне повітря населених пунктів розроблено математичну модель розсіювання дрібнодисперсного пилу, яка дає можливість розрахувати концентрації пилу на заданій відстані від джерела при врахуванні швидкості вітру та потужності джерела викидів.

Перевірка адекватності математичної моделі проводили на прикладі ПАТ «Сумхімпром» при замірах концентрації пилу титан (IV) оксиду. Аналіз свідчить, що відхилення результатів розрахунку за математичною моделлю та експериментальних даних не перевищує $\pm 15\%$.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [106, 205, 213 - 216].

РОЗДІЛ 4

ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ГАЗООЧИЩЕННЯ

Ефективність систем газоочищення промислових підприємств не завжди відповідає вимогам екологічної безпеки. Це пов'язано з тим, що при розробці та удосконаленні пилогазоочисного обладнання переважали технічні рішення, а не науково-системний підхід, який повинен охоплювати весь життєвий цикл обладнання. Аналіз апаратурного оформлення технологічних схем очищення відхідних газів показує, що при їх компонуванні були відсутні науково-обґрунтовані критерії вибору. Так, для уловлювання одних і тих же забруднюючих речовин використовуються різні конструкції масообмінних і пилоуловлювальних пристроїв, що призводить до таких наслідків:

1. Складність сучасних технічних, у тому числі апаратурних і машинних систем, що складаються найчастіше із значного числа підсистем елементів, визначає численні та різноманітні взаємозв'язки, призводить до зростання кількості завдань, які вирішуються в ході створення та модернізації техніки. Складний та різноманітний процес, в якому бере участь велика кількість науково-дослідних, проектно-конструкторських, пусконаладжувальних, випробувальних установ і підприємств, вимагає проведення фундаментальних, прикладних, пошукових та інших досліджень. Це пов'язано із витратами і набагато тривалішими термінами для створення конструкції нового апарата до його пуску в експлуатацію.

2. За рахунок скорочення життєвого циклу технічних (апаратурних і машинних) систем збільшується часовий розрив між моральним і фізичним старінням техніки та технології.

3. Збільшується кількість різних варіантів вирішення однієї і тієї ж

науково-технічної проблеми. Кожен з них вимагає вичерпного відпрацювання та обґрунтування, а також оптимального вибору.

4. Зростають витрати на розроблення, виготовлення та експлуатацію технічних систем та обладнання.

З перерахованого впливає наступне: непомірно виростає ціна прийнятих рішень у процесі створення обладнання, тому обґрунтованість його вибору повинна базуватися, з одного боку, на використанні вироблених технічних концепцій з цього питання, а з іншого – на глибокому і всебічному вивченні характеристик обладнання протягом усього життєвого циклу.

Перший аспект проблеми на науковому рівні почав розроблятися із використанням таких засобів математичного апарату, як теорія ймовірностей і математична статистика, теорія ігор, математичне програмування та теорія масового обслуговування, при широкому застосуванні системного методу дослідження. Основи системного аналізу моделювання, розрахунку процесів, створення ефективних технічних рішень для попередження забруднення атмосферного повітря містяться в роботах академіків В.В. Кафарова, Б.Н. Ласкоріна, І.В. Петрянова-Соколова та ін.

Подальший розвиток призвів до появи сукупності нових методів обґрунтування рішень, які оформились у самостійний науковий напрямок техніко-економічного аналізу.

Третім напрямком є аналіз систем, для яких визначаються мета, завдання і способи досягнення цієї мети.

Усі три напрямки взаємно доповнюють один одного. Проте одна з характерних відмінностей між ними полягає в різному поєднанні кількісних і якісних оцінок прийнятих рішень, які одержує кожен з них, причому ступінь детермінованості опису зменшується від першого до останнього.

Основна роль у дослідженнях першого напрямку відводиться математичним методам. У методах техніко-економічного аналізу, крім кількісного опису, використовують і якісні характеристики, в той час як математичні методи відіграють допоміжну роль.

Разом з тим, відомі напрямки не дозволяють створити цілісну методологію розробки та вибору нових конструкцій устаткування, що завершувалася б упровадженням їх у промисловість, а дозволяють лише прогнозувати рішення на стадії проектування. Тому, незважаючи на велику кількість конструктивних удосконалень у межах основних груп масообмінних і пилоуловлювальних апаратів, в промисловості використовуються традиційні конструкції газоочисного обладнання, яке не завжди забезпечує високу ефективність очищення відхідних газів від забруднюючих речовин та стійку роботу. Відсутність методології проектування та вибору газоочисного обладнання перешкоджає створенню високоінтенсивних апаратів та вибору найбільш оптимальної конструкції газоочисного обладнання для потреб конкретного підприємства.

4.1 Оптимізація пилогазоочисних процесів з метою підвищення рівня екологічної безпеки

В розділі 2 при розгляді великої системи «екологічна безпека» встановлено, що природоохоронний процес є компонентом системи «екологічна безпека атмосферного повітря», впливає на системи «екологічна безпека гідросфери» та «екологічна безпека літосфери» і в цілому на стан екологічної безпеки довкілля. Таким чином, ефективні природоохоронні процеси повинні забезпечити відповідний рівень екологічної безпеки. Одним із шляхів досягнення цього результату є вибір більш оптимальних в порівнянні з існуючими природоохоронних технологій, які забезпечують нормативні рівні впливу на довкілля.

Використання узагальненого ряду Фур'є дозволяє перейти від аналогових до дискретних еталонних та реальних природоохоронних процесів. На цій основі завдання підвищення екологічної безпеки можна звести до завдання структурної поелементної оптимізації підсистеми природоохоронних процесів в цілому, та окремого природоохоронного

процесу зокрема.

Постановка завдання оптимізації природоохоронного процесу полягає в наступному:

- встановлюється критерій оптимальності природоохоронного процесу;
- визначається множина параметрів $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, що чинять основний вплив на ефективність природоохоронного процесу відповідно до обраного критерію;
- розробляється цільова функція $F = f(X)$ вирішується завдання оптимізації, що полягає в знаходженні екстремуму цільової функції, в результаті чого знаходиться один з можливих процесів, параметри якого становлять екстремум цільової функції.

Так як одним із шляхів підвищення рівня екологічної безпеки є скорочення кількості забруднюючих речовин, які надходять в атмосферне повітря, то оптимізація природоохоронного процесу буде спрямована на вилучення найбільшої маси забруднюючої речовини за певний відрізок часу.

Процес комплексного очищення пилогазових викидів слід розглядати як цілеспрямоване перетворення фізико-хімічної системи – розподіленого в об'ємі апарата багатокомпонентного суцільного середовища, в кожній точці якого відбувається перенесення речовини, енергії та імпульса. Кожна з фаз може розглядатись як транспортний потік, який вносить в робочу зону апарата один або декілька реагентів. Для газової фази це газоподібні компоненти та аерозольні частинки, для рідкої – відповідні сорбенти. В потоці багатокомпонентної суміші різні компоненти переміщуються з різними швидкостями, за рахунок чого склад суміші змінюється як в просторі, так і в часі.

Особливістю фізико-хімічних перетворень в рідкій фазі при комплексному очищенні відхідних газів є одночасне надходження в неї твердих частинок з газового потоку. Багатократне перевищення об'єма

газової фази над об'ємом твердих частинок дозволяє розглядати запилений газовий потік як однорідну фазу. Ефективність газоочищення буде результатом одночасного протікання фізичних та хімічних процесів, взаємозв'язок яких обумовлює розподіл полів концентрацій та імпульсів в реакційній зоні апарата.

Ефективність очищення відхідних газів визначається за формулою:

$$\eta = \frac{M_e}{M_n} \cdot 100\% = \frac{K \cdot F \cdot \Delta}{M_n} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

де M_e – маса вилученої за одиницю часу ЗР, кг/с;

M_n – початкова маса ЗР у відхідних газах, кг/с.

Маса вилученої з газового потоку забруднюючої речовини визначається з матеріального балансу процесу або за рівнянням:

$$M = K \cdot F \cdot \Delta \cdot t, \quad (4.2)$$

де M – маса вловленої речовини, кг;

F – площа поверхні контакту фаз, м²;

K – коефіцієнт швидкості процесу;

Δ – рушійна сила процесу. Рушійною силою при пилоочищенні буде різниця тиску, при абсорбції – різниця концентрацій;

t – час, с.

Масу речовини можна розглядати як формалізовану продуктивність апарата по певному виду речовини. Віднесена до параметру, який характеризує розміри робочої зони апарата, ця величина дозволяє перейти до більш важливої характеристики, яка інтегрально відображає функціонально-технологічний рівень процесу або апарата – інтенсивності.

Під інтенсивністю будь-якого апарата мають на увазі відношення однієї з його цільових характеристик до об'єму або площі поперечного

перерізу апарата. Інтенсивність роботи пропорційна швидкості процесу, тому прагнуть створити таку конструкцію апарата, яка б забезпечила максимальну швидкість процесу, і, відповідно, максимальну інтенсивність процесу. Інтенсивність є однією з важливих умов переведення промислового обладнання на більш високий технічний рівень, що дозволяє отримати за один і той же час більшу кількість продукції, скоротити кількість одиниць обладнання та зменшити його габарити.

На промислових підприємствах реалізувати принцип оптимізації процесів пилогазоочищення доцільно шляхом застосування високоінтенсивного газоочисного обладнання. У цьому випадку, процес оптимізації слід розглядати як вирішення оптимізаційного завдання, приймаючи в якості параметра оптимізації інтенсивність даного газоочисного апарата [217].

Інтенсивність апарата визначають за формулою:

$$i = \frac{M}{V \cdot t} = KF \frac{\Delta}{V}, \quad i = \frac{M}{S \cdot t} = KF \frac{\Delta}{S}, \quad (4.3)$$

де V – об'єм апарата, м³;

S – площа поперечного перерізу апарата, м².

Для якісної оцінки оптимальності технологічного режиму роботи газоочисного обладнання можна використовувати технологічний критерій оптимальності, який враховує ефективність процесу та енергетичні витрати на проведення процесу [196]:

$$\Pi = \frac{i \cdot \eta}{\Delta P}, \quad (4.4)$$

де η – ефективність очищення газів, %;

ΔP – гідравлічний опір апарата, Па.

Врахування в одному показнику технологічного критерія – ефективності очищення η та економічного критерія – енерговитрат на проведення процесу, які опосередковано виражені через гідравлічний опір ΔP , дозволяє універсально характеризувати техніко-економічну ефективність процесу.

Оптимальним буде газоочисний процес P , який має максимальну величину інтенсивності:

$$P_{opt} = \max i(X), \quad (4.5)$$

де X – фактори, які впливають на інтенсивність процесу.

Оптимізація процесів комплексного очищення відхідних газів буде полягати у виборі параметрів впливу фізико-хімічних факторів – термодинамічних, кінетичних, масообмінних, теплообмінних і гідродинамічних, на неоднорідні багатоконпонентні системи. Термодинамічні фактори, об'єднуючи характеристики фазової і хімічної рівноваги, визначають технологічні параметри і напрямок реалізації процесу, його швидкість і селективність. У свою чергу, кінетичні чинники включають константи швидкості та енергії активації реакцій, що протікають в системі. Групу масообмінних факторів представляють коефіцієнти міжфазного переносу всіх вихідних і проміжних речовин, а також кінцевих продуктів реакції. Теплообмінні фактори включають коефіцієнти теплопередачі та характеристики зовнішнього теплообміну системи з навколишнім середовищем. До гідродинамічних факторів відносять характеристики формування міжфазної поверхні, кількості руху і турбулізації течії газової й рідкої фаз, але область їх опосередкованого впливу значно розширюється через інтегральні швидкості масо- і теплопередачі та хімічних реакцій.

Особливу групу складають конструктивні фактори, особливість зв'язку яких з фізико-хімічними явищами впливу на багатоконпонентні неоднорідні системи проявляється в характеристиках апаратурного оформлення робочої

зони апарата. Ці фактори представляють собою конструктивно реалізовані технологічні прийоми впливу на процеси міжфазного переносу через гідродинамічні чинники та створення розвинутої поверхні контакту фаз. Областю домінуючого прояву конструктивних чинників є формування енергетичних витрат на організацію руху фаз в апараті. Таким чином вони істотно впливають на оптимізаційні показники проведення процесу газоочищення.

Використовуючи принципи системного підходу та структурної оптимізації, фактори впливу на процес оптимізації газоочисних процесів, виходячи з рівняння (4.2), можна представити наступними взаємопов'язаними та водночас функціонально завершеними підсистемами:

1 – підсистема факторів, які призводять до збільшення площі поверхні контакту фаз;

2 – підсистема факторів, які призводять до збільшення середньої рушійної сили;

3 – підсистема факторів, які призводять до збільшення коефіцієнта швидкості процесу;

4 – підсистема факторів, які впливають на об'єм апарата.

Перша підсистема X_1 включає в себе два види факторів (рис. 4.1): гідродинамічні та конструктивні.

$$X_1 = f(Re, \Gamma), \quad (4.6)$$

де Re – критерій Рейнольдса;

Γ – характеристика конструктивних параметрів апарата.

Гідродинамічний режим роботи обладнання та його конструктивне оформлення за оцінками Бердта, Броунштейна, Щеголева та ін. [218, 219] визначають механізм впливу фізичних факторів на масообмінні та хімічні процеси в робочому об'ємі апарата.

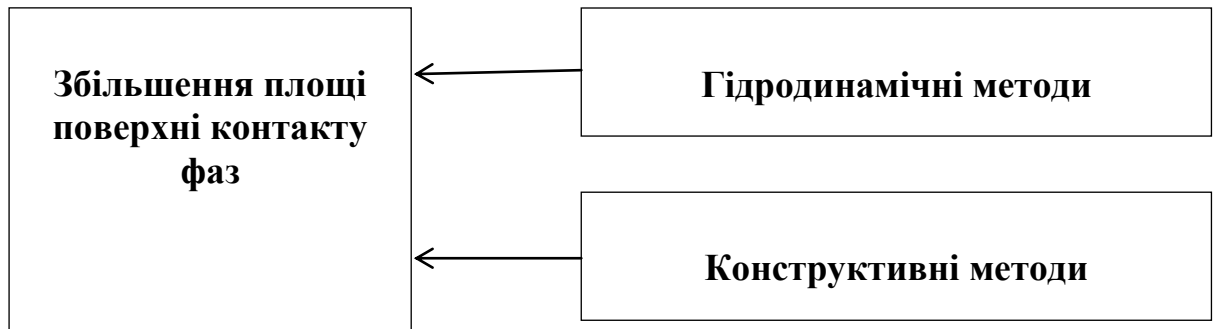


Рисунок 4.1 – Схема підсистеми факторів впливу, які призводять до збільшення площі поверхні контакту фаз

Гідродинамічні методи включають в себе роботу обладнання в високотурбулентному режимі при високих швидкостях газу, що сприяє подрібненню рідини, створенню високих пінних шарів, тонких плівок рідини і призводить до збільшення поверхні контакту фаз та її безперервного оновлення.

Конструктивні методи будуть включати в себе застосування апаратів та контактних пристроїв, робота яких сприяє турбулізації фаз та збільшенню поверхні контакту фаз. Це вимагає суміщення в конструкції апаратів технологічних прийомів керованого впливу на структуру потоків, створення необхідних умов для інтенсивного протікання фізичних та хімічних процесів в робочому об'ємі апарата.

Гідродинамічні та конструктивні методи як компоненти підсистеми взаємопов'язані та впливають як один на одного так і на підсистему.

Для аналізу гідродинамічних та конструктивних методів інтенсифікації газоочисних процесів нами проведена класифікація газоочисних апаратів. Апарати для проведення процесів газоочищення і пиловловлювання в системі газ – рідина за способом впливу на потоки, що контактують, можна умовно розділити на дві великі групи (рис.4.2):

- апарати, що використовують механічну енергію;
- апарати, що використовують енергію потоків газу та рідини.

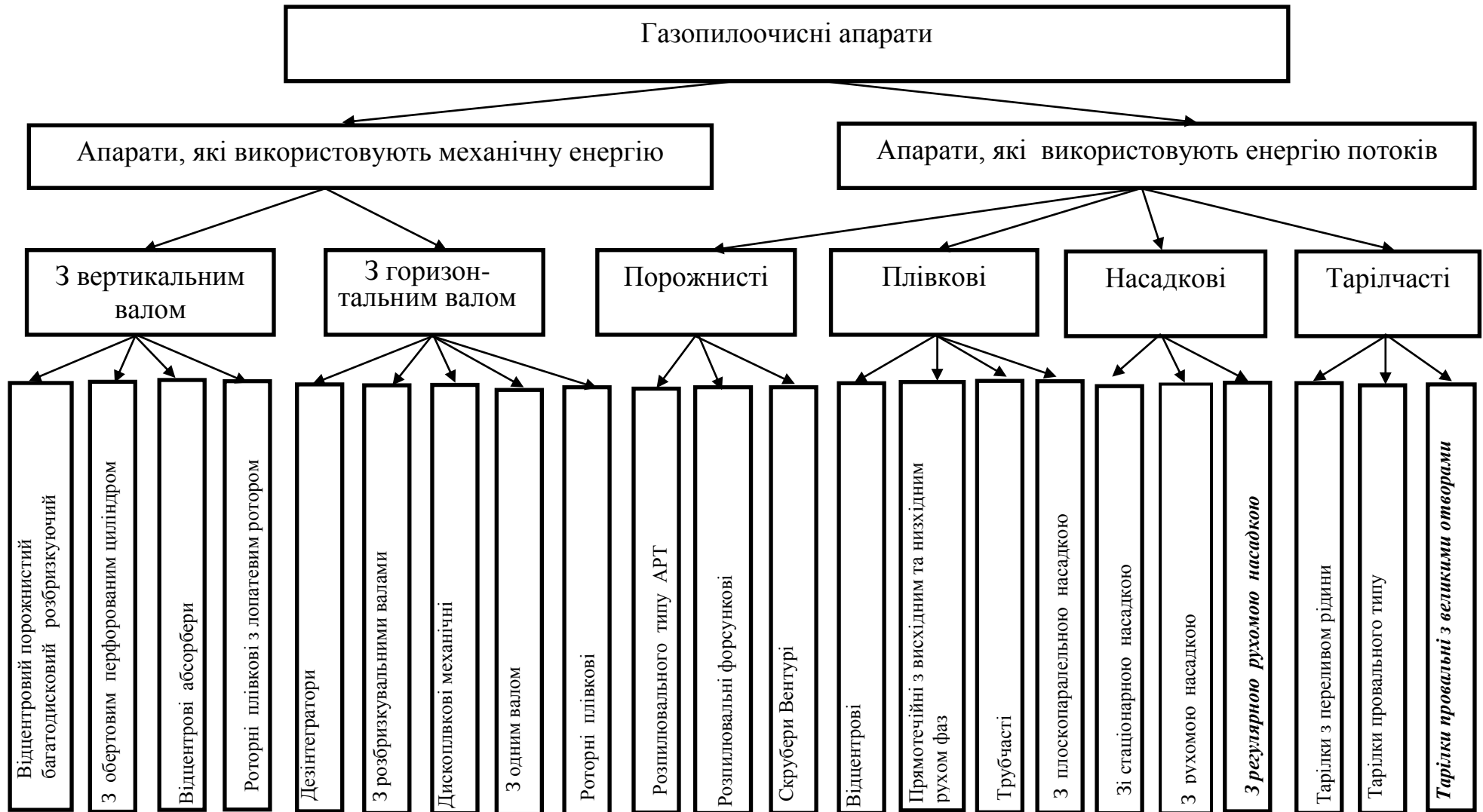


Рисунок 4.2 – Класифікація газопилоочисних апаратів

Характерною ознакою апаратів, що використовують механічну енергію, є наявність ротора, диска, лопатей і т.п. [220 - 225]. У цих апаратах практично не використовується енергія, що підводиться газовим і рідинним потоками, а для створення розвинутої поверхні взаємодії фаз додатково залучається зовнішня енергія.

За способом розташування вала робочого органу ці апарати поділяють на апарати з вертикальним та горизонтальним розташуванням вала.

До апаратів з вертикальним валом належать: відцентрові пустотілі із багатодисковим розбризкувачем, роторні плівкові з лопатевим ротором. До механічних розпилюючих плівкових апаратів з горизонтальним валом належать: апарати з розбризкуючими валками, дискові плівкові механічні абсорбери, роторні плівкові апарати, дезінтегратори. Узагальнення даних щодо апаратів, які використовують механічну енергію, показує, що рухомі робочі органи сприяють значній інтенсифікації процесів масообміну і пиловловлювання за рахунок створення розвинутої міжфазної поверхні, причому наявність твердих домішок у газовій і рідкій фазах не знижує ефективності проведених процесів. Гідравлічний опір у цих апаратах невеликий. Однак апарати цієї групи складні у виготовленні, монтажі та обслуговуванні, мають значні втрати електроенергії при передачі руху робочим органам, тобто мають низький коефіцієнт корисної дії. Безсумнівною позитивною ознакою апаратів цієї групи є механічний вплив обертовим або рухомим робочим органом на структуру потоків. Ця ознака може бути покладена в основу вибору апаратів.

При цьому негативні наслідки організації руху (зовнішній привід, сальникові ущільнення і т.п.) повинні бути виключені.

Апарати, що використовують енергію газового та рідинного потоків, широко поширені в системах газоочищення. Найбільш вивченими з них є тарілчасті, насадкові (зі стаціонарним шаром насадки) і розпилювальні [226-231].

Серед перспективних конструкцій пилогазоочисного обладнання, що

мають яскраво виражений механізм взаємодії потоків газу і рідини можна відзначити апарати: ударно-інерційної, вихрової, швидкісної дії [232 - 237]. В апаратах ударно-інерційної дії позитивною ознакою є ударний вплив газового потоку об поверхню рідини, відсутність пристроїв для перемішування рідини та простота конструкції. Це дозволяє ефективно використовувати їх у процесах пиловловлювання. В апаратах вихрової дії позитивною ознакою є створення режиму розвиненої турбулентності, що приводить до інтенсифікації процесів пилогазоочищення за рахунок створення розвиненої поверхні контакту фаз та виникнення відцентрової сили. Позитивною ознакою апаратів швидкісної дії є створення високих відносних швидкостей між твердими, рідкими частинками і газовим потоком. Інтенсивний турбулентний режим сприяє подрібненню рідинного потоку на краплі, що у свою чергу призводить до підвищення ефективності процесів пилогазоочищення за рахунок створення розвинутої поверхні контакту фаз та багатократного її оновлення.

Удосконалення в межах цієї групи апаратів та поєднання позитивних ознак апаратів, які використовують енергію газового та рідинного потоків: вихрової структури потоків, ударного впливу, високих швидкостей газу, реалізовано в апаратах з рухомою насадкою. В апаратах з рухомою насадкою позитивною ознакою є створення вихрової структури газорідинного шару за рахунок введення в потік твердих насадкових тіл. Відривне обтікання елементів насадки призводить до пульсацій потоку, зменшення діаметра крапель та росту поверхні контакту фаз. В апаратах з регулярною рухомою насадкою при заданому просторовому розташуванні насадкових тіл виникає режим одночасного вихроутворення, який характеризується одночасним утворенням вихорів за насадковими тілами та їх рухом від одного елемента до іншого. Досягнення режиму одночасного вихроутворення призводить до росту сумарної потужності вихорів та більш інтенсивного подрібнення рідини на краплі. В результаті цього збільшується поверхня контакту фаз та відбувається значна інтенсифікація

процесів газоочищення.

Барботажно-пінні скрубери становлять численну групу масообмінних апаратів, в яких формування міжфазної поверхні в дослідженнях А.Г. Касаткіна, М.Є. Позина, М.П. Мухленова, Е.Я. Тарата, А.Ф. Туболкіна, В.Н. Соколова та ін. характеризується як складно організований процес безперервного висхідного руху газових бульбашок через шар рідини, що інтенсивно переміщується [124, 133, 238]. Удосконалені конструкції пінних скрубєрів – це апарати з провальними тарілками великих отворів (ПТВО), які працюють в інтенсивному гідродинамічному режимі. В апаратах з провальними тарілками великих отворів досягаються високі швидкості газу, що дозволяє проводити процес в режимі розвиненої турбулентності та використовувати енергію вихорів для підвищення інтенсивності пило- та газоочищення. Висота шару піни в апаратах з ПТВО може сягати 1,5 м, що сприяє створенню розвиненої поверхні контакту фаз [239].

Підсистема факторів, які призводять до збільшення середньої рушійної сили процесу X_2 , представлена трьома групами (рис.4.3).

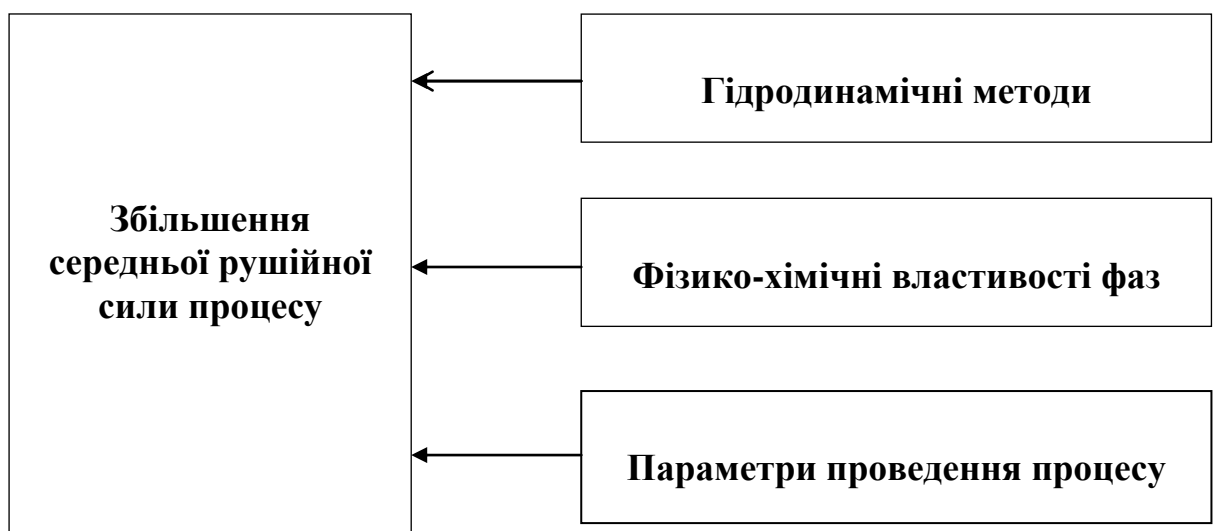


Рисунок 4.3 – Схема другої підсистеми факторів впливу на інтенсивність газоочисних процесів

$$X_2 = f(Re, \Phi, \Pi). \quad (4.7)$$

де Φ – складова, яка враховує фізико-хімічні властивості фаз; Π – складова, яка враховує технологічні параметри проведення процесу (температура, тиск).

В газорідних апаратах збільшення рушійної сили процесу в загальному випадку може бути досягнуто підвищенням початкової концентрації компонента у вихідному потоці, збільшенням тиску, регулюванням температури процесу, активним відведенням продуктів реакції з реакційної зони (обсягу). Так, від значень температури і тиску залежить рівноважний стан системи і, відповідно рушійна сила процесу. Разом з тим, домінуючий вплив на величину рушійної сили чинять умови руху фаз, якими визначаються закономірності зміни поточних і рівноважних концентрацій забруднюючої речовини.

Інтенсивний гідродинамічний режим роботи газоочисного обладнання, як показано вище, призводить до оновлення поверхні контакту фаз, перемішування та відведення продуктів реакції і, відповідно, до збільшення середньої рушійної сили процесу.

Фізико-хімічні властивості фаз будуть впливати на кінетику абсорбції, величину середньої рушійної сили процесу, коефіцієнт масопередачі і, таким чином, є одним із факторів оптимізації процесу газоочищення, як слідує з рівняння (4.2). Особливе значення це набуває при виборі абсорбента. При комплексному очищенні відхідних газів високоефективне вилучення газоподібних забруднювачів обумовлене необхідністю їх швидкого відведення або проведення реакції в рідкій фазі, що дозволяє підвищити ємність абсорбента і, таким чином, скоротити об'єм рідких відходів газоочищення. Для очищення відхідних газів промислових підприємств використовується як фізична, так і хімічна абсорбція. При протіканні в рідкій фазі хімічної реакції між розчиненим газоподібним компонентом і абсорбентом частина компонента переходить у зв'язаний стан і концентрація

вільного компонента в рідині знижується. Таке зниження призводить до збільшення концентраційного градієнта і прискорення абсорбції в рідкій фазі в порівнянні з фізичною абсорбцією. Це прискорення тим більше, чим вище швидкість хімічної реакції, тобто чим швидше розчинені молекули компонента переходять у зв'язаний стан. При високих швидкостях реакції збільшення швидкості абсорбції може бути настільки великим, що опір рідкої фази стає рівним нулю. Навпаки, при дуже повільних реакціях прискорення настільки мале, що ним можна знехтувати і розглядати процес як фізичну абсорбцію. Збільшення швидкості абсорбції при протіканні хімічної реакції в рідкій фазі може бути враховано: збільшенням коефіцієнта масовіддачі в рідкій фазі, якщо приймати рушійну силу такою ж, як при фізичній абсорбції; збільшенням рушійної сили, якщо приймати коефіцієнт масовіддачі таким же, як при фізичній абсорбції [116]. Інтенсифікація процесів масообміну при проходженні хімічної реакції призводить до зменшення висоти апарата при заданій ефективності очищення.

Традиційними вимогами до абсорбентів при використанні у промислових масштабах є: висока поглинальна здатність (абсорбційна ємність); висока селективність відносно до компонента, який поглинається; невисока летючість; невелика в'язкість; здатність до регенерації; доступність і невисока вартість; абсорбенти мають бути термохімічно стійкими; не проявляти корозійну активність.

Головним фактором, який визначає вибір абсорбенту, є здатність поглинати забруднювач з газової фази. Добре розчинні гази видаляють фізичною абсорбцією, гази, які мають меншу розчинність – хімічною абсорбцією. Однак, універсальної рідини, яка задовольняла б всім наведеним вимогам не існує. В кожному окремому випадку підбирають абсорбент, який найбільш повно задовольняє ряд вимог. Вода – дешевий і доступний абсорбент для очищення великих обсягів газів, що важливо при санітарній очистці газів. Для абсорбції газоподібних забруднювачів з обмеженою розчинністю у воді необхідні дуже великі кількості води, що призводить до

збільшення об'ємів забруднених стоків та розмірів газоочисного обладнання. Тому для видалення газів з меншою розчинністю використовуються інші абсорбенти. Наприклад, для вилучення SO_2 , Cl_2 , H_2S , HCl , HF і SiF_4 , використовують слабколужні розчини або водний розчин вапна, для уловлювання NH_3 – підкислену воду.

Крім підвищення ефективності газоочищення, правильний вибір абсорбенту в ряді випадків дає можливість повернути в технологічний процес відпрацьований абсорбент, отримати концентровані розчини уловленої забруднюючої речовини, які можуть використовуватись як сировина або цільовий продукт, реалізувати замкнутий цикл водоспоживання, отримати уловлений газовий компонент в чистому вигляді в результаті регенерації абсорбенту. При виборі абсорбенту потрібно також враховувати можливості та технологічні умови підприємства: наприклад, наявність води для фізичної абсорбції або лужних (кислих) стоків, які можуть використовуватись як абсорбенти при хемосорбції [216].

Таким чином, вибір абсорбенту буде впливати на рівень екологічної безпеки атмосферного повітря, гідросфери і, в цілому, на стан екологічної безпеки довкілля. Схема вибору абсорбенту з метою підвищення рівня екологічної безпеки представлена на рис. 4.4.

Для визначення фактору інтенсифікації процесу газоочищення при протіканні хімічної реакції, приймемо такі допущення [240]:

- розглядаємо ступінчастий контакт фаз. На кожному ступені відбувається повне перемішування рідкої фази і вирівнювання концентрації розчиненої речовини у всьому об'ємі рідини;
- розглядаємо внутрішню задачу в рідкій фазі;
- розглядаємо систему з двома реагентами: компонентом, який абсорбується з концентрацією C і нелетким розчиненим компонентом концентрацією b .

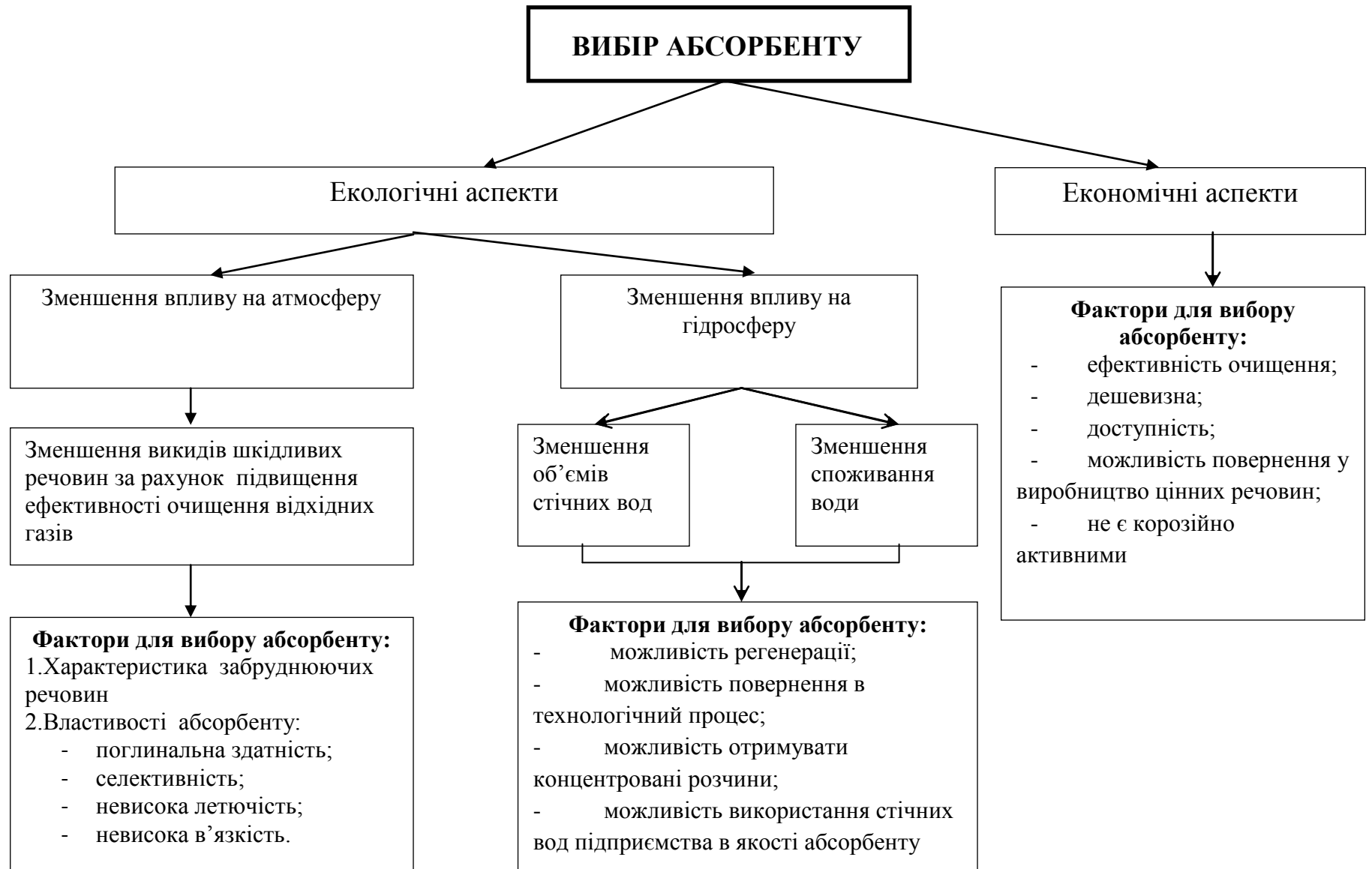


Рисунок 4.4 – Фактори, які впливають на вибір абсорбенту

При взаємодії фаз може протікати процес хемосорбції в режимі швидкої реакції [241]:

$$1 \ll \sqrt{\frac{t_D}{t_p}} \ll \frac{b_0}{qC_0'}, \quad (4.8)$$

де t_D – час дифузії, с;

t_p – час хімічної реакції, с;

b_0 – початкова концентрація розчиненого нелеткого компонента в рідкій фазі, кг/м³;

C_0' – концентрація газу, який абсорбується, на границі розділу фаз, кг/м³;

або в режимі миттєвої реакції:

$$\sqrt{\frac{t_D}{t_p}} \gg \frac{b_0}{qC_0'}, \quad (4.9)$$

а також процес фізичної абсорбції:

$$b_0 \rightarrow 0. \quad (4.10)$$

У цілому по апарату спостерігається деякий перехідний режим від швидкої реакції до миттєвої або до режиму фізичної абсорбції в залежності

від висоти зони контакту. У випадку, коли величина $\left(\frac{t_D}{t_p}\right)^{0,5}$ має той же

порядок, що і величина $\frac{b_0}{qC_0'}$, процес описується системою [242]:

$$\begin{cases} D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t} + r(b, C); \\ D_2 \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} = \frac{\partial b}{\partial t} + r(b, C), \end{cases} \quad (4.11)$$

де D_1 - коефіцієнт дифузії компонента, що абсорбується, м²/с;

D_2 - коефіцієнт дифузії реагенту в рідкій фазі, м²/с;

r - швидкість реакції, кг/(м³с).

Граничні умови:

$$x = 0, C = C'_0. \quad (4.12)$$

Нелетючість рідкого реагенту накладає умову відсутності його масоперенесення до межі розділу фаз:

$$x = 0, \frac{\partial b}{\partial x} = 0; \quad (4.13)$$

$$t = 0, b = b_0, C = C_0, \quad (4.14)$$

де C_0 – початкове значення концентрації абсорбтиву в рідині, кг/м³;

для плівкової теорії:

$$x = \delta, C = C_0, b = b_0; \quad (4.15)$$

$$C = C_0, \frac{\partial C}{\partial x} = 0; \quad (4.16)$$

$$b = b_0, \frac{\partial b}{\partial x} = 0, \quad (4.17)$$

де δ – товщина плівки або радіус краплі, м.

У першому наближенні приймаємо:

$$r(b, C) = k_2 b C, \quad (4.18)$$

де k_2 – константа швидкості реакції другого порядку, $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$.

Диференціальні рівняння і граничні умови для розглянутої задачі мають вигляд:

$$D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = k_2 b C; \quad (4.19)$$

$$D_2 \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} = q k_2 b C; \quad (4.20)$$

початкові умови:

$$x = 0, \quad C = C'_0, \quad \frac{\partial b}{\partial x} = 0, \quad (4.21)$$

граничні умови:

$$x = \delta, \quad C = C_0, \quad b = b_0. \quad (4.22)$$

Хімічна реакція необоротна:

$$D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{D_2}{q} \frac{\partial^2 b}{\partial x^2}. \quad (4.23)$$

Двічі інтегруючи рівняння (4.23) і підставляючи умови (4.21) і (4.22) одержуємо:

$$b_i = b_0 \left\{ 1 - \frac{D_1}{D_2} \frac{q C'_0}{b} \left[\frac{-\left(\frac{dC}{dx}\right)_{x=0}}{C'_0/\delta} - 1 \right] \right\}, \quad (4.24)$$

де b_i – значення b на межі розділу фаз.

Перший член у квадратних дужках рівняння (4.24) являє собою відношення дійсного поверхневого градієнта концентрацій компонента, який абсорбується, до градієнта концентрацій, що міг би установитися при фізичній абсорбції. Звідси:

$$\frac{-(dC/dx)_{x=0}}{C'_0/\delta} = I, \quad (4.25)$$

де I – відношення швидкості хімічної абсорбції до швидкості фізичної абсорбції.

Позначимо через I_∞ величину I , що буде розрахована для випадку миттєвої реакції:

$$I_\infty = 1 + \frac{D_2}{D_1} \frac{b_0}{qC'_0}. \quad (4.26)$$

Підставляючи рівняння (4.25) і (4.26) у (4.24), одержимо:

$$b_i = b_0 \frac{I_\infty - I}{I_\infty - 1}, \quad (4.27)$$

$$I = \frac{\sqrt{\frac{t_D}{t_p} \frac{I_\infty - I}{I_\infty - 1}}}{th \sqrt{\frac{t_D}{t_p} \frac{I_\infty - I}{I_\infty - 1}}}. \quad (4.28)$$

Висоту контактної зони доцільно вибирати з умови протікання

процесу в режимі швидкої або миттєвої реакції, тобто вона визначається концентрацією реагенту в рідкій фазі і швидкістю хімічних реакцій.

Третя підсистема X_3 – фактори, які призводять до збільшення коефіцієнта масопередачі. Для розрахунку коефіцієнтів масопередачі прийнято використовувати критеріальні рівняння, які пов'язують між собою дифузійний критерій Нуссельта, дифузійний критерій Прандтля та критерій Рейнольдса:

$$Nu' = A Pr'^m Re^n. \quad (4.29)$$

З аналізу складових рівняння (4.29) виділимо фактори впливу на коефіцієнт швидкості процесу (рис. 4.5): гідродинамічний режим роботи апарата, фізико-хімічні властивості фаз, параметри проведення процесу: температура, тиск.

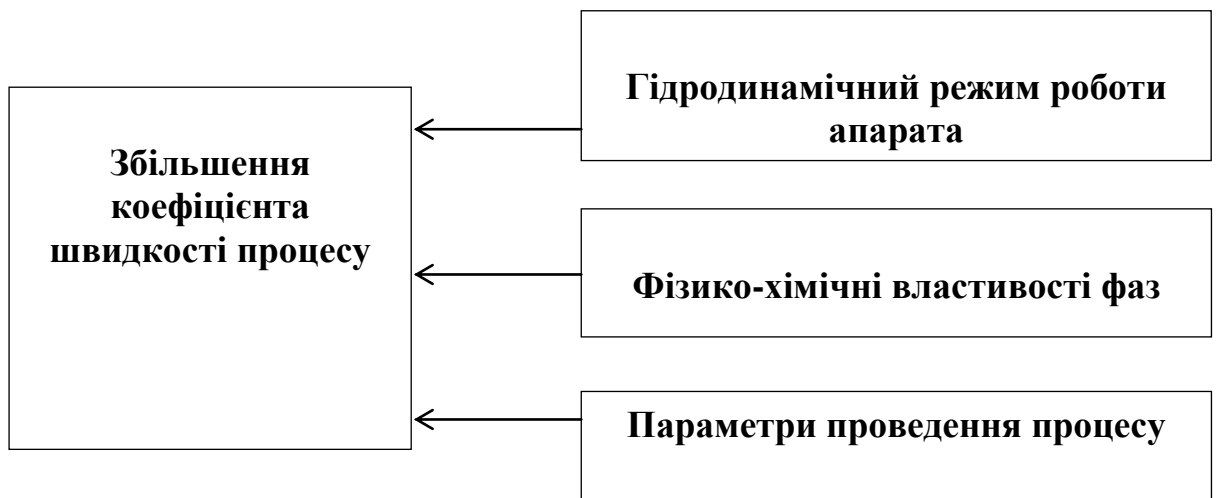


Рисунок 4.5 – Схема третьої підсистеми факторів впливу на інтенсивність газоочисних процесів

$$X_3 = f(Re, \Phi, \Pi). \quad (4.30)$$

Кінетичний коефіцієнт процесу K визначається швидкістю реакції і

дифузіїю в рідкій та газовій фазах. Для гетерогенних процесів, не пов'язаних з хімічними перетвореннями, саме дифузіїю лімітується швидкість процесу і визначається значення коефіцієнта K в процесах масопередачі. Значення K залежить від параметрів стану газорідкої системи, які в достатній мірі піддаються керованому впливу. Це - температура, тиск, швидкість відносного руху фаз, фізичні властивості речовин. Більшість перерахованих параметрів функціонально пов'язано з рушійною силою процесів.

Ступінь впливу цих факторів суттєво залежить від гідродинамічного режиму роботи апарата. Чим вища інтенсивність течії середовища, тим менший вплив на протікання процесу чинить молекулярна дифузіїю в порівнянні з конвективною, що визиває прискорення процесів масообміну та інтенсифікації процесу газоочищення в цілому. Тому потенційно перспективним прийомом збільшення коефіцієнта швидкості процесу слід вважати інтенсифікацію перемішування фаз.

Четверта підсистема факторів X_4 – фактори впливу на об'єм апарата. Зменшення об'єму апарата відбувається за рахунок підвищення швидкості газу (зменшення площі перерізу апарата при сталій витраті) та ефективності проведення процесу (зменшення висоти апарату) (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – Схема четвертої підсистеми факторів впливу на інтенсивність газоочисних процесів

$$X_4=f(Re, L, \Phi, \Pi, L), \quad (4.31)$$

де L – витрата абсорбенту.

Тоді

$$i=f(X_1, X_2, X_3, X_4)=f(Re, \Gamma, \Phi, \Pi, L). \quad (4.32)$$

Таким чином, виходячи з аналізу функціональної залежності ефективності процесів газоочищення від кінетичних характеристик, механізму формування міжфазної поверхні, чинників розвитку рушійних сил і конструктивних особливостей апаратного оформлення показано можливість оптимізації умов проведення процесів при комплексному очищенні відхідних газів за величиною інтенсивності, як інтегральної характеристики ефективності здійснюваних процесів для кожної забруднюючої речовини. Так як гідродинамічний режим роботи апаратів впливає на всі складові інтенсифікації процесу, то далі будемо розглядати задачу оптимізації за режимними параметрами роботи газоочисного обладнання.

4.2 Методологія вибору пилогазоочисного обладнання

Розгляд факторів оптимізації газоочисних процесів покладено в основу методології вибору та дослідження пилогазоочисного обладнання. Розроблена методологія розробки і вибору пилогазоочисних апаратів включає два основних етапи – процес розробки і процес реалізації [243, 244] та охоплює весь життєвий цикл обладнання – від розробки до впровадження на конкретному виробництві з урахуванням вимог підприємств-споживачів.

Основу процесу розробки складає формулювання завдань і вироблення рішень (рис. 4.7). При формулюванні завдань аналізуються вимоги підприємств споживачів і можливості підприємств виробників газоочисного обладнання, а також сучасний рівень науки і техніки.



Рисунок 4.7 – Стадії процесу розробки та вибору газоочисного обладнання

Вимоги підприємств споживачів полягають в забезпеченні екологічних нормативів концентрації ЗР у відхідних газах при стійкій роботі газоочисного обладнання. При цьому особливу проблему становить комплексне забруднення, коли відхідні гази містять газоподібні ЗР та тверді частинки, що ускладнює роботу пилогазоочисного обладнання.

Першим кроком у формулюванні вимог підприємств-споживачів буде аналіз технологічного процесу та джерел виділення шкідливих речовин. Такий аналіз дозволить виявити об'єми та температуру газів, які надходять в систему газоочищення.

Наступний крок – аналіз компонентів відхідних газів.

Всі відхідні гази можна умовно розділити на три групи.

Перша група – технологічні та аспіраційні викиди, які містять тільки пил сировини або готового продукту. Джерелами пилоутворення є подрібнювальні-розмельні обладнання, обладнання для обробки матеріалів, транспортування, зберігання, змішування, дозування, грануляції, сепарації, сушіння, фасування та ін.

Друга група – технологічні викиди, які містять тумани.

Третя група – технологічні та аспіраційні викиди, які містять пил та газоподібні ЗР. Цю групу можна розбити на підгрупи в залежності від концентрації твердих частинок та їх дисперсності.

Властивості газоподібних ЗР будуть впливати на вибір абсорбенту та проведення процесу фізичної або хімічної абсорбції. При цьому при проведенні хемосорбції потрібно враховувати можливість появи продуктів хімічної реакції – осадів, гелів, які будуть призводити до забивання контактних елементів та порушувати стійку роботу обладнання, в результаті чого зростають експлуатаційні витрати на очищення газів та знижується ефективність газоочищення.

Характеристики твердих частинок будуть впливати на утворення відкладень на поверхнях газоочисного обладнання та стійку роботу газоочисного обладнання. Величина сил аутогезії та адгезії визначається, в першу чергу, фізико-хімічними властивостями твердих частинок. Задача визначення повних характеристик пилу до цього часу повністю не вирішена через велику номенклатуру виробництв, сировини та готового продукту.

В 1974 році випущений довідник фізико-хімічних властивостей пилу промисловості нерудних будівельних матеріалів [245], пізніше Скрябіною

[246, 247] були опубліковані атласи пилу підприємств теплоенергетики, металургії, будівельної промисловості, випущена монографія [248] та розроблений керівний документ, який встановлює методи дослідження пилу в лабораторних умовах [249]. Однак для багатьох видів пилу повне визначення характеристик та паспортизація до цих пір не проведена, що ускладнює вибір газопилоочисного обладнання.

Для вибору газоочисного обладнання нами були розроблені паспорти пилу ільменіту та і титан (IV) оксиду.

Паспорт пилу містить у собі найменування пилу, дані про пилоутворюючий агрегат, результати визначення фізико-хімічних властивостей пилу і характеристику газу – носія.

Фізико-хімічні властивості пилу визначали методами, приведеними в монографії П.А. Коузова і Л.Я. Скрябіної [248].

Паспортизація пилу ільменіту. Для паспортизації пилу ільменіту відбирали проби газу після циклону Ц-15 на стадії розмелу ільменіту в кульовому млині [250]. Характеристика газу-носія: температура – 30-35°C; концентрація пилу – 30-38,2 г/м³.

Пил ільменіту належить до групи неорганічного пилу, являє собою порошок від темно-сірого до коричнево-чорного кольору. Частинки мають кристалічну форму з чіткими гранями, що зумовлює утворення агломерацій, злипання пилу. У загальній масі пил є темно-сірого кольору, вигляд пилу ільменіту, отриманого за допомогою електронного мікроскопа „РЭМ-106-и”, наведено на рис. 4.8.

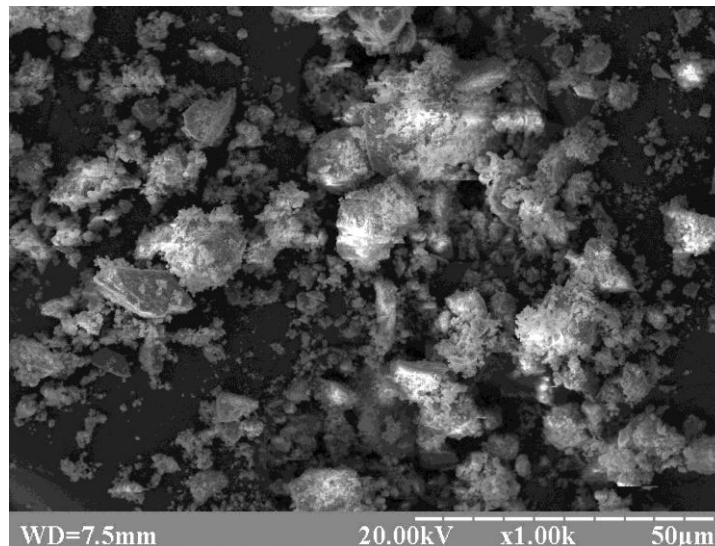


Рисунок 4.8 – Загальний вигляд пилу ільменіту

Дисперсний склад пилу визначали за допомогою приладу X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78 (рис. 4.9) шляхом седиментації в гліцерині. Як слідує з рис. 4.9 модальний діаметр часток пилу ільменіту – $d_m = 6$ мкм. В загальній масі переважають частинки 4-8 мкм, тобто пил є дрібнодисперсним (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Дисперсний склад пилу ільменіту (седиментація в гліцерині)

d_{eq} , мкм	<4	4-8	8-12	>12
Вміст частинок, % об'ємний	15	45	28	12

Побудова інтегральної кривої розподілу часток в ймовірнісно-логарифмічній системі координат (рис. 4.10) дозволила визначити середній розмір частинок пилу $d_{50} = 7,2$ мкм та середньоквадратичне відхилення розподілу частинок пилу $\sigma = 0,32$.

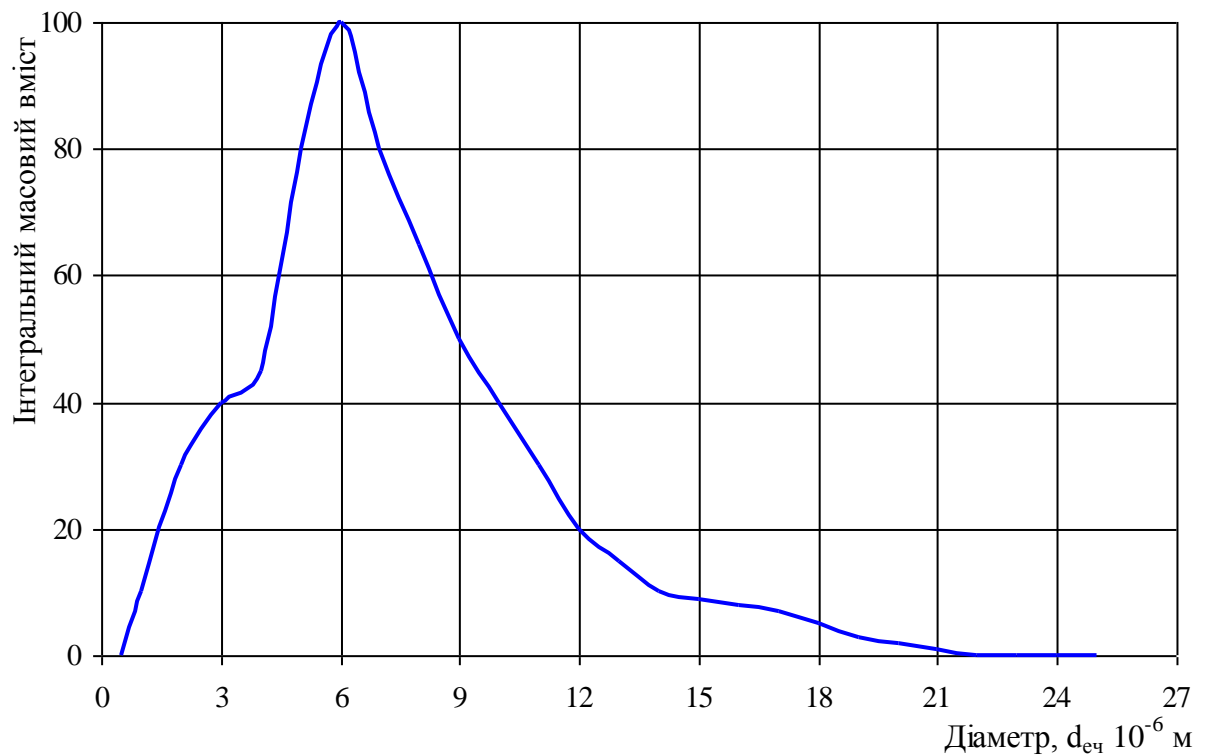


Рисунок 4.9 – Дисперсний склад пилу ільменіту (X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78)

Для визначення механічних властивостей пилу використовувалися такі методи [248]: порушення опорної стінки – для визначення кута природнього відкосу статичного; насипання пилу на диск – для визначення кута природнього відкосу динамічного; пікнометричний – для визначення щільності пилу; роз’ємного циліндру – для визначення розривної міцності, злипності; плівкової флотації – для визначення крайового кута змочування. Механічні властивості пилу ільменіту представлені в табл. 4.2.

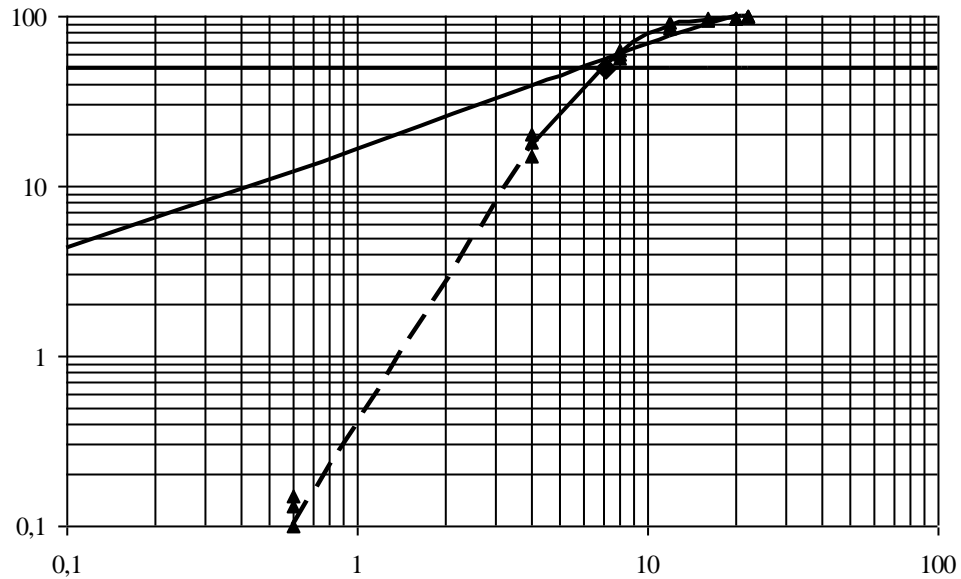


Рисунок 4.10 – Інтегральний розподіл часток пилу ільменіту: $D(d_i)$ – відносний вміст часток менше розміру $d_{еч}$, %.

Таблиця 4.2 – Механічні властивості пилу ільменіту

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Щільність	ρ	кг/м ³	3550 – 3650
Насипна щільність (неуцільнений стан)	ρ_n	кг/м ³	1370 – 1450
Насипна щільність (уцільнений стан)	ρ_y	кг/м ³	1980 – 2090
Кут природного відкосу статичний	$\alpha_{ст}$	град.	55 – 56
Кут природного відкосу динамічний	α_d	град.	49 – 50
Коефіцієнт ущільнення	K_y	-	1,44
Розривна міцність	T_p	Па	310 – 330
Крайовий кут змочування	Θ	град.	72

Паспортизація пилу титан (IV) оксиду. Для паспортизації пилу було виконано відбір проб газу після пилової камери на стадії прокалювання гідратованого титан (IV) оксиду. На цій стадії використовують порожнисті амоніачні скрубери, недоліком яких є значні витрати амоніачної води та невисокий ступінь очищення. Застосування інших видів пилоочисного обладнання є проблематичним внаслідок забивання контактних пристроїв частинками пилу титан (IV) оксиду .

Характеристика газу-носія: температура – 30-70°C; запиленість – 2,5-10 г/м³ .

Пил титан (IV) оксиду належить до групи неорганічного пилу, являє собою порошок білого кольору. Частинки мають як кристалічну, так і округлу форму. У загальній масі пил білого кольору, вигляд пилу титан (IV) оксиду, отриманий за допомогою електронного мікроскопа „РЭМ-106-и” наведено на рис. 4.11.

Лабораторні дослідження показали, що переважають частинки 0,2-0,4 мкм, тобто пил є дуже дрібнодисперсним. Дисперсний склад пилу визначали за допомогою приладу X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78 (рис. 4.12) шляхом седиментації в гліцерині.

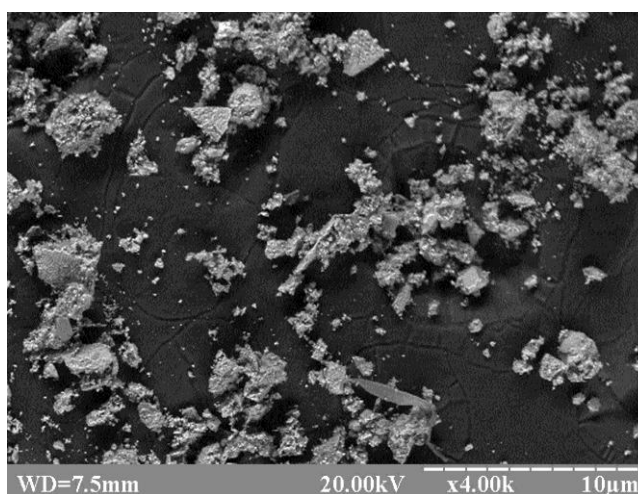


Рисунок 4.11 – Загальний вигляд пилу титану (IV) оксиду

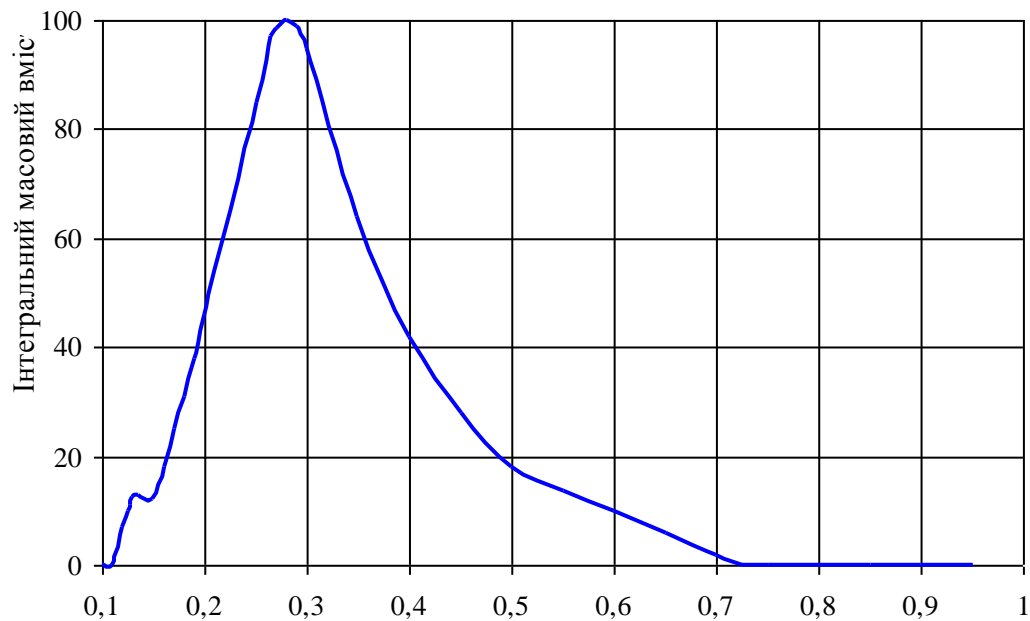


Рисунок 4.12 – Дисперсний склад пилу TiO_2 (X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78)

Таблиця 4.3 – Дисперсний склад пилу TiO_2 (седиментація в гліцерині)

$d_{eч}$, мкм	<0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	>0,5
Вміст частинок, % об'ємний	10	37	31	13	9

Інтегральна крива розподілу часток (рис. 4.13) дозволила визначити середній розмір частинок пилу $d_{50} = 0,305$ мкм та середньоквадратичне відхилення розподілу частинок пилу $\sigma = 0,29$.

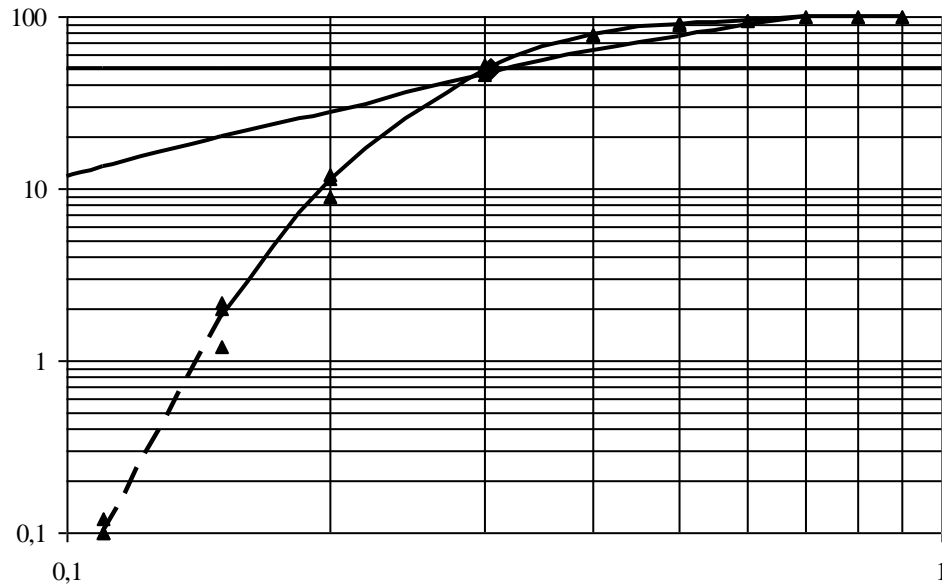


Рисунок 4.13 – Інтегральний розподіл часток пилу титан (IV) оксиду

Механічні властивості пилу титан (IV) оксиду представлені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Механічні властивості пилу TiO_2

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Щільність	ρ	кг/м ³	2850 – 2920
Насипна щільність (неуцільнений стан)	ρ_n	кг/м ³	920 – 970
Насипна щільність (уцільнений стан)	ρ_y	кг/м ³	1200 – 1240
Кут природного відкосу статичний	$\alpha_{ст}$	град.	57 – 58
Кут природного відкосу динамічний	α_d	град.	52 – 53
Коефіцієнт уцільнення	K_y		1,52 – 1,58
Розривна міцність	T_p	Па	758 – 802
Крайовий кут змочування	Θ	град.	36

При високій концентрації твердих частинок та крупній дисперсності пилу в системі комбінованого очищення традиційно застосовується попереднє знепилення відхідних газів.

Результатом аналізу є визначення завдань, що стоять перед розробниками нових конструкцій апаратів та при виборі конструкцій газоочисного обладнання для потреб конкретного підприємства.

Прийняття рішень здійснюється у дві стадії.

На першій стадії, на підставі конструктивно-технологічної класифікації відомих груп масообмінних і пилоуловлювальних апаратів, проводиться вибір аналогів обладнання за функціональними ознаками і після виявлення їх позитивних і негативних ознак приймаються прогнозні рішення. На другій стадії прогнозні рішення коригуються з урахуванням нормативних екологічних вимог до складу відхідних газів, технологічних нормативів, а також враховуються можливості підприємств-виробників і вимоги підприємств-споживачів. При цьому потрібно прагнути до створення або вибору апаратів, які мають наступні якості: простота, технологічність, уніфікованість та взаємозамінність вузлів та деталей, наявність запасних частин вітчизняного виробництва, можливість серійного виробництва. У результаті приймається адекватне рішення.

Процес реалізації, у свою чергу, підрозділяється на два блоки – створення та впровадження (рис. 4.14).

В процесі створення нової конструкції апарата, з метою оптимізації процесу газоочищення та досягнення високої інтенсивності, проводиться дослідження режимних і конструктивних параметрів як факторів впливу на інтенсивність процесу, вузлів, модулів, а також, апарата в цілому та виконуються оптимізаційні розрахунки.

На підставі виконаних досліджень здійснюється техніко-економічна оцінка, в якій визначаються технологічні та економічні показники, що порівнюються з вибраними аналогами та з існуючим на підприємствах обладнанням.



Рисунок 4.14 – Схема процесу реалізації розроблених рішень

Наявність поліпшених показників є основою для вироблення проектних рішень і проведення випробувань дослідного зразка в лабораторних умовах. Створення нової конструкції апарату закінчується розробкою бізнес-плану.

В умовах ринкової економіки впровадження нової техніки здійснюється на ліцензійній основі. У зв'язку з цим, блок впровадження газоочисного обладнання включає контракт про ліцензійний продаж рішення. Після цього, для конкретної галузі промисловості (або окремого підприємства) проводяться міжвідомчі випробування, розробляються нормалі і технічні умови, проводиться узгодження і координація прийнятих

рішень і здійснюється серійне або масове виготовлення нового зразка.

Розглянемо застосування розробленої методології стосовно удосконалення систем газоочищення підприємств хімічної промисловості України.

4.2.1 Формулювання завдань

Хімічна промисловість належить до галузей, які випускають велику номенклатуру продукції. За даними Держстату України у 2015р. підприємствами галузі вироблено 2,2 млн.т синтетичного аміаку, 1,3 млн.т мінеральних добрив, 525 тис.т сірчаної кислоти, 212,8 тис.т мила і поверхнево-активних речовин, 1445,1 тис.шт шин, 237,1 тис.т виробів з пластмас, 36,3 тис.т соди каустичної, 136 тис. т лаків та фарб, 133, 4 тис.т синтетичних смол та ін. Різноманітність виробництв хімічної промисловості, а також складні багатостадійні процеси в результаті яких утворюється велика кількість речовин, що викидаються в атмосферне повітря, ускладнює роботу газопилоочисного обладнання. Викидні гази підприємств хімічної промисловості відрізняються великою різноманітністю компонентів, мають у своєму складі як газоподібні забруднювачі, так і тверді частинки та краплинки вологи [109].

Характерні викиди в атмосферу основних хімічних виробництв наведені в табл. 4.5 [251]. Системи газоочищення на підприємствах хімічної промисловості багатоступеневі, містять апарати для сухого та мокрого очищення викидних газів. Нижче наведено аналіз систем газоочищення основних виробництв хімічної промисловості [252].

Виробництво амоніаку та азотної кислоти. Установа очищення і утилізації відхідних газів включає протитечійні абсорбційні колони (дві насадкові та дві тарілчасті), що працюють під тиском. Залежно від навантаження по газу і складу газової фази, абсорбери підключають послідовно або паралельно. У виробництві концентрованої азотної кислоти

очищення газів, що відходять, проводиться двоступеневою абсорбцією оксидів азоту в насадкових колонних апаратах.

Виробництво сірчаної кислоти. При отриманні сірчаної кислоти однією з основних проблем є очищення відхідних газів від пилу, туману кислоти та газових домішок. Для грубої очистки газу від пилу, бризок і туману кислоти застосовують циклони НИИОГаз і СИОТ, а також волокнисті фільтри та електрофільтри. На другій стадії використовують порожнисті розпилюючі скрубери, після яких газ надходить на електрофільтри для видалення залишків туману.

Виробництво фосфорної кислоти. Гази, які виділяються у виробництві екстракційної фосфорної кислоти, містять фтористий водень, пари сірчаної та фосфорної кислот. Крім того, мають місце викиди пилоподібних частинок сировини. Пилкові частинки видаляються при послідовному очищенні в циклонах та рукавних фільтрах. Фтористі гази очищаються в абсорберах різних конструкцій – насадкових, розпилюючих, плівкових, тарілчастих, скруберах Вентурі. Пари кислот уловлюються волокнистими фільтрами.

Таблиця 4.5 – Характерні викиди шкідливих речовин основних виробництв хімічної промисловості

№	Виробництво	Шкідливі речовини
1	2	3
1	Азотної кислоти	NO, NO ₂ , NH ₃
2	Сірчаної кислоти: нітрозної контактної	NO, NO ₂ , SO ₂ , H ₂ SO ₄ , Fe ₂ O ₃ (пил) SO ₂ , H ₂ SO ₄ , Fe ₂ O ₃ (пил)
3	Хлоридної кислоти	HCl, Cl ₂
4	Сульфамінової кислоти	NH ₃ , NH(SO ₃ NH ₄) ₂ , H ₂ SO ₄
5	Фосфорної кислоти	P ₂ O ₅ , H ₃ PO ₄ , HF, Ca ₃ F(PO ₄) ₃ (пил)
6	Оцтової кислоти	CH ₃ CHO, CH ₃ CO ₂ H
7	Складних добрив	NO, NO ₂ , NH ₃ , HF, H ₂ SO ₄ , P ₂ O ₅ , HNO ₃ , пил добрив

1	2	3
8	Карбаміду	NH_3 , CO , $(\text{NH}_3)_2\text{CO}$ (пил)
9	Аміачної селітри	CO , NH_3 , HNO_3 , NH_4NO_3 (пил)
10	Суперфосфату	HF , H_2SO_4 , пил суперфосфату
11	Хлорного вапна	Cl_2 , CaCl_2 (пил)
12	Ацетона	CH_3CHO , $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$
13	Аміака	NH_3 , CO
14	Соди кальцинованої	NH_3 , CO_2 , NO_x , SO_2 , H_2S , пил
15	Двоокису титана	TiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , пил ільменіту
16	Ацетилена	CH_2 , сажа
17	Штучних волокон	H_2S , CS_2
18	Мінеральних пігментів	Fe_2O_3 , FeSO_4

Виробництво титан (IV) оксиду. У процесі сушки ільменітового концентрату димові гази, утворені в результаті згоряння природного газу, разом з пилом ільменітового концентрату нагнітаються вентиляторами в батарейні циклони, потім проходять через мокрий скруббер і викидаються в атмосферу. Під час розмелу ільменітового концентрату повітря з домішками пилу із розмельного обладнання нагнітається вентиляторами в циклон, потім проходить через рукавний фільтр і викидається в атмосферу. Після прожарювання гідратованого двоокису титану в прожарювальних печах гази надходять у газоочисну установку яка складається із сатуратора, скрубера Вентурі, аміачного скрубера. Під час розмелу двоокису титану на роликово-маятниковому млину повітря з домішками двоокису титану очищується в рукавному фільтрі.

Виробництво мінеральних добрив

Виробництво аміачної селітри. Очищення газів пов'язане, головним чином, з обробкою сокової пари, яка утворюється на стадії нейтралізації, та газів, що відходять з апаратів киплячого шару, встановлених після стадії

грануляції. У першому випадку система очищення включає абсорбери, які зрошуються розчином аміачної селітри, а також поверхневі конденсатори.

Очищення відхідних газів від пилу аміачної селітри відбувається у трьохсекційному пінному скрубєрі, який зрошується розчином аміачної селітри.

Виробництво карбаміду. В схемі синтезу карбаміду із аміаку і діоксиду вуглецю передбачено попередню очистку технологічних газів у фільтрах (аміаку) і відділення вологи з діоксиду вуглецю. В інертних газах після конденсаторів міститься значна кількість аміаку, діоксиду вуглецю і пари води, тому для очищення газів устанавлюють пінний абсорбер. Апарат цього ж типу використовують і для очищення повітря від аміаку і вологи після кристалізації. Крім зазначених способів очищення газів, що відходять в цехах виробництва карбаміду застосовують промивання газових потоків маточним розчином сірчаної кислоти в сатураторах.

Виробництво суперфосфату. В абсорбційному відділенні суперфосфатного виробництва гази очищають від фтористих сполук з отриманням кремнефтористоводневої кислоти. Абсорбційна система відділення складається з механічного абсорбера, промивної башти, зрошуваних розведеною кислотою, і бризковловлювача; на деяких суперфосфатних заводах вона являє собою каскад з трьох послідовно з'єднаних двовалкових абсорберів. При виробництві гранульованого суперфосфату пилогазові викиди формуються на стадіях сушки продукту (до 17% фтору від його вмісту в суперфосфаті, до 8-10 г/м³ суперфосфатного пилу і вологи), а також просіювання, охолодження і транспортування. Після цих стадій в циклонах гази проходять сухе очищення для видалення грубодисперсних фракцій пилу, а потім – мокру очистку для очищення від фтористих сполук і решти пилу. Від сушильного барабана запилене повітря надходить до батареїного циклону. Очищені від грубодисперсного пилу гази направляються в промивну вежу, в яку також можуть надходити гази, що утворюються в грохотах і елеваторах ретуру. Після промивної башти гази

надходять на двоступеневу систему абсорбції – зрошувальний скруббер першого ступеня являє собою порожнисту колону; скруббер другого ступеня зрошується 1% -ю суспензією вапняного молока.

Виробництво хлориду калію. Відхідні гази виробництва утворюються на стадії сушіння готового продукту. При сушінні KCl до вмісту в ньому вологи 0,5 - 1,0% в газах накопичуються водяна пара і пил. При температурі 400-600 °C хлориди натрію і калію, які містяться в газах, гідролізуються до HCl. Також у газовому потоці містяться компоненти, отримані при спалюванні мазуту (SO_2 , CO, CO_2 , NO_x). Пилова фракція газового потоку складається з хлоридів і сульфатів K, Na, Mg, Ca, а також оксидів кремнію, заліза, вищих аліфатичних амінів і т. д. Пилоочищення газів, що відходять, здійснюють за одно- або двоступеневою схемою в циклонах, а очищення від SO_2 і HCl і доочистку від пилу – в пінному апараті, який зрошується содовим розчином. Замість пінних апаратів можуть використовуватись скрубери Вентурі.

Виробництво амофосу. Відхідні гази виробництва амофосу містять фтор, аміак і пил амофосу, який потрапляє з грануляційно-сушильних апаратів, дробарок, сортувального обладнання. Аміак і фтор виділяються при сушінні пульпи і вологих гранул, при упарюванні амофосної пульпи. Для уловлювання аміаку і фтору застосовують двоступеневу схему очищення. На першій стадії використовують абсорбер з рухомою насадкою. Абсорбер другого ступеня, зрошуваний водою або вапняним молоком, служить для вловлювання фтору. Для цього використовують порожнистий абсорбер з форсунками евольвентного типу. При обробленні в абсорберах газів, що відходять, відбувається кристалізація амофосу і осадження кремнегелю на внутрішніх поверхнях газоочисної апаратури. Так, навіть у порожнистих абсорберах із трьома ярусами форсунок останні забиваються вже через 1-2 доби, незважаючи на високу густину зрошення. Тому виникає необхідність розроблення і впровадження високоінтенсивного газоочисного обладнання [251 - 254].

Аналіз стану систем пилогазоочищення свідчить про те, що більшість технологічних схем очистки газових викидів підприємств хімічної промисловості укомплектовані порожнистими форсунковими, механічними, насадковими (зі стаціонарною насадкою) і тарілчастими апаратами, циклонами, електричними та рукавними фільтрами.

Порожнисті форсункові скрубери прості у виготовленні, проте ефективність очищення в них не перевищує 60%. Апарати, що використовують механічну енергію, мають складну конструкцію за рахунок наявності рухомого робочого органу. Ефективність очистки в них також невелика, тоді як витрати енергії на привід робочого органу значні. Насадкові і тарілчасті апарати часто простоюють через забивання насадки і отворів тарілок твердими домішками та осадами, мають великий гідравлічний опір. Рукавні фільтри та електрофільтри мають порівняно високу ефективність, однак займають великі виробничі площі, споживають значну кількість електроенергії, а також складні у виготовленні, монтажі та експлуатації.

Це призводить до застосування багатоступневих систем газоочищення, які складні у виготовленні та експлуатації. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування вискоелективного газоочисного обладнання високої пропускну здатності, яке може здійснювати комплексне очищення газів від пилу та газоподібних домішок [255-257].

Звідси випливають такі вимоги підприємств-споживачів до створення пилогазоочисного обладнання: висока ефективність; низька енергоємність; надійність в експлуатації; багатофункціональність; простота виготовлення і ремонту з використанням власної ремонтно-механічної бази; низька вартість.

При формулюванні завдань оцінюють також стан підприємств-виробників газоочисного обладнання. В Україні існує ряд підприємств з випуску пилогазоочисного обладнання, наприклад: Бердичівський машинобудівний завод «Прогрес», який випускає електрофільтри та рукавні фільтри; Запорізький завод газоочисного обладнання поставляє електрофільтри, циклони, скрубери, труби Вентурі, краплеловлювачі.

Вимоги підприємств-виробників до створення пилогазоочисного обладнання: технологічність конструкції; потреба в масовому виробництві; використання вітчизняних матеріалів, деталей і вузлів; високий технічний рівень обладнання, що дозволяє забезпечити потреби внутрішнього ринку і випускати пилогазоочисні апарати на експорт; патентна захищеність.

Виходячи з перерахованих вище вимог підприємств-споживачів і підприємств-виробників формулюється такий блок завдань щодо дослідження та вибору газоочисного обладнання:

- високий технічний рівень розробок, що включає високу ефективність, низьку енерго- і матеріалоемність, надійність в експлуатації, технологічність і низьку вартість виготовлення, патентну захищеність;

- багатофункціональність, тобто можливість використання обладнання для комплексного очищення газів від пилу і газових домішок, різних за фізико-хімічними властивостями, з отриманням розчинів і шламів заданої концентрації;

- випуск конкурентоспроможного обладнання.

4.2.2 Прийняття рішень

Створення методології вибору високоефективних масообмінних і пилоуловлювальних апаратів базується на аналізі сучасних конструкцій апаратів з точки зору витрат енергії на проведення процесів, інтенсивності їх роботи, матеріалоемності, технологічності. Початку виділяються загальні позитивні ознаки, властиві групам апаратів, і вибираються конструкції, де ці ознаки найбільш сконцентровані. На стадії апаратурного оформлення початковою умовою рішення оптимізаційної задачі за параметрами інтенсивності є мінімізація питомих енергетичних витрат на транспортування газової та рідкої фаз. За результатами аналізу позитивних і негативних ознак вибраних аналогів здійснюють вибір газоочисного обладнання, прогнозують створення масообмінних і пилоуловлюючих

апаратів, що використовують закономірності взаємодії вихрових, пульсуючих, швидкісних потоків. Прогнозні рішення повинні враховувати вимоги підприємств-споживачів і підприємств-виробників газоочисного обладнання. При цьому необхідно також враховувати можливість модернізації існуючого обладнання.

Аналіз позитивних ознак пилогазоочисного обладнання дозволив виділити конструкції пилогазоочисного обладнання, яке використовує позитивні ознаки різних типів апаратів – це апарати з РРН та апарати з ПТВО.

В апаратах з РРН [258-269], при певному просторовому розташуванні насадочних елементів реалізується режим одночасного вихороутворення, що призводить до зростання сумарної потужності вихорів і виконання ними більшого обсягу роботи з подрібнення рідини на дрібні краплі. Регулярне розташування елементів насадки на гнучких струнах або твердих стрижнях дозволяє організовувати вихрові зони з визначеним заданим кроком як у поздовжньому, так і в поперечних перерізах, забезпечує рівномірний розподіл потоків і однорідність газорідного шару. В результаті цього зростає поверхня контакту фаз і відбувається значна інтенсифікація проведення процесів пилогазоочищення. За рахунок невеликого питомого об'єму насадки апарати з регулярною рухомою насадкою мають низький гідравлічний опір.

В апаратах з провальними тарілками великих отворів досягаються високі швидкості газу, що призводить до збільшення одиничної потужності апаратів, знижує металоємність, сприяє підвищенню ефективності пилогазоочищення. В апаратах даного типу можна проводити комплексну очистку газів, що відходять, від пилу та забруднюючих речовин. Апарати з ПТВО добре зарекомендували себе при обробці забруднених газів і рідин, з яких випадають інкрустації, в процесах мокрого пиловловлення [227, 270-279]. Пилогазоочисне обладнання з провальними тарілками великих отворів має наступні переваги: простота й надійність конструкції, розвинута поверхня

контакту фаз, високий гідродинамічний ККД; велика одинична потужність; стійка робота при наявності твердих часток, що мають високі адгезійні властивості та здатних утворювати агломерації, тривалий термін експлуатації; широкий діапазон стійкої роботи при різних навантаженнях по газовій та рідинній фазі, висока ефективність. Ще однією перевагою є можливість модернізації існуючого обладнання шляхом заміни традиційних контактних елементів на ПТВО [280].

Порівняльна характеристика газоочисних апаратів наведена в табл.4.6 [227].

Таблиця 4.6 – Основні показники високоінтенсивних схем пилоочищення

№ з/п	Найменування параметру	Од. вимірюв.	Показники			
			Пінний апарат	Апарат зі зваженою насадкою	Апарат з РРН	Апарат з ПТВО ($d_0=0,06$ м)
1	Об'єм газу на пилоочищення	тис.м ³ /год	20	40	40	40
2	Швидкість газу	м/с	2,5	4,5	4,5	4,5
3	Вміст твердих частинок	10 ⁻³ кг/м ³	1,5	2,5	2,5	2,5
4	Питоме зрошення	10 ⁻³ м ³ /м ³	0,8	0,8	0,8	0,8
5	Гідравлічний опір	Па	800	1000	400	800
6	Висота газорідинного шару	м	0,1	0,34	0,8	0,4
7	Ефективність пиловловлення	%	90	92	96	96

Таким чином, виходячи з вимог підприємств-споживачів та ґрунтуючись на позитивних ознаках конструкцій високоінтенсивного газоочисного обладнання, вибрані апарати з регулярною рухомою насадкою та з провальними тарілками великих отворів.

Висновки до розділу 4

З метою підвищення рівня екологічної безпеки при впливі відхідних газів промислових підприємств на атмосферне повітря розглянуто шляхи оптимізації газоочисних процесів як складової великої системи «Екологічна безпека». При цьому процес комплексного очищення промислових викидів може бути формалізований як система взаємопов'язаних фізико-хімічних процесів, які одночасно протікають в потоці багатофазного багатокомпонентного суцільного середовища.

Виходячи з аналізу функціональної залежності ефективності очищення від кінетичних характеристик, механізму формування міжфазної поверхні, чинників розвитку рушійних сил і конструктивних особливостей апаратурного оформлення показано можливість оптимізації газоочисних процесів за величиною інтенсивності, як інтегральної характеристики ефективності здійснюваних процесів для кожної забруднюючої речовини.

Використання принципів структурної оптимізації дало можливість визначити фактори впливу на складові інтенсифікації процесів газоочищення та сформулювати задачу оптимізації за режимними параметрами проведення процесу.

Запропоновано систему класифікації апаратів мокрого очищення, за способом впливу на потоки, що контактують, та створенням високотурбулентного гідродинамічного режиму і розвинутої поверхні контакту фаз як факторів інтенсифікації процесу газочищення.

На основі системного аналізу істотних ознак показано, показано, що застосування закономірностей вихрового руху при роботі контактних пристроїв газоочисних апаратів дозволяє проводити з високою ефективністю пилогазоочищення відхідних газів.

Розроблено принципи вибору абсорбенту як фактора впливу на величину рушійної сили та коефіцієнт масопередачі з урахуванням екологічних та економічних аспектів.

Розроблено математичну модель процесу хемосорбції, яка з використанням положень плівкової теорії дозволила отримати розрахункові формули для визначення концентрації абсорбенту за висотою контактної зони та для визначення фактору інтенсифікації процесу абсорбції.

Розроблено методологію вибору пилогазоочисного обладнання для очищення відхідних газів промислових підприємств, яка враховує вимоги галузей споживачів і підприємств-виробників газоочисного обладнання, а також сучасний рівень наукових розробок, дозволяє сформулювати блок основних задач та виробити шляхи їх реалізації.

Матеріали розділу опубліковані в працях [217, 239, 240, 244, 250, 252, 254- 257, 279, 280]

РОЗДІЛ 5

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОІНТЕНСИВНОГО ГАЗООЧИСНОГО ОБЛАДНАННЯ

5.1 Дослідження гідродинамічних характеристик апаратів

При розгляді шляхів оптимізації газоочисних процесів встановлено, що гідродинамічний режим роботи апарата впливає на інтенсивність процесів газопилоочищення та багато в чому визначає витрату механічної енергії на проведення процесу. Для вибраних конструкцій апаратів при вивченні гідродинамічних характеристик досліджували вплив режимних параметрів на формування поверхні контакту фаз, як складової інтенсифікації процесів газоочищення, та на гідравлічний опір, як характеристику енергетичних витрат на проведення процесу.

5.1.1 Гідродинаміка апаратів з провальними тарілкам великих отворів

Дослідження гідродинамічних характеристик апарата з провальними тарілкам великих отворів проводилися у широкому діапазоні режимних параметрів [281]:

- швидкість повітря (w_2) в колоні при проведенні дослідів змінювали в межах 0,5 - 4 м/с;

- щільність зрошення (L) складала 10 - 20 м³/м²·год.

Проведені дослідження гідродинаміки апарата із провальними тарілками з отворами 0,15 м дозволили виявити чотири режими роботи колони (рис. 5.1) [282-286].

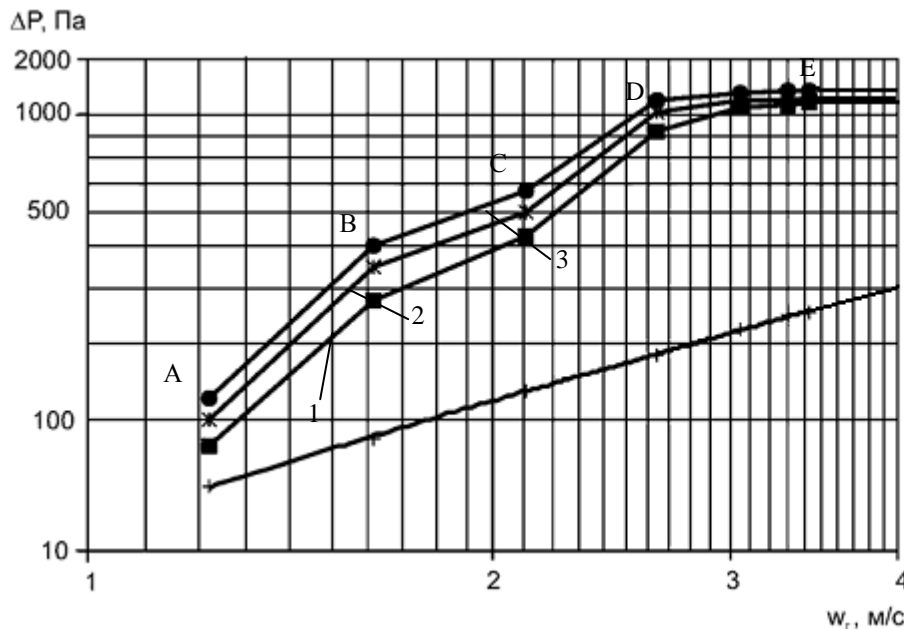


Рисунок 5.1 – Залежність гідравлічного опору від швидкості газу в апараті з тарілкою 0,15 м ($\tau = 23,5\%$) при різних значеннях щільності зрошення L , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20; 4 – суха тарілка

Традиційний для пінних апаратів режим – барботажний (нерівномірний), в апараті з ПТВО не спостерігається (рис. 5.1, АВ). При роботі тарілки з отвором 0,15 м до швидкості газу $w_2 = 1,2$ м/с відбувається суцільний провал рідини. Подальший ріст швидкості газу (1,2 – 1,6 м/с) супроводжується накопиченням рідини на поверхні тарілки (рис. 5.1, АВ), інтенсивність провалу рідини зменшується.

II режим – пінний (рис. 5.1, ВС), на тарілці утворюється шар піни. Пінний режим в апараті з ПТВО існує у вузькому діапазоні швидкостей газової фази 1,6 - 2,1 м/с. Цьому режиму притаманні яскраво виражені повздовжні коливання пінного шару з великою амплітудою. При цьому практично відсутнє бризковіднесення.

III режим - інверсія фаз (рис.5.1, CD), спостерігається проходження газових струменів через шар рідини. В цьому режимі відбувається різкий ріст гідравлічного опору, кількості утримуваної рідини, висоти газорідинного шару та поверхні контакту фаз. При цьому знижується середній газовміст шару, а інтенсивність провалу рідини різко падає. Спостерігається інтенсивне

бризковинесення та повздовжні коливання газорідного шару з великою амплітудою. Рідина стікає пульсуючим струменем одночасно через всі отвори. Межа існування цього режиму – при швидкості газу 2,1 - 2,5 м/с.

IV режим – вторинного піноутворення (рис. 5.1, DE). Підвищення швидкості газу понад 2,5 м/с призводить до виникнення розвиненої вихрової взаємодії фаз. Газорідна суміш виглядає як вируюча піна, але одночасно спостерігається помітна стабілізація шару та зниження пульсацій. Також спостерігається рівномірний вміст газу та рідини по всьому поперечному перерізу апарата, бризки практично відсутні.

При збільшенні швидкості газу понад 3,5 м спостерігається інтенсивне бризковинесення рідини з поверхні газорідного шару. Бризковинесення супроводжується зміною структури газорідного шару, при якому руйнування газових пустот, подрібнення агрегатів рідини являється джерелами генерації крапель, які відносяться газовим потоком.

Таким чином, умови інтенсифікації процесів очищення багатоконпонентних потоків пов'язані з підтриманням швидкісного режиму взаємодії газу і рідини в зоні активного піноутворення. Водночас, згідно з візуальними спостереженнями та проведеною відео- та фотозйомкою, при швидкості газу більше 3,5 м/с аерозольне винесення стає стійким процесом вже для крапель з умовним діаметром більше 0,5-1,5 мм. Враховуючи, що грубодисперсні краплі складають основну частку бризковіднесення, його вплив здатен викликати помітне відхилення в кількості утримуваної рідини в робочому об'ємі апарата, що призводить до втрати абсорбента, та в значеннях гідравлічного опору. Все вищенаведене ставить задачу забезпечення ефективної сепарації крапель рідини, які відносяться з високошвидкісним потоком газу.

Проведена фото- та відеозйомка дозволяє візуально оцінити структуру газорідного шару в залежності від швидкості газу при різних гідродинамічних режимах роботи апарата з ПТВО (рис.5.2).

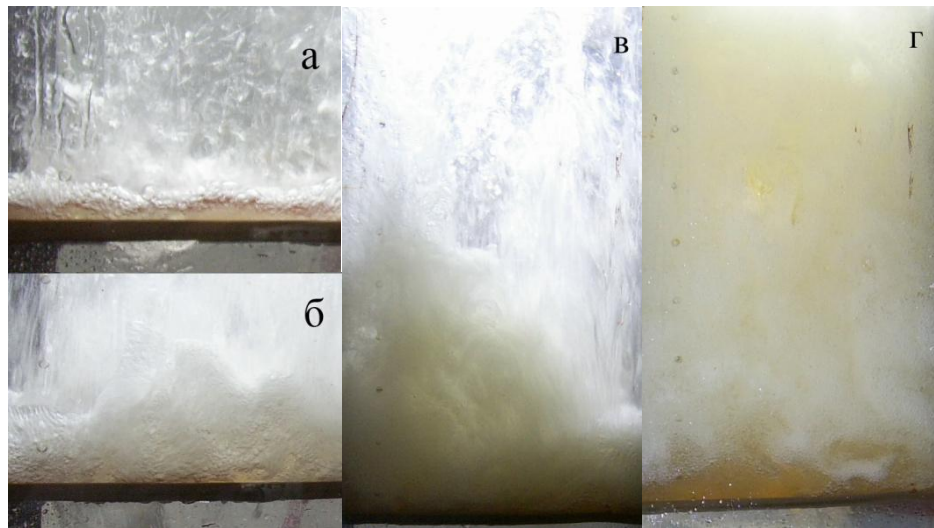


Рисунок 5.2 – Структура газорідинного шару апарата з тарілкою 0,15 м в різних гідродинамічних режимах: а – режим провалу рідини ($w_2 = 1,0 - 1,2$ м/с); б – пінний режим ($w_2 = 1,6 - 2,1$ м/с); в – режим інверсії фаз ($w_2 = 2,1 - 2,5$ м/с); г – режим вторинного піноутворення ($w_2 = 2,5 - 3,5$ м/с)

Відмінною особливістю режиму вторинного піноутворення є виникнення тороїдального вихору на краях отворів провальної тарілки. При відриві від краю такий вихор розпадається внаслідок нестійкої форми з утворенням дрібних вихорів. Провал рідини при цьому припиняється. Утворення і відрив вихорів при витоку газу через групу великих отворів відбувається одночасно, тобто в синфазному режимі. Сумарна робота отворів в цьому випадку значно більша, ніж при вісесиметричному проходженні газу та рідини, що має місце на тарілках з дрібними отворами. Поверхня розділу фаз на вході в контактний пристрій має вигляд бульбашки, причому стікання рідини відбувається через центральну частину отвору у вигляді тонкого пульсуючого струменя (рис. 5.3).

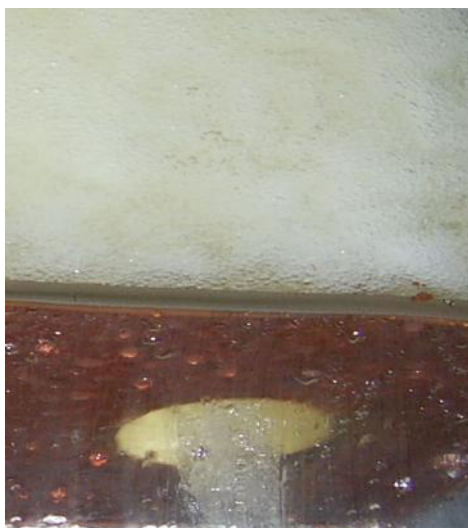


Рисунок 5.3 – Злив рідини через центральну частину отворів тарілки

Основні стадії формування бульбашки представлені на рис. 5.4. Сферична поверхня бульбашки, яка утворюється у великому отворі, швидко втрачає стійкість під дією зовнішніх збурень. Бульбашка відривається від міжфазної поверхні і відбувається пульсуючий провал рідини. Таким чином, газорідинний шар на ПТВО рівномірно пронизується вихорами газу і рідини по всьому перетину. Рідина в шарі представлена краплями, плівками, струменями, які постійно піддаються дії газових вихорів. При цьому відбувається то подрібнення, то злиття структурних елементів рідкої фази.

В процесі подрібнення бульбашок і утворення вихрових потоків відбувається передача коливального імпульсу на полотно тарілки. Пульсаційне коливання полотна тарілки попереджує заростання отворів тарілки, що призводить до стабільної роботи апарата на протязі тривалого часу при комплексному очищенні відхідних газів, хемосорбції з утворенням осадів та гелів в процесів реакції, дозволяє ефективно працювати з трьохфазними системами, використовувати в якості абсорбента суспензії [115].

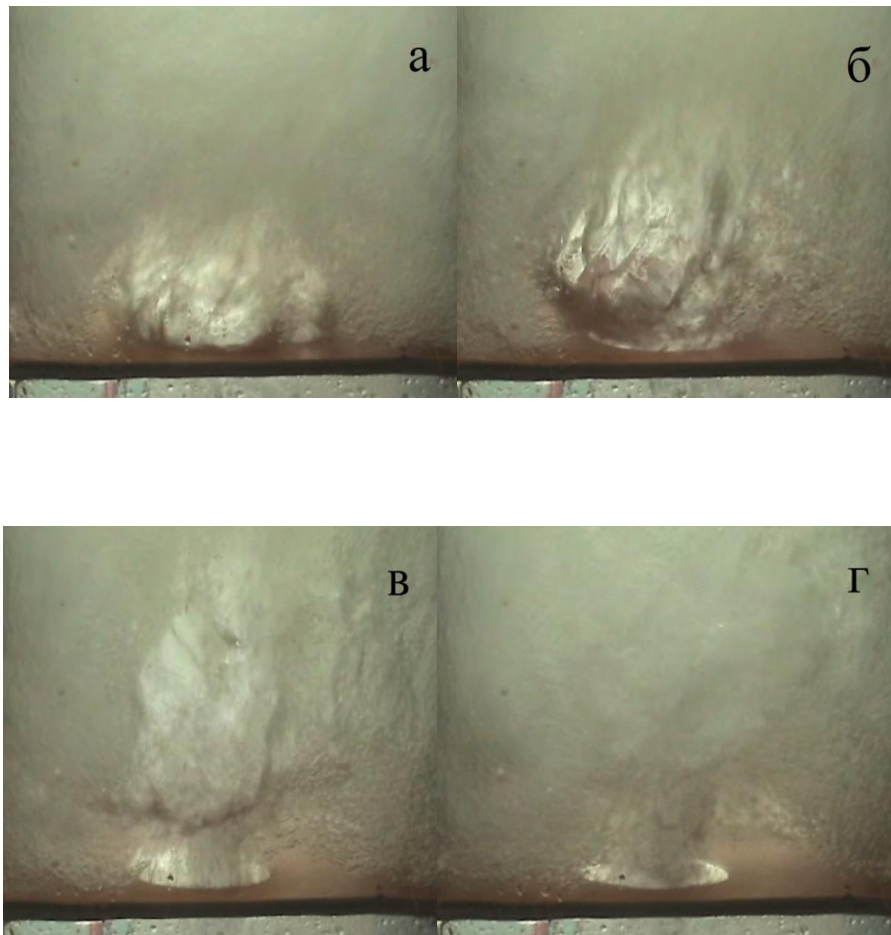


Рисунок 5.4 – Утворення бульбашки на ПТВО:

а – початок формування бульбашки; б – зростання бульбашки; в – відрив бульбашки від отвору тарілки з утворенням тороїдального вихору; г – повне руйнування бульбашки з утворенням вихорів та дрібних бульбашок

У режимі вторинного піноутворення спостерігається утворення високих газорідинних шарів, що дає можливість працювати при високих швидкостях газу без факельних проривів і практично без бризковіднесення. При цьому утворюється розвинута поверхня контакту фаз, що призводить до інтенсифікації процесів пило- та газоочищення.

Переваги режиму вторинного піноутворення чітко виявляються при порівнянні графічних залежностей гідравлічного опору (рис. 5.1), висоти шару в апараті (за результатами фото- та відеозйомки) (рис. 5.2) та кількості утримуваної на тарілці рідини (рис. 5.5) від лінійної швидкості газу в колоні.

З підвищенням w_2 від 2,5 до 3,5 м/с висота газорідинного шару зростає

в 4 рази (до 0,6 м), що дозволяє створити розвинену поверхню контакту фаз та значно підвищити ефективність газоочищення у порівнянні з типовими тарілчастими пінними апаратами. Час виходу на цей режим при різній щільності зрошення становив не більше 3 хв.

При великому вільному перетині полотна тарілки важко досягти високого значення кількості утримуваної рідини (КУР), необхідної для ефективної роботи газоочисного апарату. Достатня величина КУР забезпечує рівномірність укриття тарілки шаром рідини, виключаючи оголення полотна тарілки внаслідок коливань пінного шару та сприяє виникненню високих шарів піни, і, відповідно розвиненої поверхні контакту фаз, що призводить до інтенсифікації процесів газоочищення. Аналіз експериментальних даних (рис. 5.5) показав, що збільшення вільного перетину полотна тарілки з ПТВО доцільно до значення 24%.

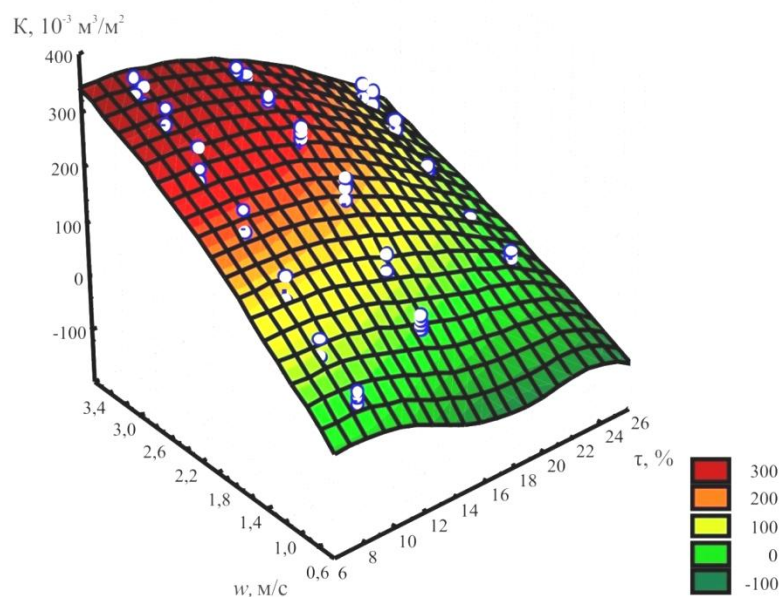


Рисунок 5.5 – Залежність КУР від вільного перетину тарілки і швидкості газу в апараті

При низькій щільності зрошення можливе часткове або повне оголення полотна тарілки внаслідок коливань пінного шару. Це супроводжується провалом рідини. Як видно з рис. 5.5, підвищення швидкості газу в апараті

призводить до підтримки стабільного об'єму рідини на полотні тарілки, що забезпечує ефективну роботу апарата. Зі збільшенням навантаження по рідині властивості режиму вторинного піноутворення проявляються більш виразно.

Висота газорідного шару H буде основною характеристикою поверхні контакту фаз в апараті і, таким чином, фактором досягнення високої ефективності газоочищення. На висоту шару впливають наступні фактори – щільність зрошення, швидкість газу в апараті та вільний перетин полотна тарілки. З метою вибору оптимальних конструктивних і режимних параметрів проведення процесу газоочищення для визначення висоти газорідного шару проведемо математичне моделювання.

На процес газоочищення впливають наступні конструктивні та режимні параметри, наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 - Фактори, що впливають на процес газоочищення та рівні їх варіювання

Позначення факторів	Змінний фактор	Інтервал варіювання	Рівні варіювання		
			-1	0	+1
<i>Конструктивні фактори</i>					
X_1	Вільний перетин полотна тарілки, τ , %	3	9	18	27
<i>Режимні фактори</i>					
X_2	Щільність зрошення полотна тарілки, $L, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	1	10	15	20
X_3	Швидкість газу в апараті, $w_2, \text{м/с}$	0,1	0,5	2	3,5
X_4	Кількість утримуваної рідини в апараті під час його роботи, $K, \text{м}^3/\text{м}^2$.	5	0	85	170
X_5	Висота шару піни, $H, \text{м}$	0,05	0	0,3	0,6

Пошук залежності між факторами проводимо з використанням регресійного аналізу [287, 288].

Оскільки при проведенні експерименту в кожному конкретному досліді була можливість задавати будь-яке значення для факторів L , w і τ , то їх відносимо до групи контрольованих і керованих. Тоді як фактори H и K слід віднести до групи контрольованих і некерованих, оскільки задавати їхнє певне значення неможливо.

Розділимо змінні на дві групи: незалежні, керовані змінні (предиктори) і залежні (відгуки) (рис. 5.6).

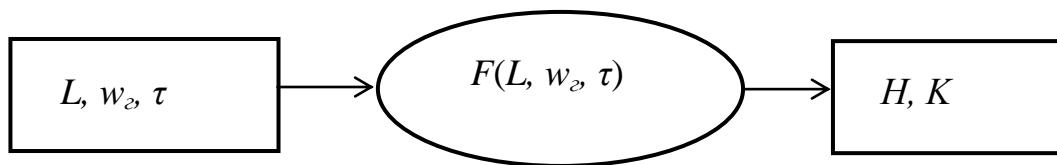


Рисунок 5.6 – Схема зв'язку незалежних і залежних змінних

Положення факторів (L , w , τ) і відгуків (H , K) при проведенні експерименту представлено на рис. 5.7.

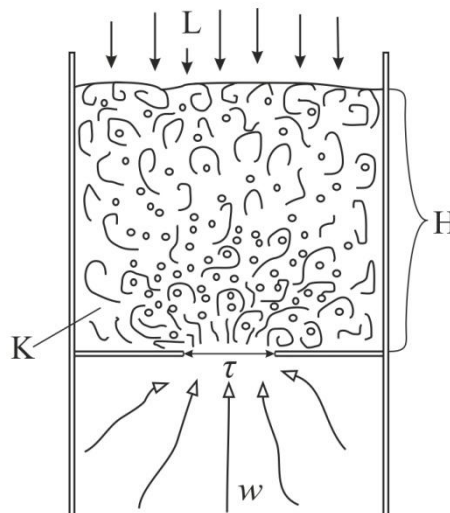


Рисунок 5.7 – Положення предикторів і відгуків при проведенні експерименту

Побудову регресійної залежності будемо здійснювати, виходячи з припущення про поліноміальну залежність між відгуками й предикторами.

В результаті отримано рівняння регресії для розрахунку висоти шару піни на ПТВО [289]:

$$H = -189,72 + 13,54L - 0,399\tau^2 - 27,37\tau - 76,22w^2 + 365,53w + 12,61w \cdot \tau. \quad (5.1)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (5.1) $R^2=0,962$.

Результати експериментальних даних щодо впливу складових рівняння (5.1) – швидкості газу, щільності зрошення та вільного перетину тарілки – на висоту газорідного шару наведені на рис. 5.8, 5.9.

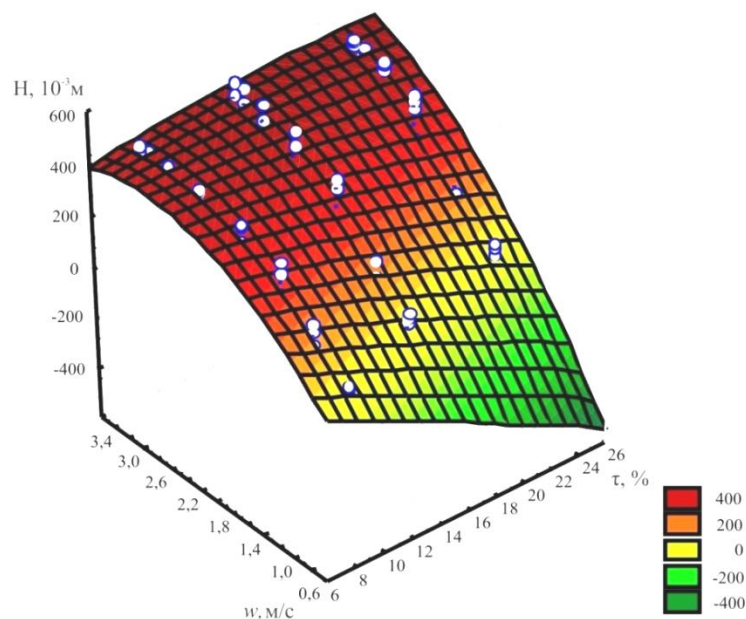


Рисунок 5.8 – Залежність висоти газорідного шару від вільного перетину й швидкості газу в апараті

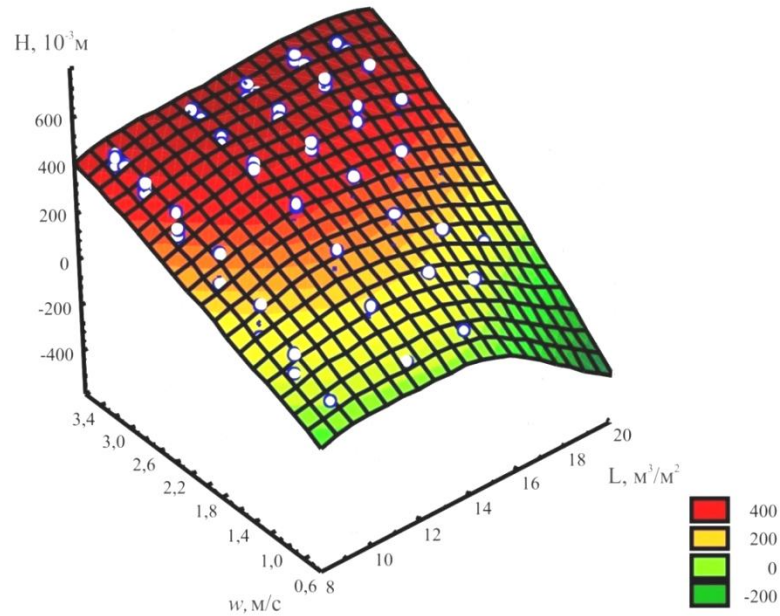


Рисунок 5.9 – Залежність висоти газорідного шару від щільності зрошення й швидкості газу в апараті

При швидкості газу до 1,5 м/с пінний шар на тарілці відсутній. Максимальна висота (0,58 - 0,6 м) пінного шару буде при вільному перетині понад 23% (діаметр отворів 0,15 м) і швидкості газу 3,5 м/с. Пінний шар в апараті з ПТВО може існувати і при невисокій щільності зрошення (8 м³/(м²·год)) для швидкості газу понад 3 м/с, але його висота буде незначною (до 0,38 м). Збільшення швидкості газу і щільності зрошення до 20 м³/(м²·год) дозволяє досягти високого (до 0,6 м), стабільного пінного шару на полотні тарілки, що приводить до росту ефективності очищення викидних газів.

Проведені дослідження гідродинаміки апарату з ПТВО дозволили визначити робочий режим роботи апарату при швидкості газу $w_2 = 2,5 - 3,5$ м/с та щільності зрошення $L = 15 - 20$ м³/(м²·год). Для робочого режиму отримана залежність гідравлічного опору від швидкості газу та щільності зрошення (рис.5.10)

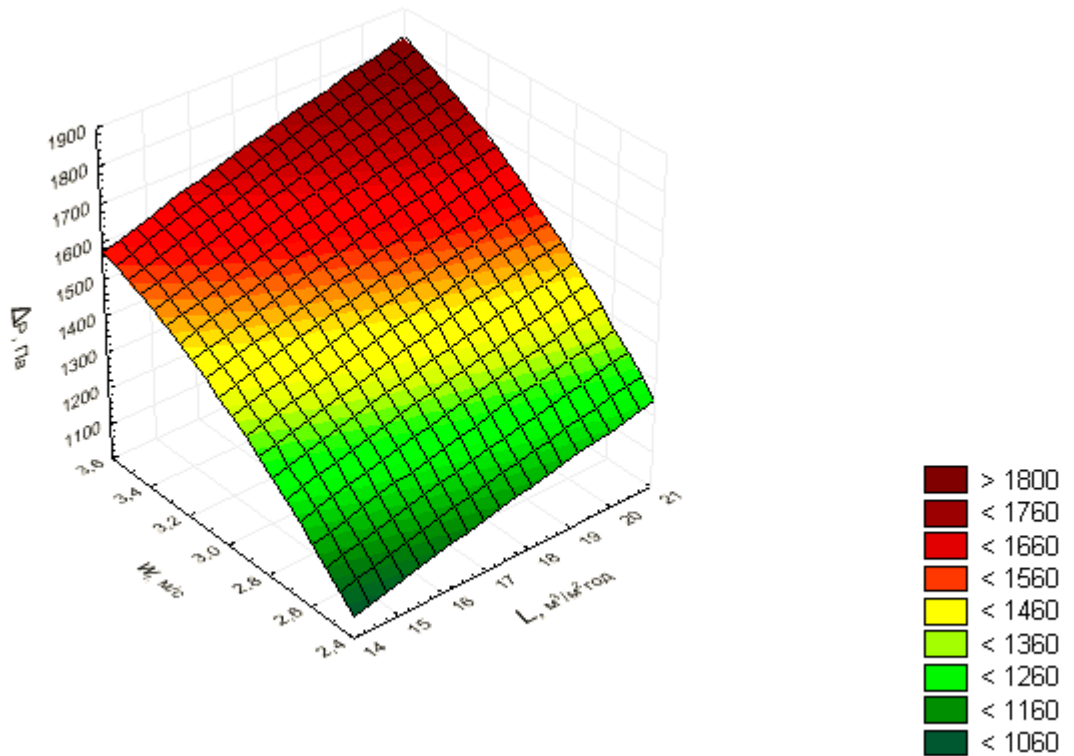


Рисунок 5.10 – Залежність гідравлічного опору від щільності зрошення й швидкості газу в апараті в робочому режимі

У результаті аналізу експериментальних даних отримано рівняння регресії для визначення гідравлічного опору в робочому режимі роботи апарата:

$$\Delta P = -1862,19 - 180w_2^2 - 0,78L^2 + 1401,84w_2 + 34,99L + 7,63w_2L. \quad (5.2)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (5.2) складає $R^2=0,983$.

Гідравлічний опір реакційної зони апарата [289] визначаємо по залежності:

$$\Delta P = n\Delta P_m, \quad (5.3)$$

де n – кількість тарілок у апараті.

Газовміст і питома поверхня контакту фаз є основними гідродинамічними характеристиками двофазних газорідних структур та

факторами впливу на інтенсивність процесу очищення відхідних газів. Результати дослідження газовмісту представлені на рис. 5.11 - 5.12.

Локальний газовміст вимірювали за двома напрямками по горизонталі x та вертикалі z від площини тарілки. Характерною особливістю зміни газовмісту від висоти шару є наявність трьох зон (рис. 5.11). Перша знаходиться в безпосередній близькості від полотна тарілки. Ріст газовмісту на цій ділянці обумовлений різким розширенням струменів, які виходять з отворів тарілки. Друга зона рівномірно-розподіленої газорідинної суміші, яка характеризується інтенсивною пульсацією газорідинного потоку. Третя зона характеризується рухомою поверхнею газорідинного шару та виникненням окремих бризок.

Проведені дослідження свідчать про рівномірний газовміст по висоті газорідинного шару для всіх точок по горизонталі при досягненні відношення $z/h > 1,2$; де h - висота шару рідини на тарілці, що підтверджує візуальні спостереження за структурою газорідинного шару.

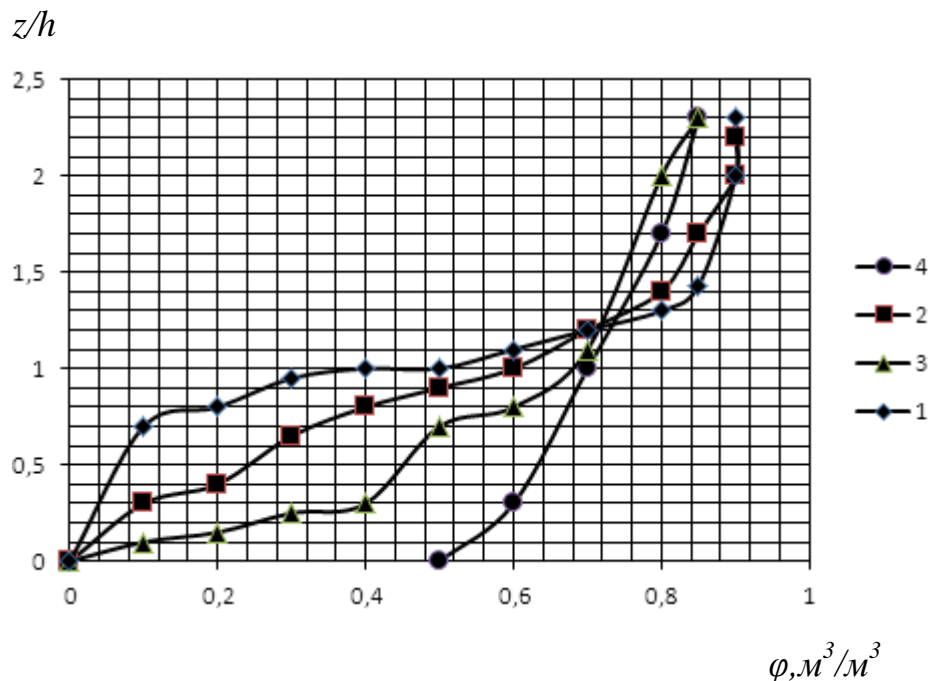


Рисунок 5.11 – Зміна газовмісту по висоті пінного шару для різних перерізів при $d_o=0,15\text{м}$; $w_o=10\text{ м/с}$; $h=0,15\text{м}$; $R=0,25\text{ м}$:

1 – $x/R=0,6$; 2 – $x/R=0,45$; 3– $x/R=0,3$; 4– $x/R=0,15$

Дослідження залежності загального газовмісту від швидкості газу (рис. 5.12) показало практично постійне значення газовмісту при швидкостях газу, які відповідають робочому режиму апарата. Велику роль в цьому відіграють вихори, якими пронизаний весь газорідинний шар на тарілці.

Висота шару «світлої» рідини на тарілці є одним з суттєвих факторів, які впливають на процеси газоочищення в пінних апаратах. Від неї залежить час перебування рідини на тарілці, висота газорідинного шару, величина поверхні контакту фаз. Експериментальні дослідження показали (рис. 5.12), що висота шару «світлої» рідини росте по параболічній залежності від швидкості газу. Коефіцієнт кореляції для лінії тренда $R^2=0,989$. Максимальний рівень шару рідини відповідає швидкості газу 4 м/с.

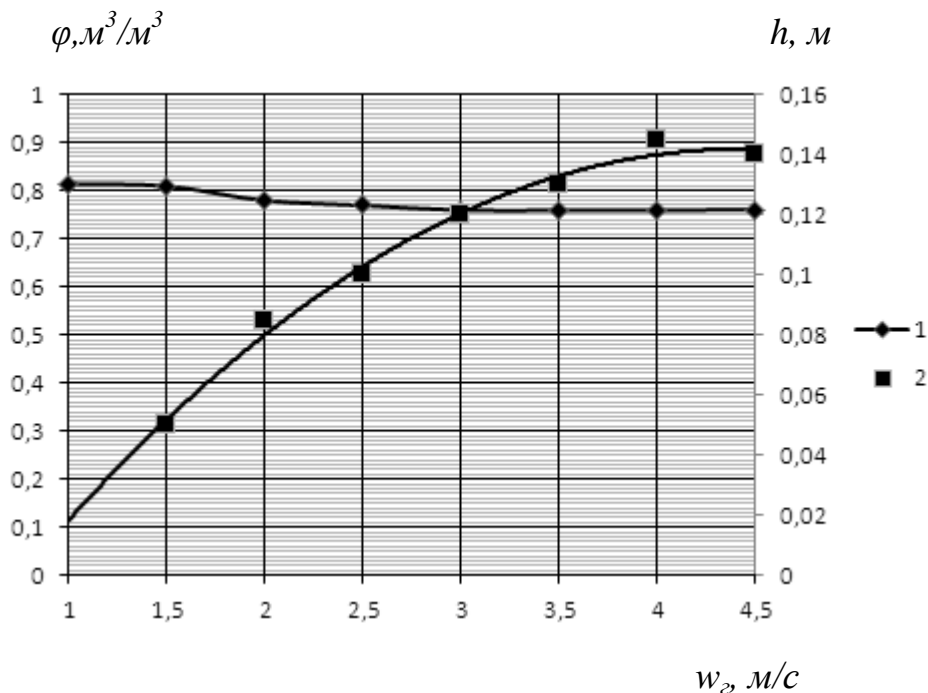


Рисунок 5.12 – Залежність газовмісту пінного шару та висоти шару «світлої» рідини на тарілці від швидкості газу при $d_o=0,15$ м; $L=15$ м³/(м²·год)

Для визначення поверхні контакту фаз на протитечійних тарілках для води та сильно розбавлених розчинів застосовується формула [125]:

$$a \cdot h = 5f \operatorname{Re}_{\text{ум}}^{-0,25} Fr^{0,2} We^{-0,6}, \quad (5.4)$$

де a – питома поверхня контакту фаз, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

$$\operatorname{Re}_{\text{ум}} = \frac{w_z h}{V_p}; \quad Fr = \frac{w_z^2}{gh}; \quad We = \frac{\sigma}{g \rho_p h^2};$$

f - коефіцієнт; при $h > 0,02 \text{ м}$ $f = 1$; при $h \leq 0,02 \text{ м}$ $f = h/0,02$.

Наведені дані свідчать, що питома поверхня контакту фаз більше залежить від швидкості газу, ніж від щільності зрошення. Експериментальні дослідження підтвердили це положення та показали зростання площі поверхні контакту фаз зі швидкістю газу в перерізі апарату (рис. 5.13).

$$A \cdot 10^{-2}, \text{ м}^2/\text{м}^2;$$

$$a \cdot 10^{-2}, \text{ м}^2/\text{м}^3$$

$H, \text{ м}$

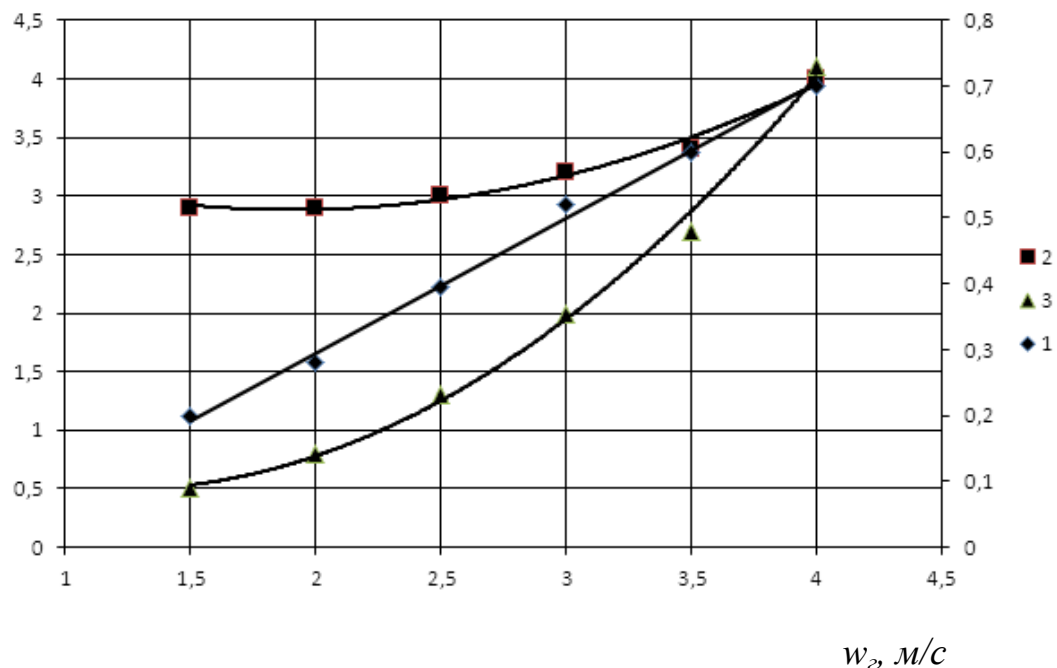


Рисунок 5.13 – Залежність висоти газорідного шару – H , поверхні контакту фаз, віднесеної до площі тарілки – A , поверхні контакту фаз, віднесеної до об'єму газорідного шару – a від швидкості газу при $d_o=0,15 \text{ м}$; $L=15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$. 1– H ; 2– a ; 3 – A

Таким чином, проведені дослідження свідчать про виникнення розвинутої поверхні контакту фаз при роботі апарата з ПТВО в режимі вторинного піноутворення, що сприяє підвищенню інтенсивності процесу газоочищення. Отримані результати залежності характеристик газорідного шару та утворення розвинутої поверхні контакту фаз від швидкості газу та щільності зрошення підтверджують доцільність оптимізації режимних параметрів для інтенсифікації процесів комплексного очищення відхідних газів.

5.1.2 Гідродинаміка апаратів з регулярною рухомою насадкою

Застосування низхідного прямогочергового руху в апараті з РРН дозволяє проводити процес при швидкості руху газу в апараті 12-20 м/с при невисоких енергетичних витратах. Обтікання елементів насадки високошвидкісним газорідним потоком супроводжується вихроутворенням і пульсаційним рухом насадкових тіл. В апаратах з РРН насадкові тіла розміщені рівномірно в об'ємі апарата з кроком по вертикалі та горизонталі, що дозволяє реалізувати режим одночасного вихроутворення. Умовно приймаємо кожен горизонтальний ряд насадкових тіл за одну гіпотетичну тарілку.

З підвищенням швидкості газу спостерігається ріст частоти вібрацій та амплітуди коливань насадкових тіл, що пов'язано зі збільшенням динамічного тиску потоку. Рух і розпад вихорів відбувається між шарами насадки. За рахунок цього відбувається постійний процес коалесценції і подрібнення рідкої фази. Елементи насадки, на яких осідають краплі рідини, по мірі накопичення рідини слугують генераторами крапель. Плівка рідини, що стікає з країв насадкових тіл, під впливом пульсацій потоку і зриву вихорів розривається на струмені і на деякій відстані від насадкового тіла подрібнюється на краплі. Рідина в об'ємі апарата знаходиться переважно у вигляді полідисперсної системи крапель. Краплі рідини в турбулентному

газовому потоці зливаються, знову подрібнюються, перемішуються й обмінюються масами, тобто відбувається постійний процес коалесценції і подрібнення рідкої фази, що призводить до відновлення поверхні контакту фаз і, відповідно, до підвищення ефективності газоочищення. Аналіз даних щодо впливу утворення вихорів на процеси масообміну та пиловловлення показав [108, 260 - 263], що збільшення частоти та амплітуди коливань насадки призводить до росту коефіцієнтів масовіддачі та ефективності пиловловлення.

5.1.2.1 Розрахунок гідравлічного опору апаратів з регулярною рухомою насадкою

Гідравлічний опір апарата з регулярною рухомою насадкою буде дорівнювати:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_p, \quad (5.5)$$

де ΔP_c – гідравлічний опір сухого апарата, Па;

ΔP_p – гідравлічний опір, обумовлений взаємодією газу і рідини, Па.

Виходячи з правила адитивності, розрахунок гідравлічного опору сухого апарата виконаємо поелементно, враховуючи конструкційні елементи контактної зони – насадкові тіла та опорно-розподільні ґрати, на яких закріплені струни з насадковими тілами:

$$\Delta P_c = \Delta P_{gp} + \Delta P_n, \quad (5.6)$$

де ΔP_{gp} – гідравлічний опір опорно-розподільних ґрат, Па;

ΔP_n – гідравлічний опір насадки, Па.

Гідравлічний опір опорно-розподільних ґрат визначаємо за формулою:

$$\Delta P_{zp} = \xi_{zp} \frac{\rho_z w_z^2}{2S_0^2}, \quad (5.7)$$

де ξ_{zp} – коефіцієнт місцевого опору ґрат;

S_0 – вільний перетин опорно-розподільних ґрат, м²/м²;

Для пруткових ґрат при $0,3 \leq S_0 \leq 0,7$ м²/м² відповідно до [290]:

$$\xi_{zp} = (0,54 - 0,23)S_0. \quad (5.8)$$

Гідравлічний опір насадки визначаємо враховуючи коливання струн у високошвидкісному потоці газу:

$$\Delta P_n = \xi_n \frac{H_{к.з.}}{d_e} \frac{\rho_z w_z^2}{2S_e^2}, \quad (5.9)$$

де ξ_n – коефіцієнт місцевого опору насадки, який враховує також пульсаційну складову від взаємодії вихорів;

$$S_e = \frac{S_{an} - n_n S_n}{S_{an}} - \text{питомий вільний перетин апарата, м}^2/\text{м}^2;$$

S_{an} – площа поперечного перерізу апарата, м²;

S_n – площа поверхні елемента насадки, м²;

$d_e = \frac{4\varepsilon}{a}$ – еквівалентний діаметр апарата, м; визначаємо аналогічно

випадку руху рідини через шар твердих тіл;

$$\varepsilon = 1 - \frac{S_n n_n n_{гор}}{V_{an}} - \text{порозність};$$

$n_{гор}$ – кількість горизонтальних рядів насадкових тіл;

$$a = \frac{6(1-\varepsilon)}{\Phi d_n} - \text{питома поверхня насадкових тіл, м}^2/\text{м}^3;$$

Φ – коефіцієнт сферичності, який залежить від форми насадкових тіл.

Для кулястої насадки $\Phi=1$.

Підставляючи в рівняння (5.9) значення $H_{к.з.} = t_{\theta} n_{\text{зоп}}$, одержуємо:

$$\Delta P_n = n_{\text{зоп}} \cdot \xi_n \frac{t_{\theta} \rho_z w_z^2}{d_e 2S_{\theta}^2}, \quad (5.10)$$

де t_{θ} – вертикальний крок розміщення насадкових тіл, м.

Опір газорідинного шару визначається втратою тиску на тертя газу об рідину і рідини об елементи насадки:

$$\Delta P_p = \xi_p \frac{H_{к.з.} \rho_z w_{\text{відн}}^2}{d_e 2},$$

або:

$$\Delta P_p = n_{\text{зоп}} \xi_p \frac{t_{\theta} \rho_z w_{\text{відн}}^2}{d_e 2}, \quad (5.11)$$

де $w_{\text{відн}}$ – відносна швидкість газу, м/с,

$$w_{\text{відн}} = w_z - w_p.$$

Так як зміна швидкості газу при обтіканні елементів насадки по висоті робочої зони апарату носить складний характер, у першому наближенні приймаємо:

$$w_{\text{відн}} \approx k w_z, \quad (5.12)$$

де k – коефіцієнт.

Тоді гідравлічний опір газорідинного шару буде дорівнювати:

$$\Delta P_p = n_{\text{zop}} \xi'_p \frac{t_g \rho_z w_z^2}{d_e 2}, \quad (5.13)$$

де $\xi'_p = k^2 \xi_p$.

Виходячи з правила аддитивності гідравлічний опір контактної зони апарата дорівнює [291]:

$$\Delta P' = n_{\text{zop}} \left[\xi_n \frac{1}{S_g^2} + \xi'_p \right] \frac{t_g \rho_z w_z^2}{d_e 2}. \quad (5.14)$$

За результатами експериментальних досліджень прямотечійних апаратів з регулярною рухомою насадкою приймаємо робочий режим роботи апарата при швидкостях газу $w_z = 12 - 20$ м/с та щільності зрошення $L = 30 - 50$ м³/(м²·год). Для робочого режиму $\xi'_p = 0,015$.

5.1.2.2 Визначення діаметру крапель в робочій зоні апарата з регулярною рухомою насадкою

Візуальні спостереження та відео зйомка за структурою потоків в апараті з РРН показали, що у робочій зоні апарата рідина знаходиться у вигляді плівки на поверхні насадки та у вигляді крапель у вільному обсязі апарата. Наші спостереження та дані робіт [108, 260] показали, що площа поверхні плівки в апаратах з регулярною рухомою насадкою складає 5-10 % від загальної поверхні контакту фаз. Тому основний внесок в ефективність газоочищення вносять краплі рідини.

Рідина, потрапляючи на поверхню насадкового тіла, розтікається по ньому тонкою плівкою, стікає по поверхні у вигляді струменя та під дією газового потоку подрібнюється на краплі. Тонка плівка та утворений від неї струмінь відносяться до самої нестійкої форми течії рідини. Процес подрібнення струменів рідини на краплі в турбулентному потоці газу

визначається відношенням інерційних сил, обумовлених рухом газової (суцільної) фази, до сил поверхневого натягу на границі розділу фаз, що характеризується числом Вебера. Подрібнення крапель відбувається при числі Вебера $We_{кр} > 12$. Утворення крапель в турбулентному потоці газу здійснюється під дією турбулентних пульсацій, масштаб яких дорівнює діаметру краплі. Утворення крапель та одночасне їх осадження на плівку рідини, що знаходиться на насадкових елементах, сприяє оновленню поверхні та створює додаткову міжфазну поверхню. Коливання поверхні крапель під дією високошвидкісного вихорового руху газу призводить до безперервного оновлення поверхні контакту фаз і інтенсифікації процесу газоочищення. Тому для визначення поверхні контакту фаз і розрахунку ефективності процесів газоочищення необхідно знати діаметр крапель рідини.

Відповідно до теорії Колмогорова [292], при ізотропній турбулентності розмір краплі може бути визначений з дисипації енергії. Середній діаметр крапель визначаємо, виходячи з теорії локальної ізотропної турбулентності, на основі якої розвинута загальна теорія подрібнення частинок у турбулентному потоці [293].

При виводі рівняння для розрахунку середнього діаметра крапель приймемо наступні допущення:

- 1) в початковий момент краплі мають сферичну форму;
- 2) розміри крапель у всьому шарі однакові;
- 3) швидкості подрібнення та коалесценції крапель однакові [294].

Довжину хвилі на поверхні струменя визначаємо за залежністю [295]:

$$\lambda_{хв} = \frac{2\pi\sigma}{w_{стр}^2 \rho_p}, \quad (5.15)$$

де $w_{стр}$ – швидкість струменя, м/с.

Навіть при відсутності зовнішнього впливу довжина струменя при вісесиметричній деформації дорівнює [164]:

$$L_{стр} = 8,46 w_{стр} \left(\frac{\rho_p r_{стр}^3}{\sigma} \right)^{1/2}, \quad (5.16)$$

де $r_{стр}$ – радіус струменя, м.

Враховуючи, що $w_{стр} = w_{нл}$ в місці розриву плівки та утворення струменя, при числі Вебера для струменя $We_{стр} \ll 1$ можна прийняти $\lambda_{хв} = L_{стр}$.

Тоді з рівнянь (5.15) та (5.67) отримаємо:

$$d_{стр} = 1,62 \frac{\sigma}{w_{нл}^2 \rho_p} \quad (5.17)$$

Швидкість течії плівки на насадковому елементі визначаємо за формулою [260]:

$$w_{нл} = \frac{1}{\pi} (g \cdot w_z)^{1/3} Re_{кр}^{2/3}, \quad (5.18)$$

де $Re_{кр}$ – число Рейнольдса для крапель:

$$Re_{кр} = \frac{w_{кр} d_{кр}}{w_z}.$$

Потужність струменя, який обтікається газовим потоком визначається у відповідності з [171] при $w_{стр} = w_{нл}$:

$$N_{стр} = \xi_{стр} L_{стр} d_{стр} \rho_z \frac{w_z^2}{2} w_{нл}. \quad (5.19)$$

Енергію дисипації визначимо наступним чином:

$$E_{стр} = \frac{N_{стр}}{V_{стр} \rho_p}, \quad (5.20)$$

де $V_{стр} = \frac{\pi d_{стр}^2}{4} \cdot L_{стр}$ – об'єм струменя.

Пульсаційна швидкість, яка виникає при великих числах Re у ядрі потоку та призводить до розриву струменя на краплі, для випадку ізотропної турбулентності може бути визначена відповідно до закону Колмогорова – Обухова:

$$w' = \sqrt[3]{El_m}, \quad (5.21)$$

де l_m – масштаб турбулентності, порівняний з діаметром струменя, тобто приймаємо $l_m \sim d_{стр}$, м.

Після розв'язання цієї залежності спільно з рівняннями (5.19) та (5.20) одержимо:

$$w' \cong \xi_{стр}^{2/3} \left(\frac{\rho_z}{\rho_p} \right)^{1/3} w_z^{2/3} w_{nl}^{1/3}. \quad (5.22)$$

З рівноваги сил, які діють на утворені краплі діаметром $d_{кр}$

$$\rho_z (w')^2 / 2 = 4\sigma d_{кр}, \quad (5.23)$$

з урахуванням залежності (5.22) отримаємо вираз для визначення діаметра краплі рідини:

$$d_{кр} = \frac{\sigma}{\xi_{стр}^{2/3} \rho_2^{2/3} \rho_p^{1/3} w_2^{4/3} w_{пл}^{2/3}}. \quad (5.24)$$

Враховуючи, що вся рідина в струмені подрібнюється на краплі запишемо вираз (5.24) у такому вигляді:

$$d_{кр} = \xi_{кр}^{-2/3} \frac{\sigma}{\rho_2^{2/3} \rho_p^{1/3} w_2^{4/3} w_{пл}^{2/3}}. \quad (5.25)$$

де $\xi_{кр}$ – коефіцієнт опору краплі.

Отриманий вираз дає можливість визначити середній діаметр краплі рідини в залежності від режимних параметрів проведення процесу, фізичних властивостей контактуючих фаз та урахуванням пульсаційного руху насадкових елементів.

При русі краплі в турбулентному газовому потоці виникає деформація краплі, яка впливає на енергетичну складову процесу.

Оцінку форми краплі проводять за співвідношенням:

$$\Phi = K \left(\frac{w_{кр}^2 d_{кр} \rho_c}{\sigma} \right)^{1/5} = K We^{1/5}. \quad (5.26)$$

Обробкою дослідних даних [159, 296] виявили, що при числі Рейнольдса для крапель $Re_{кр} = \frac{w_{кр} d_{кр}}{\nu_c} > 800$ $K=1,1$; при $100 \leq Re_{кр} \leq 800$ $K = 5,5 Re_{кр}^{-0,25}$; при $Re_{кр} < 100$ деформація крапель незначна, тобто можна прийняти $\Phi = 1$.

З припущення, що збільшення сили опору краплі при деформації її початкової форми відбувається тільки через зміну міделевого перерізу, визначене співвідношення між коефіцієнтами опору сферичних $\xi_{сф}$ і

еліпсоподібних $\xi_{кр}$ частинок рідини:

$$\xi_{кр} = \xi_{сф} \Phi^2. \quad (5.27)$$

Уточнимо цю залежність для кожної області чисел Рейнольдса, використовуючи відомі залежності коефіцієнта опору сферичного тіла від Re і числа форми краплі.

При $100 \leq Re_{кр} \leq 800$ рівняння має вигляд $\xi_{сф} = 13Re_{кр}^{-0,5}$. Тоді при урахуванні $K = 5,5Re_{кр}^{-0,25}$ та рівняння (5.26) залежність (5.27) приводимо до вигляду:

$$\xi_{кр}^I = \frac{393}{Re_{кр}} We^{0,4} = \frac{393}{Re_{кр}^{0,2}} Z^{0,8}. \quad (5.28)$$

При $K = 1,1$ для $Re_{кр} > 800$ отримаємо:

$$\xi_{кр}^{II} = 12 \frac{We^{0,4}}{Re_{кр}^{0,5}} = 12 Re_{кр}^{0,3} Z^{0,8}, \quad (5.29)$$

Поява числа $Z = v_c \left(\frac{\rho_c}{\sigma \cdot d_{кр}} \right)^{1/2}$ в цих рівняннях правомірна, оскільки

дані [159] свідчать, що на коефіцієнт опору деформованої краплі більше ніж число $Re_{кр}$ впливають фізичні властивості дисперсної і суцільної фази.

З цих співвідношень слід зробити висновок, що значне зростання коефіцієнту опору деформованої краплі порівняно з опором сферичної краплі $\xi_{сф}$ може статися навіть при $Re_{кр} = 200-300$. Причому при $Z \approx 3 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$ коефіцієнт опору краплі розраховується тільки за одним рівнянням (5.28).

Рівняння (5.28), (5.29), отримані у вигляді залежності $\xi_{кр}$ від $Re_{кр}$ і Z , дозволяють точно корелювати криві опору деформованої краплі, починаючи з розміру порядку декількох мікрон ($\sim 30-40$ мкм) до 10 мм, тобто охоплюють практично весь можливий діапазон зміни Z і $Re_{кр}$.

Для визначення швидкості руху крапель в турбулентному потоці використаємо залежність [297], підставляючи для визначення опору деформованої краплі залежність (5.29). В результаті одержимо вираз:

$$\frac{dw_{кр}}{dt} = \frac{1}{\tau} (w_2 - w_{кр}) 12 \text{Re}_{кр}^{0,3} Z^{0,8} + g. \quad (5.30)$$

Графічна залежність, отримана в результаті чисельного рішення рівняння (5.30) методом Рунге - Кутти, представлена на рис.5.14.

Тверді частинки в робочій зоні апарата підхоплюються газовим потоком та втягуються у вихровий рух газу. При цьому швидкість частинок близька до швидкості газу. Аналіз залежності, представленої на рисунку 5.14, показує, що різниця в швидкостях газу, і, відповідно, твердих частинок, та крапель рідини складає 4-5 м/с. Цей фактор призводить до підвищення ефективності пиловловлення в апаратах з регулярною рухомою насадкою за рахунок інтенсифікації турбулентно-інерційного механізму осадження частинок [294].

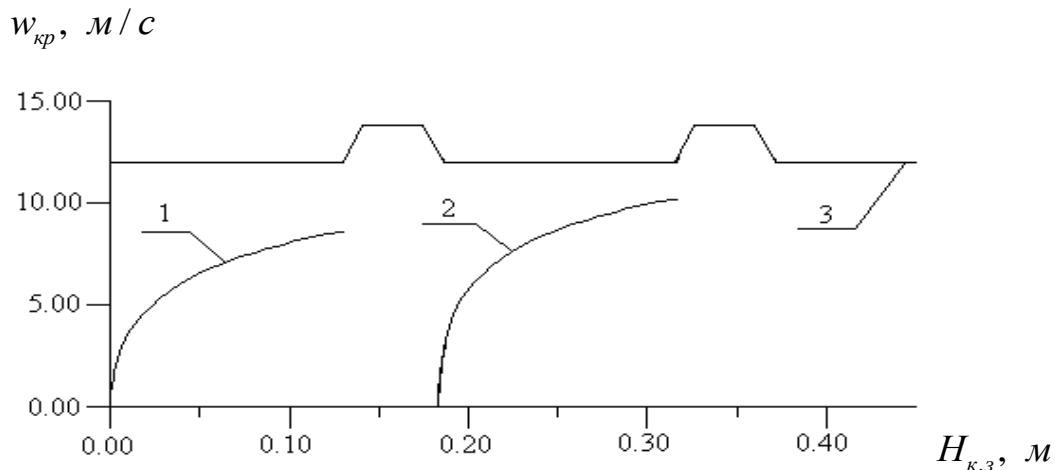


Рисунок 5.14 – Зміна швидкості руху краплі по висоті апарата з регулярною рухомою насадкою:

1 – $d_{кр} = 0,6$ мм; 2 – $d_{кр} = 0,3$ мм; 3 – швидкість газу

5.2 Дослідження процесів абсорбції у високоінтенсивних апаратах

5.2.1 Дослідження процесів абсорбції в рідкій фазі

Дослідження гідродинамічних характеристик апаратів з ПТВО та з РРН показали, що рідина в об'ємі апарата знаходиться у вигляді плівки та крапель рідини. Тому коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі буде визначатись як сумарний в плівці рідини та в краплях:

$$\beta_p = \beta_{p.пл.} + \beta_{p.кр.} \quad (5.31)$$

Внесок кожної складової буде різний для апаратів з ПТВО та РРН. Вивчення структури рідкої фази показало, що поверхня плівки в апараті з ПТВО складає 20 - 25%, в апараті з РРН – 5-10%, тобто основний внесок в ефективність абсорбційного очищення дають краплі рідини.

5.2.1.1 Визначення коефіцієнту масовіддачі при хемосорбції відхідних газів

Для опису кінетики хемосорбційних процесів використовується модель короткочасного контакту [242] при якій розглядається кінетика на початковій ділянці. Ця модель актуальна для опису процесів в високоінтенсивних масообмінних апаратах, які забезпечують високу ефективність процесу перенесення речовини за рахунок малої товщини дифузійного граничного шару. Для важкорозчинних газів швидкість масоперенесення речовини буде лімітуватись швидкістю масовіддачі в рідкій фазі.

Розглянемо процес хімічної абсорбції в плівці рідини. При визначенні коефіцієнту масовіддачі в рідкій фазі допускаємо, що продукти реакції не впливають на дифузію забруднюючого компонента.

Вісь y направлена перпендикулярно до поверхні контакту.

Процес хемосорбції описується дифенціальним рівнянням дифузії:

$$D_p \frac{\partial^2 x_A}{\partial y^2} = \frac{\partial x_A}{\partial t} \quad (5.32)$$

з початковими та граничними умовами:

в початковий момент процесу при $t=0$ концентрація забруднюючої речовини в рідкій фазі буде дорівнювати:

$$x_A = x_{An} ; \quad (5.33)$$

на межі розділу фаз:

$$D_p \left(\frac{\partial x_A}{\partial y} \right)_{y=0} = kx_A ; \quad (5.34)$$

в ядрі рідкої фази:

$$D_p \left(\frac{\partial x_A}{\partial y} \right)_{y=\infty} = 0 , \quad (5.35)$$

де x_A , x_{An} – концентрація забруднюючого компонента в рідкій фазі поточна та початкова відповідно;

k – коефіцієнт швидкості реакції.

Для розв'язання цієї задачі використаємо перетворення Лапласа [298].

При початковій умові (5.33) знайдемо:

$$\bar{x}_A = \frac{x_{An}}{P} + A_1 e^{y \sqrt{\frac{P}{D_p}}} + A_2 e^{-y \sqrt{\frac{P}{D_p}}} , \quad (5.36)$$

де P – параметр перетворення.

З граничної умови (5.35) випливає, що $A_1 = 0$. Тоді:

$$\bar{x}_A = \frac{x_{An}}{P} + A_2 e^{-y \sqrt{\frac{P}{D_p}}}. \quad (5.37)$$

Продиференціюємо вираз (5.37) по y :

$$\frac{d\bar{x}_A}{dy} = -A_2 \sqrt{\frac{P}{D_p}} e^{-y \sqrt{\frac{P}{D_p}}}. \quad (5.38)$$

Підставивши вирази (5.37) та (5.38) в граничну умову (5.34) знаходимо:

$$-A_2 \sqrt{PD_p} = \frac{kx_{An}}{P} + kA_2, \quad (5.39)$$

або:

$$A_2 = -\frac{ax_{An}}{P(\sqrt{P} + a)}, \quad (5.40)$$

де $a = \frac{k}{\sqrt{D_p}}$.

Підставляючи вираз (5.40) в (5.38) визначимо концентрацію компонента a в рідкій фазі:

$$\bar{x}_A = \frac{x_{An}}{P} - \frac{ax_{An}}{P(\sqrt{P} + a)} e^{-y \sqrt{\frac{P}{D_p}}}, \quad (5.41)$$

або в області оригіналу:

$$x_A(y, t) = x_{An} \left[1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{D_p t}} \right) + e^{\frac{a y}{\sqrt{D_p}}} e^{a^2 t} \operatorname{erfc} \left(a\sqrt{t} + \frac{y}{2\sqrt{D_p t}} \right) \right]. \quad (5.42)$$

На границі розділу фаз при $y = 0$

$$x_A(0, t) = x_{An} \left[e^{a^2 t} \operatorname{erfc}(a\sqrt{t}) \right]. \quad (5.43)$$

Із виразу (5.38) визначаємо швидкість процесу хемосорбції:

$$\bar{r} = D_p \left(\frac{dx_A}{dy} \right)_{y=0} = \frac{kx_{An}}{\sqrt{P}(\sqrt{P} + a)}. \quad (5.44)$$

Кількість речовини, перенесеної через одиницю площі поверхні контакту фаз за одиницю часу розраховуємо за виразом:

$$\bar{q} = \frac{\bar{r}}{P} = \frac{kx_{An}}{P\sqrt{P}(\sqrt{P} + a)}. \quad (5.45)$$

Приведемо вираз (5.45) до табличного, для цього розкладемо вираз (5.44) на раціональні дроби:

$$\bar{q} = \frac{kx_{An}}{P\sqrt{P}(\sqrt{P} + a)} = kx_{An} \left[\frac{1}{aP\sqrt{P}} + \frac{1}{a^2\sqrt{P}(\sqrt{P} + a)} - \frac{1}{a^2P} \right]. \quad (5.46)$$

Застосувавши перетворення Лапласа до виразу (5.46), отримаємо:

$$q = kx_{An} \left[\frac{2}{a} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} + \frac{1}{a^2} \left\{ e^{a^2 t} \operatorname{erfc}(a\sqrt{t}) - 1 \right\} \right]. \quad (5.47)$$

Для великих значень t приймаємо:

$$q = kx_{An} \frac{2}{a} \sqrt{\frac{t}{\pi}}. \quad (5.48)$$

Використовуючи вираз (5.48), знайдемо вираз для визначення коефіцієнта масовіддачі в рідкій фазі, який враховує швидкість реакції в рідкій фазі та молекулярної дифузії [299]:

$$\beta_p = \frac{q}{(x_{An} - x_A)t} = \frac{kx_{An}}{(x_{An} - x_A)t} \frac{2}{a} \sqrt{\frac{t}{\pi}} = \frac{kx_{An}}{(x_{An} - x_A)t} \frac{2\sqrt{D_p}}{k} \sqrt{\frac{t}{\pi}}. \quad (5.49)$$

5.2.1.2 Визначення коефіцієнта масовіддачі в краплі рідини

При турбулентному режимі руху газової фази в апаратах створюється високорозвинена поверхня контакту фаз за рахунок подрібнення рідини на краплі. Механізм перенесення речовини в краплі має різні стадії [300]. Упродовж короткого початкового періоду процесу розчинена речовина з досить великою швидкістю переноситься із внутрішнього прикордонного шару до поверхні краплі. Однак швидкість цього процесу стрімко знижується за рахунок збідніння внутрішнього граничного шару розчиненим компонентом внаслідок суттєво більш низької швидкості надходження речовини з ядра потоку. При цьому процес масопередачі виходить на стаціонарний режим. Через певний час у граничний шар починає надходити

потік речовини з ядра фази. У результаті процес знову стає нестационарним. Концентрація в ядрі потоку на початку цього періоду залишається постійною, а наприкінці періоду починає знижуватись. На завершальній стадії процесу механізм перенесення речовини усередині краплі відповідає циркуляційній моделі Кроніга – Брінка.

Модель масопередачі, розроблена Кронігом-Брінком, дійсна для великих значень Pe . Модель обмежена розміром краплі $d_k > 0,5$ мм. У той же час за краплею з $d_k = 0,5 \div 1$ мм при $Re_k > 100$ виникає відривна течія газу, внаслідок чого з'являються інерційні сили, які сприяють деформації і коливанню поверхні краплі, при цьому змінюється початкова сферична форма. В цей же час в її ядрі формуються вихори, що сприяють перемішуванню частинок рідини та пульсаційній зміні турбулентності прикордонного шару рідини. Це обумовлює беззупинну зміну градієнта концентрації в напрямку, ортогональному лінії струму, і безперервний перерозподіл речовини.

Основним недоліком теоретичних моделей масоперенесення всередині краплі та в обтічному її потоці [301, 302] є ігнорування безпосереднього взаємозв'язку між динамікою у краплі рідини й динамікою суцільний фази. Моделі не враховують явища, які відбуваються при високошвидкісному русі газорідинного потоку через контактні пристрої газоочисних апаратів: обертання, подрібнення, коагуляцію, коливання і т.п. Це ставить задачу опису масоперенесення в краплі з урахуванням гідродинамічної картини в апараті.

Для опису масоперенесення всередині краплі при вихровому русі потоку, який її обтікає, приймемо такі припущення:

1. Основний опір масоперенесенню зосереджено в граничному шарі, де при періодичній зміні форми поверхні розділу фаз виникають [303] вихори;

2. Оскільки градієнт швидкості всередині граничного шару, який коливається, не більше градієнтів швидкості в інших ділянках дисперсної

рідкої фази, то приймаємо, що швидкість дисипації енергії в усьому об'ємі рідини одного і того ж порядку;

3. Частота періодичної зміни швидкості рідини в прикордонному шарі, еквівалентна частоті поперечного коливання його вільної поверхні, характеризує інтенсивність пульсаційного підведення до поверхні розділу фаз свіжої порції рідини з ядра дисперсної фази з подальшим відведенням насиченої порції;

4. Перенесення маси в нестійкому прикордонному шарі відбувається за рахунок молекулярної та турбулентної дифузії паралельно. Причому вихори, що виникають у прикордонному шарі, обумовлюють інтенсивність турбулентної дифузії.

Згідно з моделлю М. Х. Кішіневського [304], ефективний коефіцієнт дифузії дорівнює сумі турбулентної D_m і молекулярної D дифузії:

$$D_e = D_m + D. \quad (5.50)$$

Коефіцієнт турбулентної дифузії визначається за формулою [305]:

$$D_m = z^2 \frac{u'}{\lambda}, \quad (5.51)$$

де u' – характерна пульсаційна швидкість, м/с;

z – розмір зони масо перенесення, м;

λ – розмір області затухання турбулентності біля вільної поверхні, м.

Зміна швидкості рідини при переході через граничний шар приблизно дорівнює добутку товщини граничного шару та частоти його коливання $\delta_{z,m} \cdot \omega$. Величина λ виражає глибину проникнення вихрів, що є мірою товщини граничного шару $\delta_{z,m}$, який коливається. Тому $u'/\delta_{z,m}$ виражає частоту коливання граничного шару.

Тоді отримаємо:

$$D_m = z^2 \omega. \quad (5.52)$$

Рівняння конвективної дифузії для стаціонарного процесу запишеться у вигляді:

$$(D + z^2 \omega) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \quad (5.53)$$

при таких граничних умовах:

$$\begin{aligned} C &= C_p \text{ при } z = 0 ; \\ C &= C_{кр} \text{ при } z \rightarrow \infty , \end{aligned} \quad (5.54)$$

де C_p і $C_{кр}$ – концентрації компонента на границі фаз (рівноважна) та в ядрі краплі, відповідно, мг/м³.

Вважаємо, що конвективною складовою масообміну можна знехтувати. При цьому розв'язання рівняння (5.53) має такий вигляд:

$$\beta_p = \frac{2}{\pi} \omega^{1/2} D_p^{1/2} . \quad (5.55)$$

Виражаючи частоту коливання граничного шару через енергію дисипації E в краплі:

$$\omega \approx \left(\frac{E}{V_p} \right)^{1/2} , \quad (5.56)$$

отримуємо:

$$\beta_p = \frac{2}{\pi} \left(\frac{E}{V_p} \right)^{1/4} D_p^{1/2} . \quad (5.57)$$

З рівняння (5.57) випливає, що завдання визначення коефіцієнта масовіддачі в краплі рідини зводиться до визначення енергії дисипації як величини, що характеризує турбулентну дифузію, що тісно взаємопов'язана з турбулентністю потоку, який обтікає краплю.

Потужність вихору, який виникає у газовому потоці при русі краплі, визначаємо за формулою:

$$N_{кр} = \xi_{кр} \rho_2 \frac{\pi d_{кр}^2 w_{кр}^3}{8}. \quad (5.58)$$

Віднісши потужність вихору до маси краплі, і враховуючи її форму при визначенні коефіцієнта опору, одержимо рівняння для визначення енергії, яка дисипується у краплі:

$$E = \frac{3}{4} \xi_{кр} \frac{\rho_2 w_{кр}^3}{\rho_p d_{кр}} \Phi^2. \quad (5.59)$$

Звідси коефіцієнт масовіддачі в краплі дорівнює:

$$\beta_p = \frac{2}{\pi} \left(\frac{3}{4} \xi_{кр} \frac{\rho_2 w_{кр}^3}{\rho_p v_p d_{кр}} \right)^{1/4} (\Phi D_p)^{1/2}. \quad (5.60)$$

Таким чином, урахування енергії дисипації потоку, який обтікає краплю, дає можливість визначити коефіцієнт масовіддачі в краплі рідини при деформації та коливанні поверхні краплі у високошвидкісному турбулентному потоці газу [306, 307].

5.2.1.3 Експериментальні дослідження масовіддачі в рідкій фазі

Експериментальні дослідження масовіддачі в рідкій фазі проводились на лабораторній установці апарата з ПТВО (рис. 2.6) при десорбції CO_2 повітрям. При цьому приймали, що $\beta_p \approx K_p$.

Ефективність вилучення важкорозчинних газів значною мірою залежить від швидкості газу в повному перерізі апарата. Збільшення w_2 понад певну межу в пінних апаратах традиційних конструкцій спричиняє зменшенню величини міри поглинання газу. У зв'язку з тим, що насичення рідини газом у цьому випадку проходить повільніше, ніж легкорозчинним газом, зменшення тривалості контакту фаз при збільшенні w_2 призводить до того, що досягає максимуму при значенні $w_2 = 1,5\text{--}2$ м/с. Автори робіт [125, 217] пояснюють зниження коефіцієнта масопередачі важкорозчинних газів при збільшенні швидкості газу w_2 зменшенням часу контакту фаз, яке вже не може компенсуватися збільшенням турбулентності системи.

В апараті з ПТВО, на відміну від провальних тарілок з дрібними отворами, збільшення швидкості газу призводить до підвищення ефективності масопередачі важкорозчинних газів, що пояснюється виникненням високих газорідинних шарів, і, в свою чергу, збільшенням часу перебування газу в контактній зоні. Також при збільшенні швидкості газу росте частота подрібнення та коалесценції крапель. В момент утворення та розпаду крапель масообмін проходить з більшою інтенсивністю, ніж під час руху крапель. Крім того, при утворенні краплі, в її середині виникають вихрові токи, які сприяють відведенню забруднюючої речовини з граничного шару та оновленню поверхні контакту фаз. Всі ці фактори призводять до інтенсифікації процесу масоперенесення важкорозчинних газів (рис. 5.15).

Візуальні спостереження за структурою газорідинного шару на ПТВО показали, що площа плівки становить 20-25% від загальної площі поверхні контакту фаз. Порівняння даних розрахунку за рівнянням (5.60) для

визначення коефіцієнта масовіддачі в краплі та експериментальних даних (рис. 5.15) показало, що відхилення отриманих результатів розрахунку за математичною моделлю та експериментальних даних становить 10-15%, що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі. Таким чином, отримані експериментальні дані свідчать про правомірність запропонованого теоретичного підходу, який базується на теорії оновлення з урахуванням положень локально-ізотропної турбулентності, для визначення коефіцієнта масовіддачі в рідкій фазі.

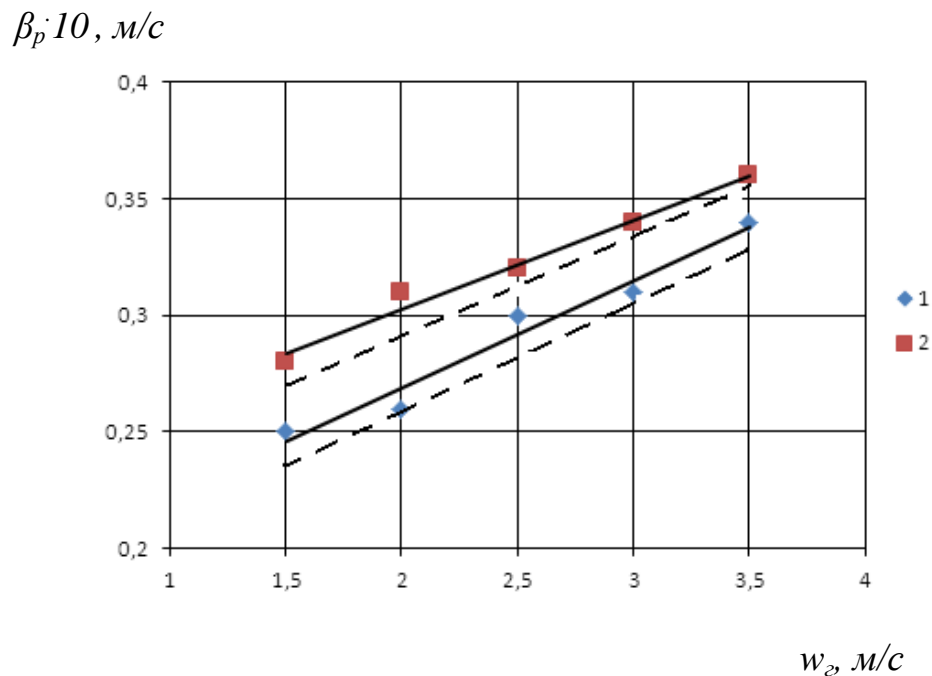


Рисунок 5.15 – Залежність коефіцієнта масовіддачі від швидкості газу в апараті при щільностях зрошення L : 1 – $15 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$; 2 – $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$. Пунктирні лінії – розрахунок за залежністю (5.60)

При вивченні гідродинаміки апаратів з ПТВО встановлено, що зі збільшенням щільності зрошування відбувається збільшення висоти шару рідини на полотні тарілки та газорідного шару, що збільшує час перебування забрудненого потоку газу в контактній зоні апарата. Крім того, відбувається накопичення рідини в шарі, збільшення кількості крапель і поверхні контакту фаз. Стиснутий рух крапель приводить до підвищення

частоти подрібнення і утворення крапель при ударах між собою, що сприяє оновленню поверхні контакту фаз і, як наслідок, збільшенню ефективності масовіддачі (рис.5.16).

$\beta_p \cdot 10, \text{ м/с}$

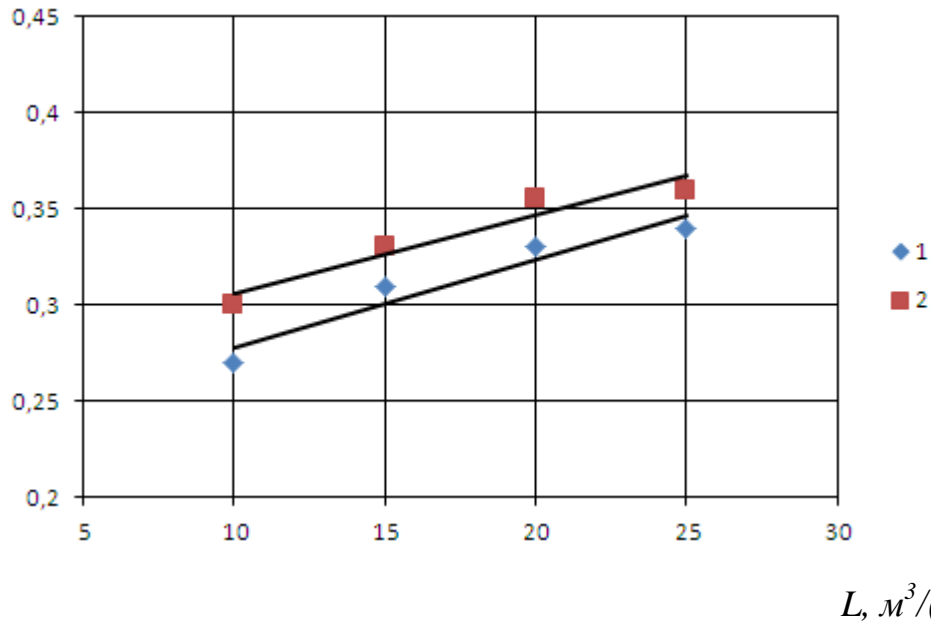


Рисунок 5.16 – Залежність коефіцієнта масовіддачі в рідкій фазі від швидкості зрошення при швидкостях газу: 1 – $w_2 = 2,5 \text{ м/с}$; 2 – $w_2 = 3,5 \text{ м/с}$

У результаті обробки експериментальних даних (рис.5.17) було отримано таку емпіричну залежність для розрахунку коефіцієнта масовіддачі β_p :

$$\beta_p = 0,405 w_2^{0,327} L^{0,35}. \quad (5.61)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (5.61) складає $R^2 = 0,955$.

Дослідження енергетичного фактору $\beta_p / \Delta P$ (рис.5.18) при зміні швидкості газу показало, що для важкорозчинних газів його значення збільшується із ростом швидкості газу, тобто енергетичні витрати на проведення процесу компенсуються підвищенням ефективності процесу масообміну. Це підтверджує правильність положень методології вибору

газоочисного обладнання, яка забезпечує досягнення високої ефективності газоочищення при невисоких питомих енергетичних витратах.

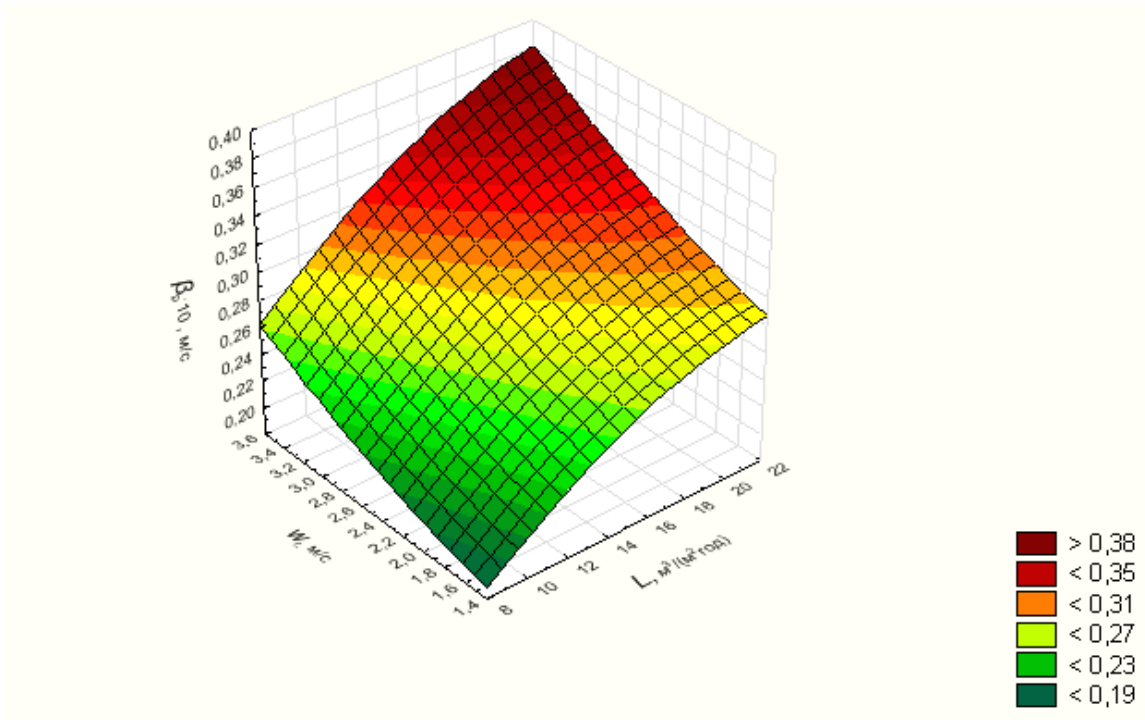


Рисунок 5.17 – Залежність коефіцієнта масовіддачі в рідкій фазі від щільності зрошення й швидкості газу в апараті

$$\beta_p / \Delta P 10^4 \text{ м/(сПа)}$$

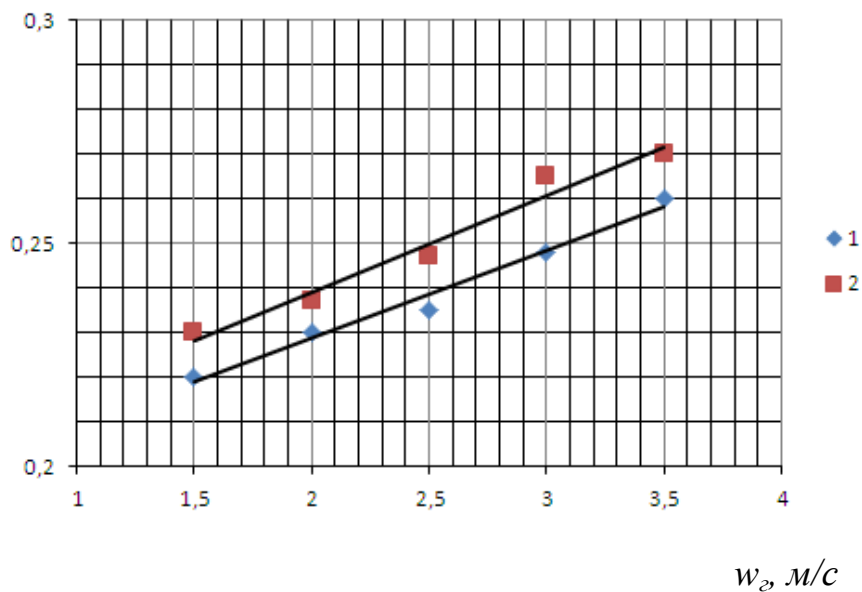


Рисунок 5.18 – Залежність енергетичного фактору від швидкості газу в апараті при щільностях зрошення L : 1 – 15 м³/(м²год); 2 – 20 м³/(м²год)

Дослідження показали, що на швидкість абсорбції в апараті з ПТВО чинить вплив швидкість газу та щільність зрошення, це підтверджує можливість інтенсифікації процесу за рахунок знаходження оптимальних режимних параметрів проведення процесу.

5.2.3 Визначення коефіцієнта масовіддачі у газовій фазі

При уловленні легкорозчинних газів швидкість масопередачі лімітується швидкістю масовіддачі в газовій фазі. Тому для визначення залежності ефективності газоочищення від конструктивних і режимних параметрів проведення процесу знайдемо вираз для визначення коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі.

Літературні дані свідчать про функціональний зв'язок між гідравлічним опором газорідного шару та ефективністю масовіддачі в газовій фазі [217], тобто оцінка ефективності апарата може базуватись на використанні гідродинамічної аналогії між масопередачею та тертям – аналогії Рейнольдса:

$$St' = \frac{\beta}{w} = \frac{\xi}{8}, \quad (5.62)$$

де St' – дифузійне число Стентона;

ξ – коефіцієнт опору тертя;

$\xi/8$ – фактор масовіддачі.

Цей вираз справедливий для ядра турбулентної фази, однак у прикордонному шарі вплив коефіцієнта молекулярної дифузії значний. Тому для урахування явищ на границі розділу фаз в рівняння (5.62) вводять дифузійний критерій Прандтля, який характеризує в даному випадку закон затухання турбулентних пульсацій на границі розділу фаз. З урахуванням дифузійного критерію Прандтля рівняння (5.62) приймає вигляд:

$$St' \cdot Pr^{0,5} = \frac{\xi}{8}. \quad (5.63)$$

Число Стентона можна виразити через числа Nu' , Re , Pr' :

$$St' = \frac{Nu'}{Re \cdot Pr'}. \quad (5.64)$$

Проводячи спільне перетворення рівнянь (5.63) та (5.64) отримаємо вираз:

$$Nu' = \frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr^{0,5}. \quad (5.65)$$

Наведений вираз свідчить про те, що при визначенні ефективності масовіддачі потрібно використовувати не значення загального перепаду тиску, а тільки опір тертя, який характеризує перенесення кількості руху та маси. Так як закономірності обтікання одиничної краплі та комплексу крапель, які утворюють газорідний шар, однакові, то критеріальне рівняння (5.65), з урахуванням стиснутого потоку частинок дисперсної фази представимо у вигляді [308]:

$$\frac{\beta_{2S} \cdot d_{кр}}{D_2} = \frac{\xi_{кр}}{8} \cdot \frac{w_{кр} \cdot d_{кр}}{\varphi \cdot v_2} \cdot \left(\frac{v_2}{D_2} \right)^{0,5}, \quad (5.66)$$

де φ – газовміст.

Перетворюючи вираз (5.66), з урахуванням (5.28), (5.29), отримаємо:

при $100 < Re_{кр} \leq 800$

$$Nu' = A Re_{кр}^{0,8} Pr^{0,5} Z^{0,8}; \quad (5.67)$$

при $Re_{кр} > 800$

$$Nu' = B Re_{кр}^{1,3} Pr^{0,5} Z^{0,8}. \quad (5.68)$$

Із критеріальних рівнянь (5.67) і (5.68) отримаємо залежності для розрахунку коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі для різних режимів руху рідкої фази:

при $100 < Re_{кр} \leq 800$

$$\beta_{zS} = A \frac{w_{кр}^{0,2} \rho_z^{0,4} \cdot v_z^{0,9} \cdot D_z^{0,5}}{\sigma^{0,4} \cdot d_{кр}}; \quad (5.69)$$

при $Re_{кр} > 800$

$$\beta_{zS} = B \frac{w_{кр}^{0,5} \cdot \rho_z \cdot D_z^{0,5} \cdot v_z}{\sigma^{0,4} \cdot d_{кр}^{0,9}}. \quad (5.70)$$

Обробка експериментальних даних дозволила визначити коефіцієнти $A = 12,8$; $B = 615$.

5.2.3.1 Експериментальні дослідження масовіддачі в газовій фазі

Експериментальні дослідження абсорбції добре розчинних газів проводились на системі амоніак – вода. При цьому приймали, що коефіцієнт масовіддачі, віднесений до площі тарілки, дорівнює коефіцієнту масопередачі $\beta_{zS} \approx K_{zS}$.

Результати експериментальних даних наведені на рис. 5.18 – 5.20.

Проведені дослідження показали, що найбільший вплив на коефіцієнт масовіддачі в газовій фазі чинить швидкість газу (рис. 5.19), так як збільшення швидкості газу сприяє виникненню високих газорідних шарів та збільшує час перебування газового потоку в зоні контакту.

Ріст коефіцієнта масовіддачі в залежності від збільшення щільності зрошення несуттєвий (рис. 5.20) і пояснюється в основному збільшенням кількості рідини в газорідному шарі на полотні тарілки. При цьому зменшується газовміст φ і, відповідно, росте дійсна швидкість газу в газорідному шарі, що і призводить до росту коефіцієнта масовіддачі.

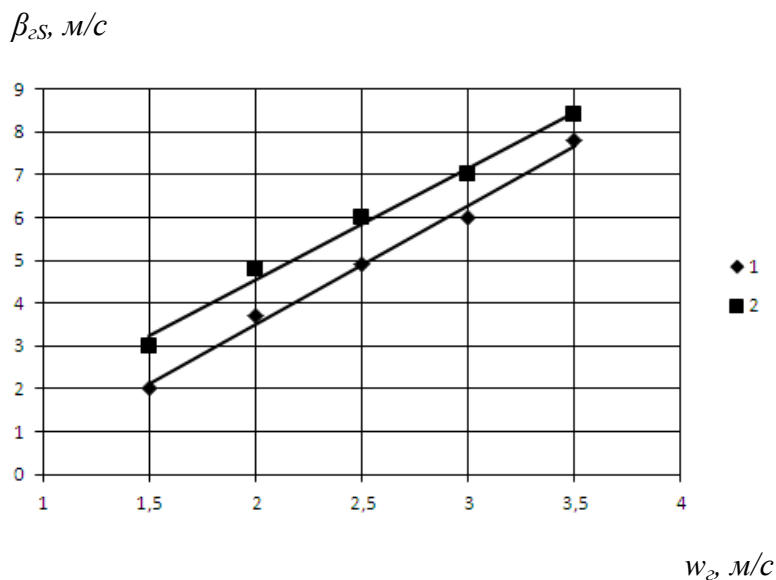


Рисунок 5.19 – Залежність коефіцієнта масовіддачі від швидкості газу в апараті при щільностях зрошення L : 1 – $15 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$; 2 – $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$

У результаті обробки експериментальних (рис. 5.21) даних отримано рівняння для визначення коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі β_{zs} , м/с:

$$\beta_{zs} = 0,74w_2^{1,15}L^{0,325}. \quad (5.71)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (5.71) складає $R^2=0,961$.

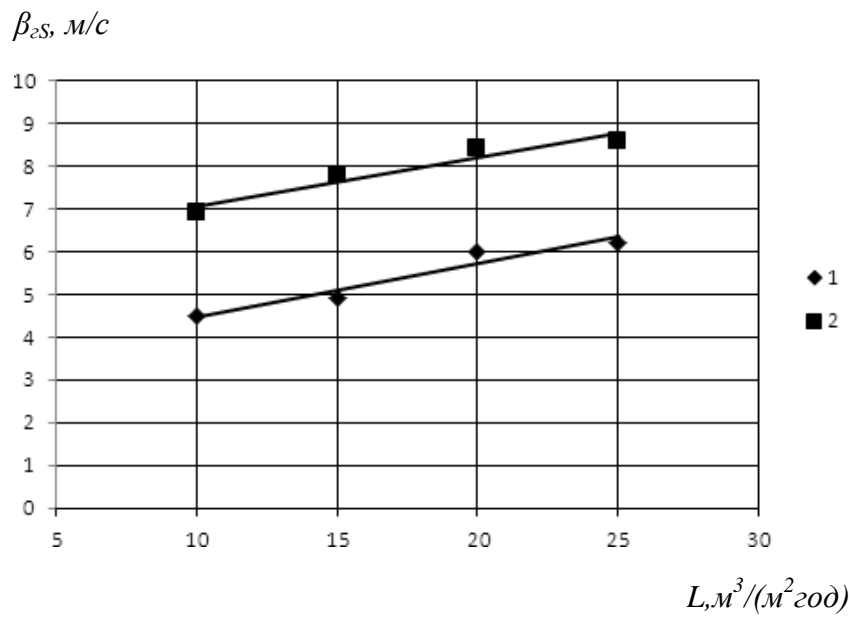


Рисунок 5.20 – Залежність коефіцієнта масовіддачі від щільності зрошення при швидкостях газу w_2 : 1– 2,5 м/с; 2 –3,5 м/с

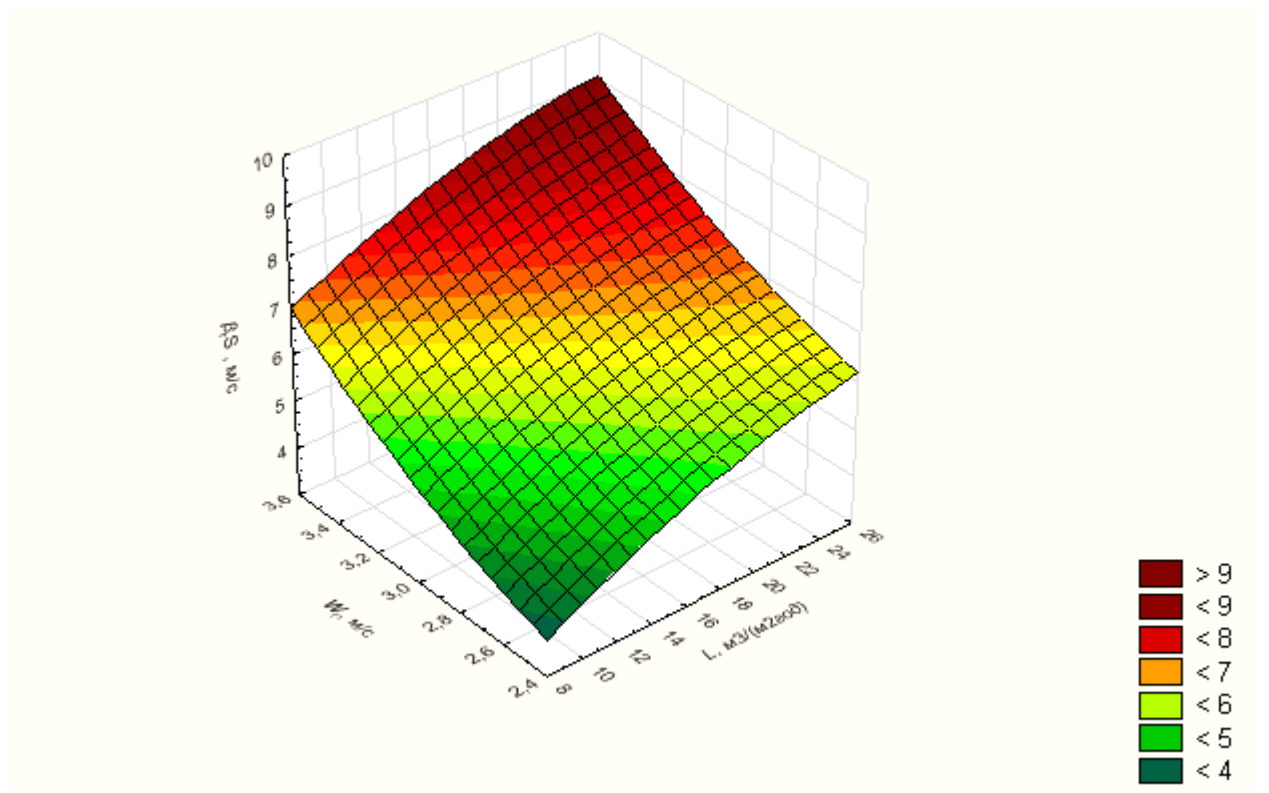


Рисунок 5.21 – Залежність коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі від швидкості газу й щільності зрошення в апараті

Коефіцієнт масовіддачі в газовій фазі залежить від часу перебування газової фази в зоні контакту, тобто, від висоти газорідинного шару. Експериментальні дослідження показали високу залежність β_z від H . Залежність коефіцієнта масовіддачі від висоти газорідинного шару представлена на рис. 5.22 та описується рівнянням:

$$\beta_{zs} = 11,25 w_z^{-0,17} H^{0,23}, \quad (5.72)$$

де H - висота газорідинного шару на тарілці.

Коефіцієнт детермінації рівняння (5.72) складає $R^2=0,914$.

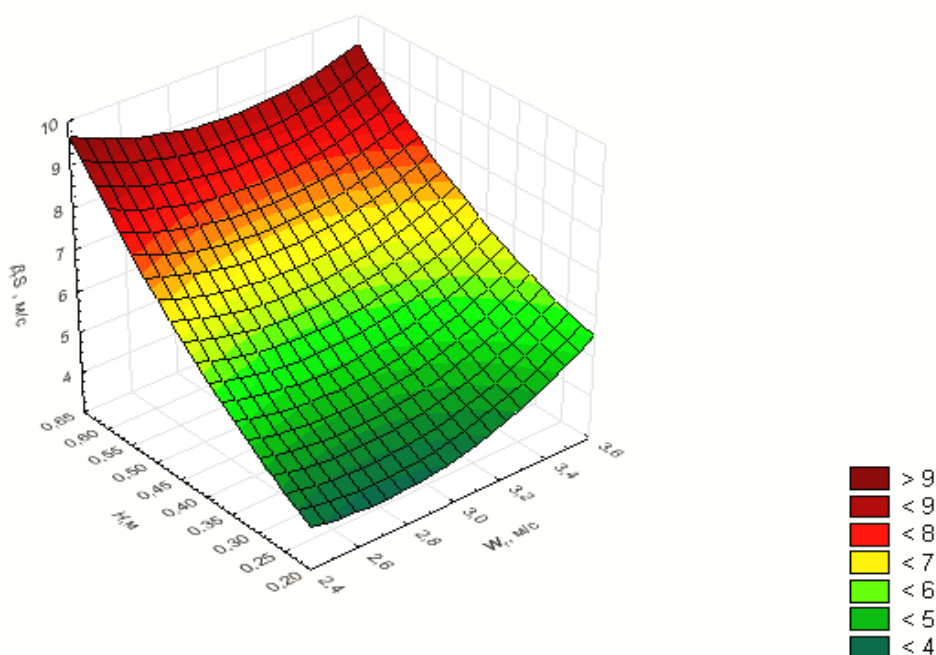


Рисунок 5.22 – Залежність коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі від висоти газорідинного шару й швидкості газу в апараті

Аналіз проведених експериментальних досліджень показав, що підвищення швидкості перенесення речовини в газовій фазі досягається за рахунок утворення високих газорідинних шарів на ПТВО, що обумовлено високими швидкостями газу та інтенсивним турбулентним режимом роботи апарата.

Дослідження енергетичного фактору $\beta_{2S}/\Delta P$ (рис.5.23) при зміні швидкості газу показало, що значення коефіцієнта корисної дії збільшується із ростом швидкості газу в більшій мірі, ніж при абсорбції важкорозчинних газів, так як основний вплив на швидкість абсорбції чинить швидкість газу. Це свідчить про компенсацію енергетичних витрат на транспортування газового потоку та утворення високих газорідинних шарів за рахунок інтенсифікації процесу абсорбції.

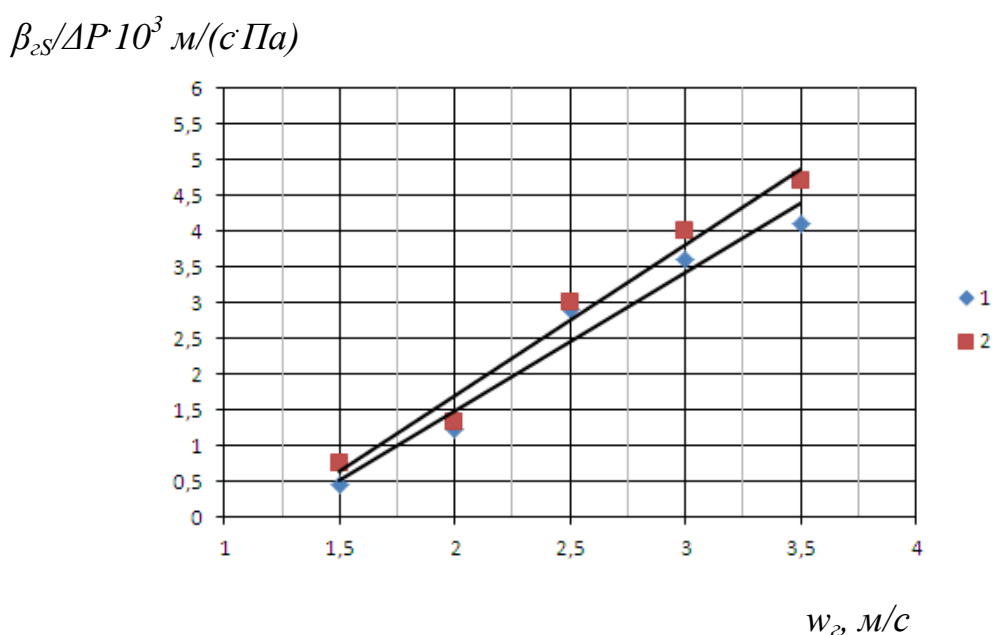


Рисунок 5.23 – Залежність енергетичного фактора при абсорбції амоніака від швидкості газу при щільностях зрошення L : 1 – $15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ год})$; 2 – $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ год})$

Отже, дослідження ефективності масообміну в апараті з ПТВО підтверджують, що конструкція контактного пристрою сприяє виникненню інтенсивного гідродинамічного режиму, вихрового руху взаємодіючих потоків, утворенню високих газорідинних шарів, зростанню величини поверхні контакту фаз та швидкості її оновлення. Ці фактори призводять до інтенсифікації абсорбції як легкорозчинних, так і важкорозчинних газів.

5.3 Дослідження пиловловлення у високоінтенсивних апаратах

5.3.1 Пиловловлення в апаратах з провальними тарілками великих отворів

Пиловловлення в апаратах з ПТВО відбувається за рахунок турбулентно-інерційного та турбулентно-дифузійного механізмів пилоосадження в залежності від дисперсності пилу. Тверді частинки осідають на плівку рідини на поверхні тарілок та поверхню крапель у газорідинному шарі, при цьому збільшення ступеню очищення обумовлене динамічною висотою газорідинного шару [309, 310]. Частинки твердої фази мають розмір значно менший розміру турбулентних пульсацій потоку і тому утягуються у пульсаційний вихровий рух газового потоку, що призводить до збільшення ефективності пилоочищення.

При збільшенні швидкості газу тверді частинки, підхоплені газовим потоком, у залежності від величини сил, які діють на тверду частинку і визначаються її фізико-хімічними властивостями, або осідають за рахунок адгезійного захоплення, або пружно відштовхуються від плівки рідини. Якщо ж відбулося осадження, то в результаті змочування частинки відбувається проникнення в шар рідини. При цьому спостерігається зростання ефективності пиловловлення за рахунок турбулентно-інерційного механізму пилоосадження. Величина коефіцієнта захоплення при осадженні частинок на перешкоду (полотно тарілки) залежить від гідродинамічного режиму обтікання і критерію Стокса [164]. Механізм інерційного осадження частинок при сталій траєкторії руху визначають турбулентні пульсації. Знаючи величину режимних параметрів процесу, які впливають на турбулентність потоку, можна визначити ефективність турбулентно-інерційного механізму пилоосадження.

Дослідження ефективності пиловловлення в апараті з ПТВО проводилось в системі вода – пил TiO_2 .

Основна частина дрібнодисперсного пилу в апаратах з ПТВО вловлюється завдяки турбулентно-дифузійному механізму. Виникнення тороїдального вихору та дрібних бульбашок під час розпаду бульбашки над отвором тарілки призводить до виникнення турбулентних пульсацій в газорідному шарі, що сприяє збільшенню ефективності пилоочищення.

Результати експериментальних досліджень ефективності пиловловлення в апараті з провальними тарілками з отворами 0,15 м та $\tau = 23,5\%$ наведені на рис. 5.24-5.26 [285, 311]. Аналіз рис. 5.24 та 5.25 показав, що максимальна ефективність пиловловлення в досліджуваному апараті становить 99,6% при швидкостях газу 3,5 м/с та щільності зрошення 18-20 м³/(м²·год). Точка максимуму показує момент найбільшого розвитку поверхні контакту фаз. При збільшенні швидкості газу вище 3,5 м/с спостерігається зниження ефективності пиловловлення. Це пояснюється винесенням крапель рідини з поверхні газорідного шару, утворенням крупних агломератів рідини у вигляді плівок, деформованих крапель, що призводить до зменшення поверхні контакту фаз.

η , %

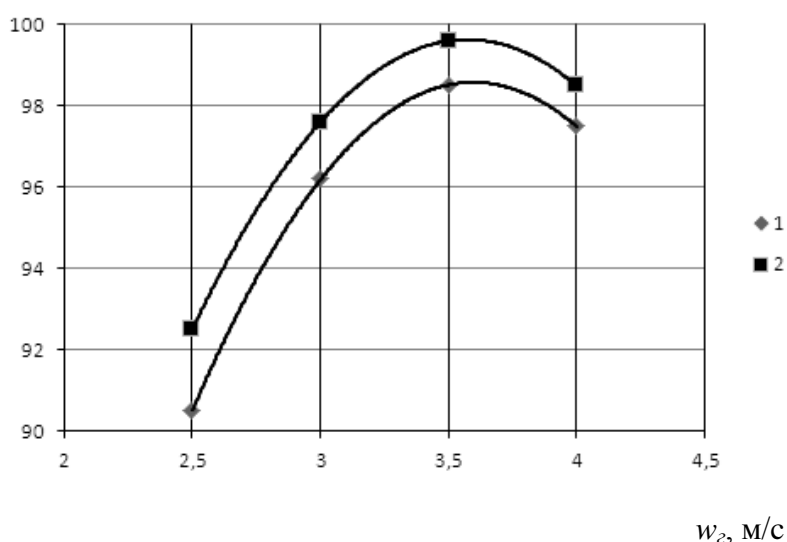


Рисунок 5.24 – Залежність ефективності пиловловлення в апараті з ПТВО $d_o=0,15$ м ($\tau = 23,5\%$) від швидкості газу при різних значеннях щільності зрошення L : 1 – 15 м³/(м²·год); 2 – 20 м³/(м²·год)

Зі збільшенням щільності зрошення пропорційно росте надходження свіжої рідини в робочу зону апарата, що призводить до збільшення площі контакту фаз. Високі газорідинні шари, які утворюються в режимі вторинного піноутворення сприяють збільшенню часу перебування твердих частинок в робочій зоні апарату. Крім того, росте кількість крапель, що призводить до їх зіткнень, коалесценції, подрібнення, тобто відбувається безперервне оновлення поверхні контакту, що веде до росту ефективності пиловловлення (рис. 5.25).

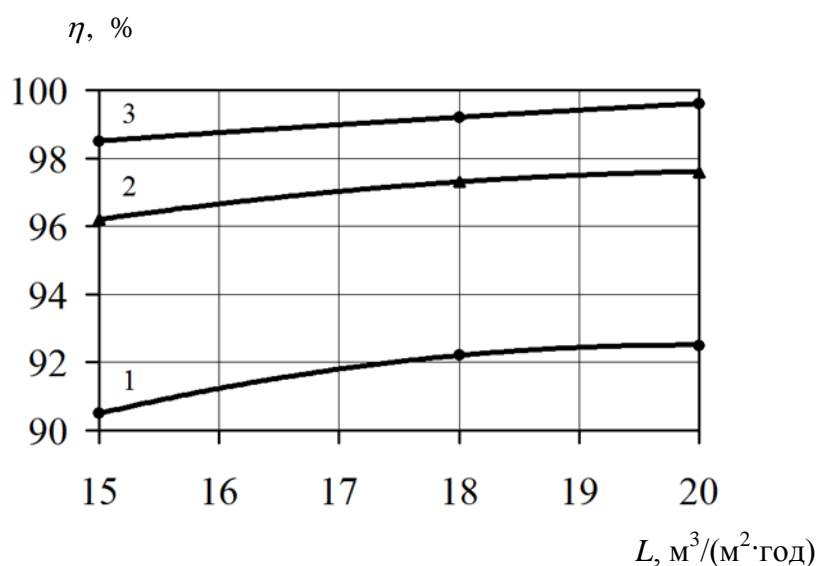


Рисунок 5.25 – Залежність ефективності пиловловлення в апараті з ПТВО $d_o=0,15\text{м}$ ($\tau = 23,5\%$) від щільності зрошення: 1 – $w_2 = 2,5$ м/с; 2 – $w_2 = 3$ м/с; 3 – $w_2 = 3,5$ м/с

У результаті обробки експериментальних даних (рис. 5.26) було отримано рівняння для визначення ефективності пилоочищення, η , %:

$$\eta = 29,15w_2^{0,282}L^{0,307}. \quad (5.73)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (5.73) складає $R^2=0,912$.

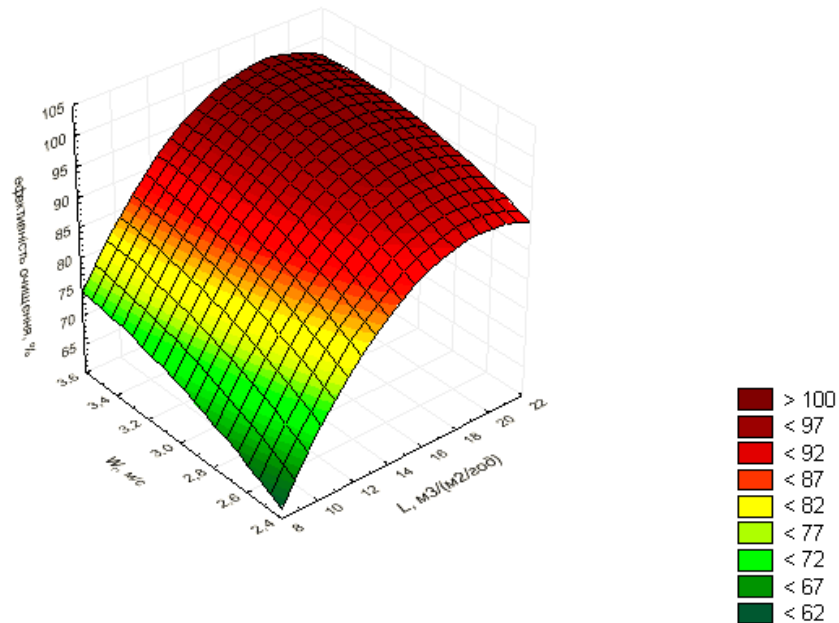


Рисунок 5.26 – Залежність ефективності пилоочищення в апараті з ПТВО $d_o=0,15\text{м}$ ($\tau = 23,5\%$) від швидкості газу та щільності зрошення

Дослідження енергетичного фактору процесу пиловловлення (рис. 5.27) свідчать про незначний вплив швидкості газу в апараті на цей параметр. Таким чином, енергетичні витрати компенсуються підвищенням ефективності пиловловлення.

$$\eta/\Delta P \cdot 10^4, \text{Па}^{-1}$$

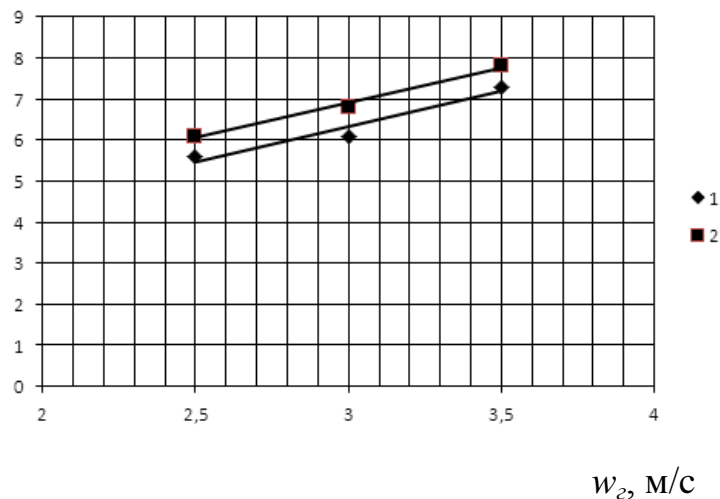


Рисунок 5.27 – Залежність енергетичного фактора при пиловловленні від швидкості газу при щільностях зрошення L : 1 – $15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; 2 – $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$

Узагальнюючи дані експериментальних досліджень потрібно відмітити позитивний вплив підвищення швидкості газу на ефективність пиловловлення в апаратах з ПТВО в порівнянні зі скруберами з провальними тарілками із дрібними отворами. Експериментальні дослідження пиловловлення в апараті з ПТВО показали високу ефективність роботи апарата та стійку роботу, що дозволяє рекомендувати його для комплексного очищення відхідних газів.

5.3.2 Пиловловлення в апаратах з регулярною рухомою насадкою

В апаратах з регулярною рухомою насадкою реалізуються два механізми пилоосадження – турбулентно-інерційний і турбулентно-дифузійний – у залежності від густини і розміру частинок. Дрібні частинки, які характеризуються високим ступенем захоплення, осідають на поверхню рідини під впливом турбулентно-дифузійного механізму. Більші частинки, які мають велику інерційність, осідають на краплях рідини під впливом турбулентно-інерційного механізму, обумовленого різною швидкістю руху частинок і крапель у газовому потоці. Ефект захоплення стає значним при осіданні частинок на сферах дуже маленького діаметра. При введенні крапель води в потік газу ефективність захоплення зростає зі зменшенням розміру краплі і досягає великих значень й для дуже дрібних частинок. Це пояснюється тим, що при такому способі пиловловлення створюються відносно великі швидкості твердих частинок і крапель рідини. Ефективність пиловловлення підвищується зі збільшенням кількості рідини, яка знаходиться в робочому об'ємі апарата у вигляді крапель, відносної швидкості газового потоку, розміру частинок і зі зменшенням діаметра краплі.

В роботі [168] показано, що велика різниця між швидкостями газу та рідини дозволяє розглядати процес пилоочищення як фільтрацію газів через об'ємний дрібнозернистий фільтр, зернами якого є крапельки води.

Розрахунки швидкості руху крапель в апараті РРН з за залежністю (5.30) та наведені на рис. 5.13 показали, що різниця в швидкостях газу та крапель рідини складає 4-5 м/с, що призводить до підвищення ефективності пиловловлення в апаратах з РРН. На пиловловлення в апаратах цієї конструкції впливають як конструктивні характеристики апарата, так і режимні параметри проведення процесу [312, 313]. З метою оптимізації для виявлення впливу конструктивних та режимних параметрів проведення процесу на різні механізми осадження частинок визначали фракційну та загальну ефективність пиловловлення.

Дослідження ефективності пиловловлення в апараті з РРН проводилось в системі вода – пил фосфориту.

5.3.2.1 Вплив конструктивних параметрів на ефективність пиловловлення в апараті з регулярною рухомою насадкою

Конструктивні параметри апарата чинять вплив на гідродинамічний режим проведення процесу, ефективність газоочищення і інтенсивність процесу в цілому. В апаратах з РРН створення вихорового руху залежить від кроку розташування насадкових тіл по вертикалі та горизонталі. Проведені експериментальні дослідження показали, що підвищення ефективності пиловловлення в апараті з РРН можна досягти зміною кроку між елементами насадки.

При зменшенні кроку між елементами (рис. 5.28) $t_{\text{гор}} < 2,5d_k$ збільшується кількість утримуваної рідини і, відповідно, поверхня осідання частинок. Це призводить до підвищення ефективності пиловловлення за рахунок турбулентно-інерційного механізму осідання, що підтверджується результатами досліджень. Збільшення розміру крапель рідини за рахунок коалесценції призводить до зниження ефективності дифузійного механізму осідання.

Розміщення елементів насадки з кроком $t_{zop} \approx 2,5d_k$ дозволяє проводити процес пиловловлення за мінімальних енерговитрат. Вихори рівномірно розподілені в об'ємі апарата, де не відбувається перекриття вихрових зон. Це дозволяє найбільш повно використовувати енергію вихрового потоку для інтенсифікації турбулентно- дифузійного механізму осідання. При $t_{zop} > 2,5d_k$ відбувається падіння ефективності інерційного і дифузійного механізмів пиловловлення за рахунок збільшення проскоку рідини і зниження КУР. Збільшення відношення t_{zop}/d_k при дифузійному механізмі осадження призводить до зменшення коефіцієнта турбулентної дифузії і, відповідно, зменшення ефективності пиловловлення.

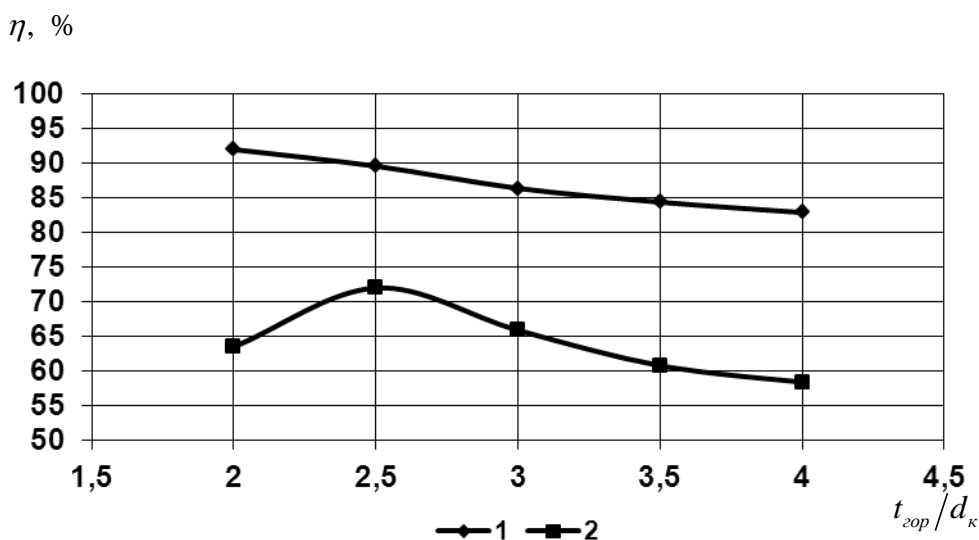


Рисунок 5.28 – Залежність фракційної ефективності пиловловлення від горизонтального кроку розташування елементів насадки: 1 – $d_q = 20$ мкм; 2 – $d_q = 0,5$ мкм

Залежність ефективності пиловловлення від вертикального кроку (рис. 5.29) носить більш складний характер. Максимальне значення ефективності пилоочищення досягається при $t_g = 4,5d_k$.

Це пояснюється виникненням режиму одночасного вихороутворення, який забезпечує найбільш повне використання турбулентності у вихоровій

зоні. При зміні відстані $t_e < 4d_k$ відбувається зворотний зв'язок між вихорами. Довжина вихорової зони (крок у доріжці Кармана) в цьому випадку близька або менша від відстані між насадковими тілами, що знижує потужність вихору через його змушений зрив. При $t_e > 5d_k$ розмір вихорової зони стає менше, ніж відстань між елементами насадки. Вихори перестають взаємодіяти один з одним, відбувається їхня повна дисипація. Між вихоровими зонами виникає розрив, що зменшує турбулентність потоків, при цьому ефективність інерційного і дифузійного механізмів перенесення частинок до поверхні осідання значно нижча. Це обумовлює зниження ефективності пиловловлення.

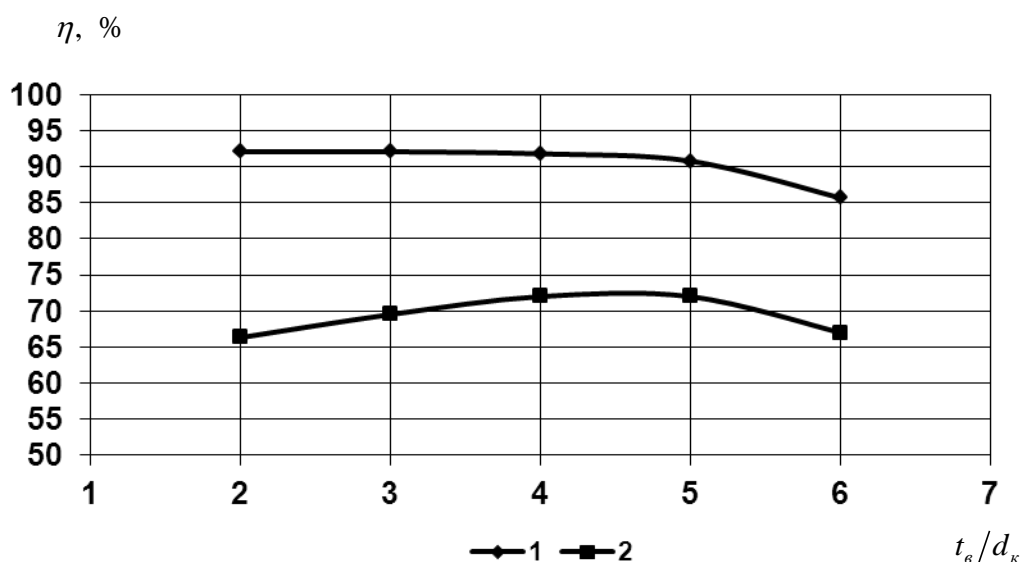


Рисунок 5.29 – Залежність фракційної ефективності пиловловлення від вертикального кроку розташування елементів насадки: 1 – $d_q = 20$ мкм; 2 – $d_q = 0,5$ мкм

Збільшення вертикального кроку між насадковими тілами супроводжується ростом висоти контактної зони апарата, що підвищує ступінь очищення. Найбільш помітне підвищення ефективності пиловловлення досягається на перших рядах насадки по ходу газу.

Аналіз графічних залежностей ефективності пилоочищення (рис. 5.28, 5.29) дозволив визначити вертикальний і горизонтальний кроки

розташування насадки, при якому досягається найбільша ефективність процесу $t_{\text{зоп}} = 2,5d_k$, $t_g = 4,5d_k$.

Експериментальні дослідження ефективності пиловловлення в залежності від числа ступеней контакту фаз в апараті (рис.5.29) показали наступне. Ефективність уловлювання частинок $d_v = 20$ мкм росте з 36% в апараті з одним ступенем до 72% у апараті з трьома ступенями і до 91,2% – в апараті із шістьма ступенями. Подальше підвищення кількості рядів насадки в апараті до восьми ступенів призводить до зростання ефективності усього до 92,3%, що показує недоцільність збільшення висоти контактної зони. Ефективність інерційного пиловловлення на першій гіпотетичній тарілці становить порядка 65% потенційної її ефективності. Не досить ефективна робота початкової ділянки апарата пояснюється його роботою в умовах нестійкої гідродинаміки, пов'язаної з формуванням розподілу рідини по перетину апарата, проскоком частини рідини. Цією ж причиною пояснюється і значне зниження ефективності дифузійного механізму пиловловлення. Ефективність дифузійного осідання твердих частинок на першій гіпотетичній тарілці становить порядка 69% від її потенційної ефективності.

Для частинок $d_v = 0,5$ мкм збільшення висоти контактної зони (рис.5.30) призводить до зростання ефективності пиловловлення. Ефективність уловлювання частинок росте з 16,5% у апараті з одним ступенем контакту фаз, до 50,5% – в апараті з трьома ступенями і до 77% – в апараті із шістьма ступенями. Подальше підвищення кількості рядів насадки в апараті до восьми призводить до зростання ефективності всього до 83%.

Таким чином, експериментальні дослідження показали, що висоту контактної зони апарату з РРН доцільно розраховувати, виходячи з шести ступенів контакту фаз.

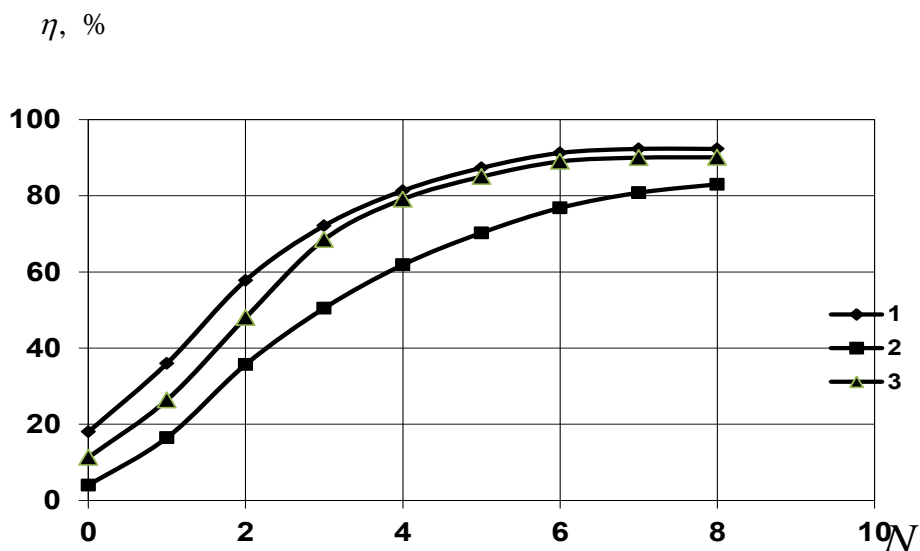


Рисунок 5.30 – Залежність ефективності уловлювання частинок від кількості ступенів: 1 – $d_{ч} = 20$ мкм; 2 – $d_{ч} = 0,5$ мкм; 3 – загальна ефективність пилоловлення

5.3.2.2 Вплив режимних параметрів апарата з рухомою насадкою на ефективність пилоловлення

Вплив швидкості газу на ефективність пилоловлення різний для інерційного та дифузійного механізмів пилоосадження, тобто для твердих частинок різного діаметра.

Зростання ефективності пилоловлення, обумовленого турбулентно-інерційним механізмом пилоосадження, із зростанням швидкості газу (рис.5.31) пов'язане зі збільшенням відносної швидкості руху фаз, а також зі зменшенням діаметру крапель, що утворюються у вихрових зонах апарата.

Зміна ефективності турбулентно-дифузійного осадження частинок носить більш складний характер. При малих швидкостях газу перенесення високодисперсних аерозолей на плівку, що знаходиться на поверхні насадкових тіл, здійснюється за рахунок молекулярної дифузії. Збільшення

швидкості газу супроводжується зростанням інтенсивності турбулентної дифузії. Проведені дослідження дозволили виявити характерні діапазони зміни ефективності пиловловлення.

В області АВ зростання швидкості газу призводить до зменшення часу контакту фаз і, відповідно, до зниження складової молекулярної дифузії. Разом з тим, зростання загального коефіцієнта дифузії відбувається повільніше, ніж зростання швидкості газу. Цим обумовлюється загальне зниження ефективності дифузійного пилоосадження. В області ВС зростання швидкості газу супроводжується збільшенням частоти й амплітуди пульсацій насадки. Це приводить до збільшення інтенсивності перенесення високодисперсних аерозолей за рахунок переважного впливу турбулентної дифузії. Швидкість газу в точці С відповідає початку перехідного режиму, що характеризується зривом вихорів з елементів насадки і значним зменшенням діаметра краплі у вихрових зонах. При цьому відбувається різке зростання коефіцієнта дифузії та ефективності дифузійного пилоосадження (область CD). Збільшення амплітуди та частоти пульсацій насадкових тіл, що призводить до зменшення діаметра краплі і, відповідно, до зростання ефективності пиловловлення, спостерігається до досягнення швидкості газу 12 м/с, яка відповідає точці D. Подальше збільшення швидкості газу призводить до росту сили інерції, що діє на частинку. Це призводить до зменшення ступеню захоплення частинок аерозолі турбулентними пульсаціями та зменшення ефективності дифузійного пилоосадження.

Дослідження залежності ефективності пиловловлення від питомого зрошення показали, що ефективність зростає до значення питомого зрошення $m = 1 \text{ дм}^3/\text{м}^3$ (рис. 5.32). При подальшому рості $m = (1 - 1,2) \text{ дм}^3/\text{м}^3$ питоме зрошення незначно впливає на ефективність пиловловлення. Це пояснюється тим, що зростання m призводить до збільшення діаметра краплі, що, у свою чергу, веде до зниження ефективності інерційного та дифузійного пилоосадження. При значенні $m = 1$, буде спостерігатися незначне зростання ефективності пиловловлення, що підтвердили експерименти.

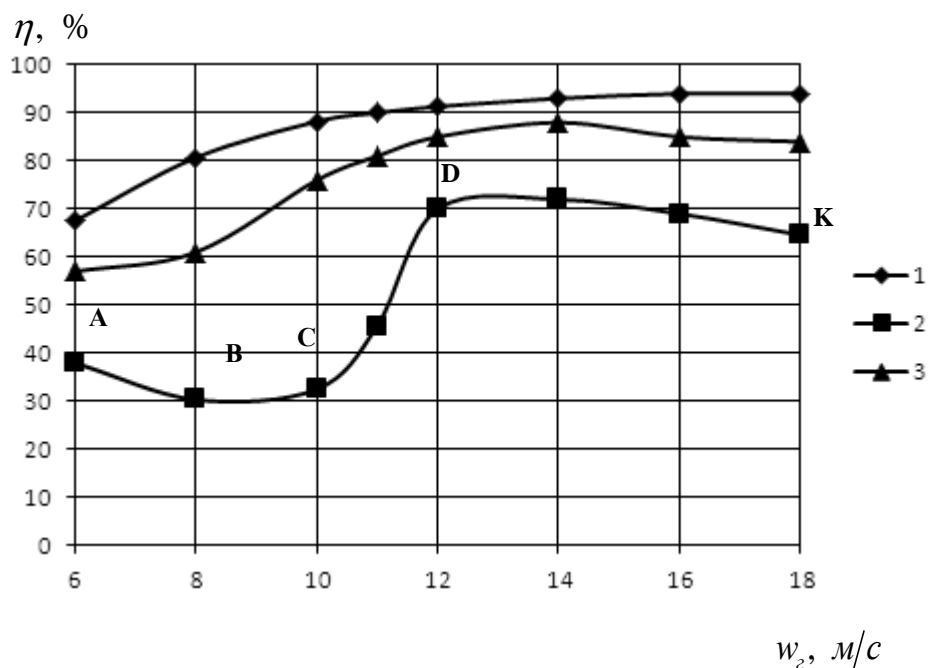


Рисунок 5.31 – Залежність ефективності пиловловлення від швидкості газу: 1 – $d_y = 20$ мкм; 2 – $d_y = 0,5$ мкм; 3 – загальна ефективність пиловловлення при $m = 0,8 \text{ дм}^3/\text{м}^3$

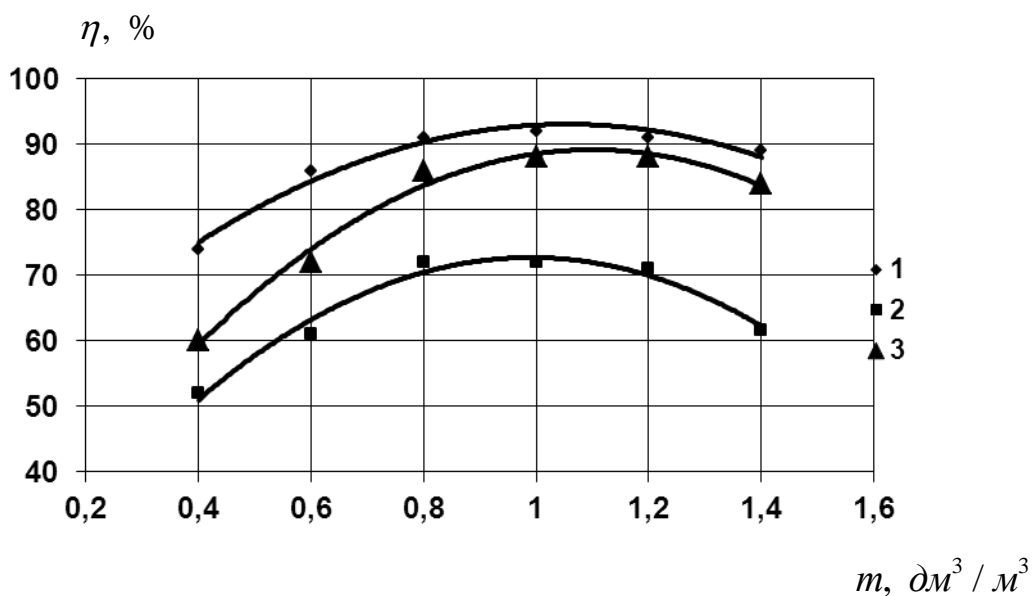


Рисунок 5.32 – Залежність ефективності пиловловлення від питомого зрошення при швидкості газу $w_2 = 12 \text{ м/с}$: 1 – $d_y = 20$ мкм; 2 – $d_y = 0,5$ мкм; 3 – загальна ефективність пиловловлення

Таким чином, проведені дослідження показали більший внесок турбулентно-дифузійного механізму пилоочищення в загальну ефективність роботи апарата з РРН. Отримані дані дозволяють рекомендувати апарати з РРН, які працюють в режимі низхідної прямої течії, для уловлення крупнодисперсного пилу.

У результаті обробки експериментальних даних (рис. 5.33) отримано рівняння для визначення ефективності пилоочищення, η , %:

$$\eta = 13,172w_2^{0,772}m^{0,34}. \quad (5.74)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (5.74) складає $R^2=0,905$.

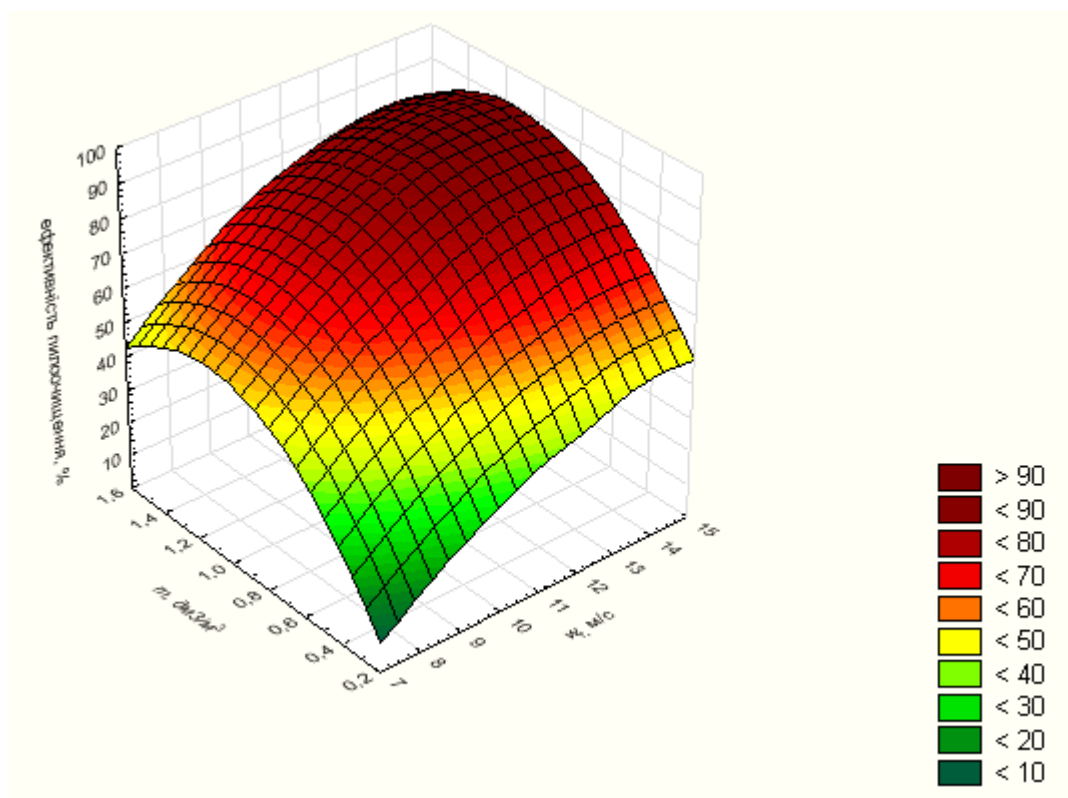


Рисунок 5.33 – Залежність ефективності пилоочищення в апараті з РРН від швидкості газу та щільності зрошення

На підставі зроблених висновків однозначно визначається область оптимізації режимних параметрів здійснення процесу поділу аерозолі в умовах низхідної прямої течії при $w_2 = 12-20$ м/с.

5.4 Вибір оптимальних режимних параметрів роботи газоочисних апаратів

Як показали проведені дослідження процесів газоочищення в апаратах з ПТВО та з РРН, що вибираючи режимні параметри проведення процесу можна досягти розвиненої поверхні контакту фаз, високих газорідинних шарів, безперервного оновлення поверхні контакту при утворенні та подрібненні крапель, що призводить до інтенсифікації комплексного очищення відхідних газів.

Задачу інтенсифікації процесів абсорбції та пиловловлення в апараті з ПТВО реалізували за рахунок вибору оптимальних показників режимних параметрів апарата.

Знаходячи масу вловленої речовини з рівняння матеріального балансу вираз для інтенсивності процесу запишемо наступним чином [217]:

$$i = \frac{L_p(X_n - X_k)}{S}; \quad (5.75)$$

де L_p – витрата рідини, м³/с;

X – концентрація забруднюючої речовини в абсорбенті.

Прирівнюючи рівняння (5.75) та (4.2) отримаємо:

$$\frac{L_p(X_n - X_k)}{S} = K_{2S} \Delta Y_{сер} A; \quad (5.76)$$

де A – площа поверхні контакту фаз, віднесена до площі тарілки.

Розглядаємо процес абсорбції амоніаку, при цьому приймаємо $K_{2S} = \beta_{2S}$. β_{2S} розраховуємо за формулою (5.71) в залежності від значення критерію Рейнольдса.

При цьому приймали наступні допущення.

Швидкість газу змінюється в межах, які забезпечують стійку роботу апарата. Для провальних тарілок нижня межа стійкої роботи відповідає швидкості газу, при якій на тарілці виникає динамічно стійкий газорідний шар [314]:

$$w_{\min} = 0,185(1 - \tau) \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_z}{\rho_z}}. \quad (5.77)$$

Верхня межа стійкої роботи визначається надмірним бризковіднесенням.

Приймаємо $1,5 \leq w_2 \leq 3,5$ м/с.

Витрату абсорбенту визначаємо з рівняння мінімальної питомої витрати абсорбенту:

$$l = \left(\frac{L_p}{G} \right)_{\min} = \frac{\bar{Y}_n - \bar{Y}_\kappa}{\bar{X}_\kappa^* - \bar{X}_n}; \quad (5.77)$$

$$L_p = (1,2 - 1,5)L_{\min}. \quad (5.78)$$

Діаметр крапель обмежується діаметром витання крапель рідини, при якому спостерігається бризковіднесення:

$$d_{кр.в} = \frac{3}{4} \xi_{кр} \frac{w_{кр}^2 \rho_z}{(\rho_p - \rho_z) g}. \quad (5.79)$$

Коефіцієнт опору $\xi_{кр}$ визначають за рівняннями (5.28) або (5.29) в залежності від числа Рейнольдса.

Формулювання задачі оптимізації запишемо в наступному вигляді:

$$i = f(w_2, L) \Rightarrow \max. \quad (5.80)$$

Реалізація задачі оптимізації здійснювалась в програмному продукті WolframAlpha із застосуванням методу простого випадкового пошуку [315]. В якості початкових параметрів, які характеризують об'єкт оптимізації, прийняті витрата газової фази $G= 30000 \text{ м}^3/\text{год}$; початкова концентрація амоніаку в повітрі – $1,2 \text{ мг}/\text{м}^3$.

Рішення оптимізаційної задачі дало наступні результати $w_2=3,5 \text{ м}/\text{с}$; $L=20 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$.

Для інтенсифікації процесу пиловловлення в апараті з РРН шляхом визначення оптимальних режимних параметрів проведення процесу використовували показник:

$$\Pi = \frac{i \cdot \eta}{\Delta P}.$$

Інтенсивність процесу визначаємо за формулою (5.74); ефективність – за формулою (2.4), гідравлічний опір – за формулою (5.14).

Тоді інтенсивність параметр оптимізації буде дорівнювати:

$$\Pi = \frac{L_p (C_n - C_k)^2}{S \cdot C_n \cdot \Delta P}. \quad (5.81)$$

Таким чином, формулювання задачі оптимізації запишемо в наступному вигляді:

$$\Pi = f(w_2, L) \Rightarrow \max. \quad (5.82)$$

Початкові параметри процесу: витрата газової фази $G= 30000 \text{ м}^3/\text{год}$; концентрація пилу в повітрі – $10 \text{ г}/\text{м}^3$.

Рішення оптимізаційної задачі дало наступні результати $w_2=12 \text{ м}/\text{с}$; $L_p=40 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$ (Додаток В).

Висновки до розділу 5

1. На основі теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що апарати з ПТВО та з РРН мають високу ефективність очищення від газоподібних та твердих забруднювачів, можуть працювати в широкому діапазоні навантажень по рідині та газу, що дозволяє рекомендувати їх для комплексного очищення великих об'ємів відхідних газів промислових підприємств .

2. Проведено математичне моделювання процесів, які відбуваються у високоінтенсивних газоочисних апаратах:

- з використанням положень плівкової теорії розроблена математична модель для визначення коефіцієнта масовіддачі в газовій фазі;
- з використанням моделі короткочасного контакту розроблена математична модель для розрахунку коефіцієнта масовіддачі при протіканні хімічної реакції;
- на основі дисипативного підходу отримані залежності для визначення діаметра крапель та коефіцієнта масовіддачі в краплі рідини, яка рухається в турбулентному потоці.

3. Удосконалено при системному дослідженні в широкому діапазоні режимних параметрів фізична модель процесу газоочищення в апараті з провальними тарілками великих отворів у режимі вторинного піноутворення та отримано регресійні залежності впливу режимних та конструктивних параметрів на ефективність процесів пилогазоочищення.

4. В результаті проведених досліджень гідродинаміки апаратів з ПТВО визначено робочий режим роботи апарата при швидкості газу $w_z = 2,5 - 3,5$ м/с та щільності зрошення $L = 15-20$ м³/(м²·год), який відповідає режиму вторинного піноутворення. При роботі апарата в цьому режимі виникають високі газорідинні шари, що призводить до створення розвиненої поверхні контакту фаз та дозволяє значно підвищити ефективність

пилоочищення та масообміну у порівнянні з типовими тарілчастими пінними апаратами.

5. Визначення залежності газовмісту від швидкості газу в апаратах з ПТВО показало, що при швидкостях, які відповідають режиму вторинного піноутворення, загальний газовміст залишається практично постійним $\varphi=0,8$. Це свідчить про однорідність структури шару, відсутність крупних каналів, факелів і т.д. Дослідження газовмісту по перерізу апарата також показало однорідність структури газорідного шару.

6. В апараті з ПТВО, на відміну від провальних тарілок з дрібними отворами, інтенсивна гідродинамічна обстановка приводить до виникнення високих газорідних шарів, що, в свою чергу, збільшує час перебування газу в контактній зоні та призводить до інтенсифікації процесу масообміну важкорозчинних газів.

7. Встановлено, що пиловловлення в апаратах з ПТВО відбувається за рахунок турбулентно-інерційного і турбулентно-дифузійного механізмів пилоосадження. Дослідження показали, що максимальна ефективність пиловловлення в досліджуваному апараті становить 99,6% при швидкостях газу 3,5 м/с та щільності зрошення 18 - 20 м³/(м²·год).

8. В апаратах з регулярно рухомою насадкою реалізуються два механізми пилоосадження – турбулентно-інерційний і турбулентно-дифузійний – у залежності від густини і розміру частинок. Дослідження дозволили визначити вертикальний і горизонтальний кроки розташування насадки, при якому досягається найбільша ефективність процесу $t_2 = 2,5d_k$, $t_6 = 4,5d_k$.

9. В результаті проведеного оптимізаційного пошуку з використанням отриманих виразів для опису процесів абсорбції та пиловловлення визначені оптимальні значення режимних параметрів: швидкості газу та щільності зрошення, при яких досягається найбільша інтенсивність процесу при мінімальному гідравлічному опорі апарата.

10. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження гідродинаміки, масообміну та пиловловлення показали, що апарати з провальними тарілками великих отворів та з регулярною рухомою насадкою можуть забезпечити стійку роботу систем газоочищення при комплексному очищенні відхідних газів. Все вищенаведене свідчить про дієвість розробленої методології вибору газоочисного обладнання.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [281-286, 289, 291, 294, 299, 300, 306-308, 311-313].

РОЗДІЛ 6

ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ ВИСОКОІНТЕНСИВНОГО ГАЗООЧИСНОГО ОБЛАДНАННЯ

Реалізацію розробленої методології вибору газоочисного обладнання з метою підвищення рівня екологічної безпеки при застосуванні досліджених конструкцій пилогазоочисного обладнання проводили на підприємствах теплоенергетики та хімічної промисловості.

6.1 Дослідно-промислове впровадження газоочисного апарата на Сумській ТЕЦ

6.1.1 Характеристика існуючого газоочисного обладнання та формулювання вимог підприємства-споживача

Існуюча система очищення газів на Сумській ТЕЦ включає в себе золоуловлювачі ВТІ з турбулентними коагуляторами Вентурі, встановлені після котлів ЦКТІ № 2, № 3 та передбачає очищення від золи. Зрошення скрубєрів проводиться водою. У конфузори коагулятора через форсунки подається вода, яка подрібнюється швидкісним газовим потоком на дрібні краплі. Летюча зола при проходженні з димовими газами через коагулятор частково осідає на краплях і на його зрошуваних стінках. Далі краплі і не вловлені частинки золи надходять в корпус апарату – відцентровий скрубєр, де димові гази звільнюються від крапель і додатково очищаються від золи, після чого димосмоком викидаються в атмосферне повітря. Ефективність очищення від золи існуючої системи становить 83 - 85 %. Очищення від газовидних домішок в існуючій системі не передбачене. Характеристика

газопилових викидів Сумської ТЕЦ наведена в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Характеристика газопилових викидів Сумської ТЕЦ

Джерело викидів	Кількість відхідних газів, м ³ /с	Температура, °С	Забруднююча речовина	Концентрація, мг/м ³
Котел ЦКТИ №2	32	57	Карбон (II) оксид	211
			Нітроген (IV) оксид	1670
			Зола	12300
			Сульфур (IV) оксид	1300
Котел ЦКТИ №3	32	58	Карбон (II) оксид	231
			Нітроген (IV) оксид	1580
			Зола	14800
			Сульфур (IV) оксид	1250

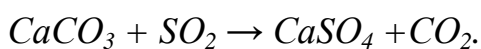
Існуюча система золоочищення характеризується високими витратами води, що призводить до транспортування великих об'ємів пульпи в золошлаконакопичувач та втрат води. З метою зменшення навантаження на навколишнє середовище підприємству необхідно також здійснювати очищення від газоподібних домішок, зокрема від сульфур (IV) оксиду.

Наведені дані дозволили сформулювати вимоги підприємства-споживача: вибір хемосорбента для очищення викидних газів від SO₂ з можливістю зменшення витрат води; вибір високоефективного обладнання, яке здатне працювати з запиленими потоками та має невисокі енергетичні витрати на проведення процесу пилогазоочищення.

6.1.2 Розробка рішень по удосконаленню системи газоочищення

З метою підвищення рівня екологічної безпеки для очищення відхідних газів Сумської ТЕЦ нами запропоновано застосування вапнякового методу, який дає можливість видаляти сульфур (IV) оксид одночасно із золовловлюванням [316].

При цьому хемосорбційне очищення проходить за наступною реакцією:



Переваги вапнякового методу: проста технологічна схема; низькі експлуатаційні витрати; доступність і дешевизна сорбенту; можливість очищення без попереднього охолодження і знепилювання відхідних газів. Недоліками методу є заростання обладнання гіпсом, що збільшує гідравлічний опір апарата та перешкоджає його стійкій роботі; корозія обладнання; утворення значної кількості осаду.

На основі проведених в розділі 5 досліджень встановлено, що застосування апаратів із регулярною рухомою насадкою та з провальними тарілками великих отворів при роботі в високотурбулентному гідродинамічному режимі дозволяє проводити процес у трифазних системах, уникнути заростання внутрішніх поверхонь і контактних пристроїв, що забезпечує стійку роботу обладнання. Таким чином, апарати даного типу слід рекомендувати для комплексного очищення газів із застосуванням в якості хемосорбенту суспензії вапняку.

Для проведення досліджень у промислових умовах запропоновано запатентований пилогазоочисний апарат (рис. 6.1) [317]. Апарат складається з трьох блоків – високоінтенсивного очищення (БВО), сепарації (БС) і тонкого очищення (БТО). БВО має циліндричний корпус діаметром 1,5 м і висотою 2,5 м, оснащений розподільними ґратами з вільним перетином

0,87 м²/м². У блоці встановлена регулярна рухома насадка, закріплена на вертикальних струнах. Насадкові елементи діаметром 40 мм виготовлені з пористої гуми й кріпляться на струнах із кроком по горизонталі 100 мм і по вертикалі 180 мм. БТО виконаний діаметром 3,5 м, висотою 4,0 м і містить дві ПТВО діаметром 150 мм і вільним перетином 0,21 м²/м², крок тарілок по вертикалі 1,4 м.

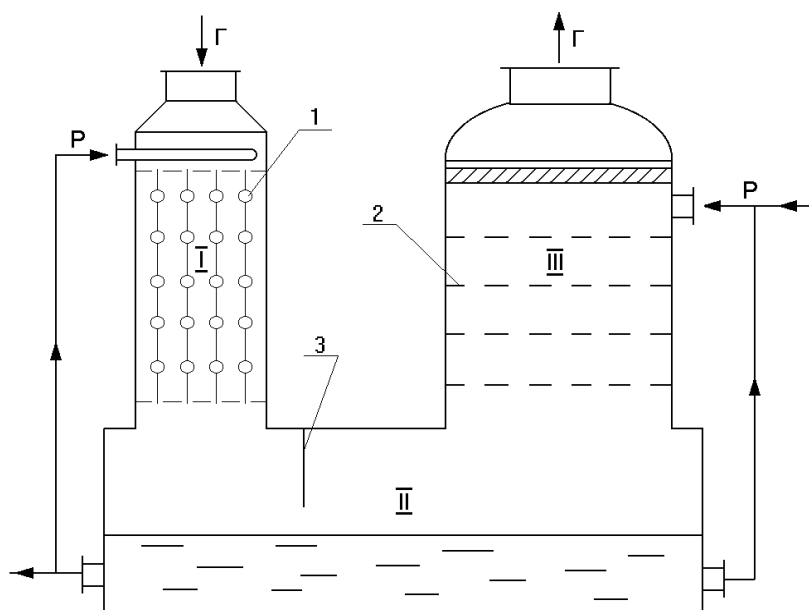


Рисунок 6.1 – Схема пилогазоочисного апарата: I – блок високоінтенсивного очищення; II – блок сепарації; III – блок тонкого очищення; 1 – регулярна рухома насадка; 2 – провальні тарілки великих отворів; 3 – відбійник

Апарат працює наступним чином. Запилений газ надходить у верхню частину БВО, який працює в режимі спадної прямотечії. Одночасно з подачею газу у верхню частину блоку через розподільний колектор подається абсорбент на зрошення. У результаті прямотечійного контакту фаз відбувається грубе очищення газів, які відходять, від дрібнодисперсних і середньодисперсних частинок золи та сульфур (IV) оксиду. Після БВО високошвидкісний газорідинний потік потрапляє в блок сепарації, де відбувається поділ фаз та інерційне осадження крупнодисперсних твердих частинок. У БТО, який працює

в протитечійному режимі, відбувається остаточне доочищення газу, який відходить, від пилу і хемосорбційне очищення від сульфур (IV) оксиду. Розроблений апарат включали в технологічну схему газоочищення (рис. 6.2) замість золоуловлювача ВТІ з турбулентними коагуляторами Вентурі.

В якості абсорбенту використовували 15% водну суспензію вапняку.

Продуктивність апарата – 100 тис.м³/год. Для попередження корозії внутрішні поверхні апарата захищали гумовим покриттям.

Застосування запатентованого апарата дозволило підвищити ступінь очищення відхідних газів при зниженні металоємності устаткування та енергетичних витрат на проведення процесу.

На дослідно-промисловій установці досліджували ефективність хемосорбції та пилоочищення в апараті.

Визначення концентрації сульфур (IV) оксиду проводилось фотометричним методом. Концентрація твердих частинок визначалась гравіметричним методом у відповідності до МВВ № 081/12-0161-05.

6.1.3 Дослідження ефективності газопилоочищення в запропонованому апараті

Дослідження залежності ефективності хемосорбції та пилоочищення в апараті від числа гіпотетичних тарілок у БВО (рис.6.3) показало, що при наявності 6 гіпотетичних тарілок у БВО (висота робочої зони 1,1 м) досягається ефективність очищення від пилу – 99,25%, ефективність очищення від сульфур (IV) оксиду – 98,4%; при висоті робочої зони БВО 1,45 м (8 гіпотетичних тарілок) ефективність очищення від пилу – 99,5%, ефективність очищення від сульфур (IV) оксиду – 98,5%.

Наведені дані свідчать про недоцільність збільшення висоти контактної зони БВО та кількості рядів насадки більше шести.

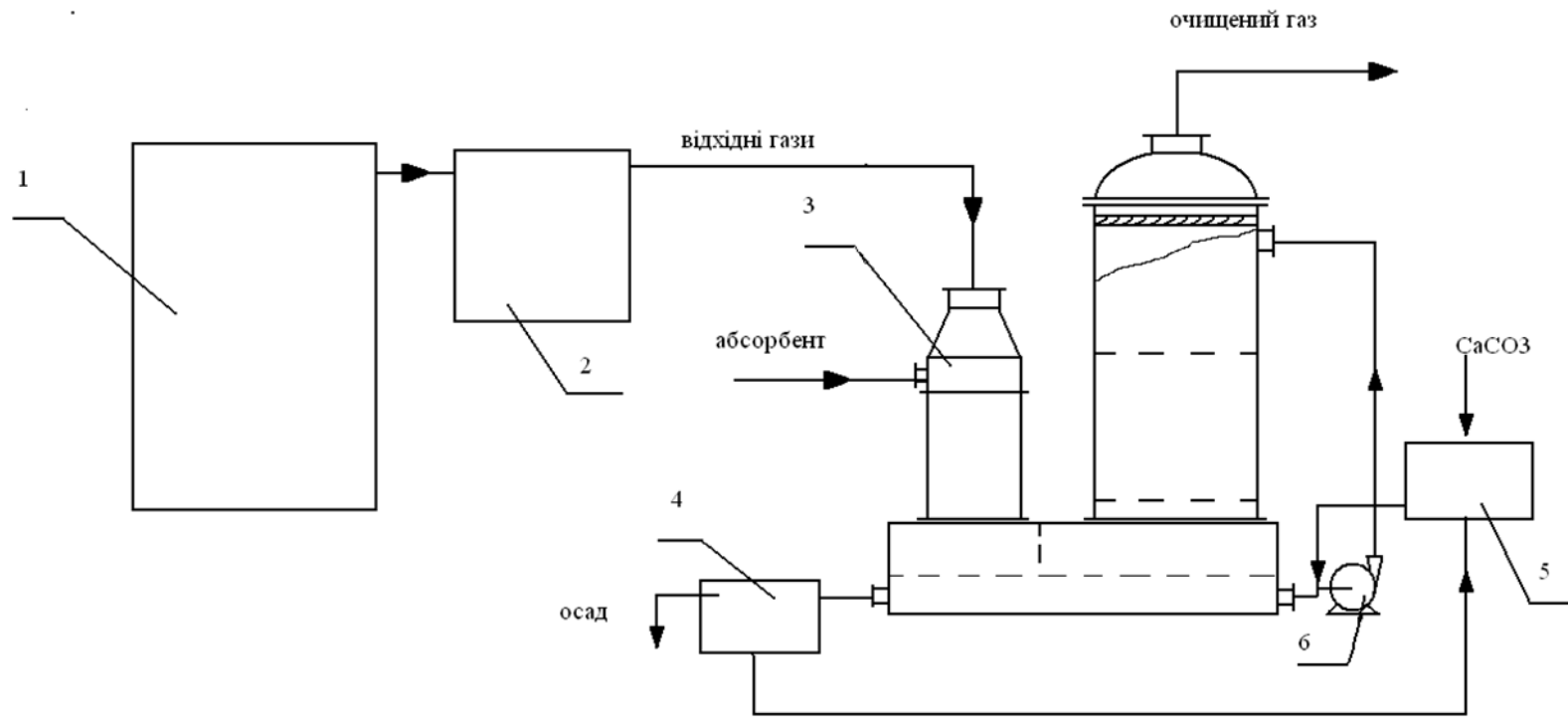


Рисунок 6.2 – Схема очищення газів: 1 – котел; 2 – теплообмінник; 3 – пилогазоочисний апарат; 4 – вакуум-фільтр; 5 – збірник поглинального розчину; 6 – насос

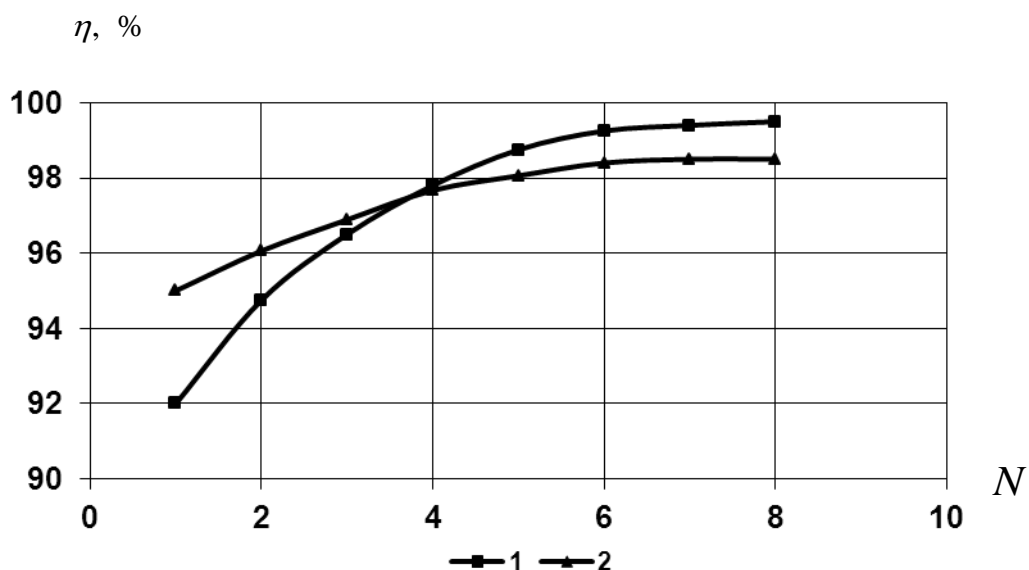


Рисунок 6.3 – Залежність ступеня абсорбції й ефективності пилоочищення в апараті від числа гіпотетичних тарілок у БВО:

1 – пилоочищення; 2 – абсорбція сульфур (IV) оксиду

Залежність ефективності уловлювання сульфур (IV) оксиду у БВО в першому наближенні можна представити у вигляді:

$$\eta_N = 1 - \exp(-kN), \quad (6.1)$$

де k – коефіцієнт, який залежить від гідродинаміки в блоці і фізико-хімічних властивостей контактуючих фаз;

N – число гіпотетичних тарілок.

Обробка експериментальних даних показує, що при збільшенні числа гіпотетичних тарілок відбувається зменшення значення коефіцієнта k за висотою блоку. Це пояснюється наявністю у відхідних газах пилу, який призводить до насичення сорбенту твердими частинками і поступового зниження ефективності очищення по висоті блоку. Зміна коефіцієнта k описується залежністю:

$$k = -1,5 \cdot 10^{-2} N + 0,3. \quad (6.2)$$

Ефективність хемосорбційного очищення газів, які відходять, у БТО складає 74% для однієї тарілки, що працює в режимі вторинного піноутворення.

Порівняльний аналіз розробленого нами апарата та існуючої системи пилогазоочищення (табл. 6.2) показав, що застосування апарата запропонованої конструкції призводить до підвищення ефективності очищення викидних газів від золи та сульфур (IV) оксиду. Крім цього, застосування низхідної прямої течії в БВО дозволяє знизити гідравлічний опір апарата. Ефективність апарата становить 99 - 99,3 % за твердими частинками і 97 - 98,5 % – за сульфур (IV) оксидом.

Таблиця 6.2 - Порівняльна характеристика систем газоочищення Сумської ТЕЦ

Найменування показників	Існуюча система	Розроблений апарат
Продуктивність, м ³ /год	100 тис.	100 тис.
Запиленість, г/м ³		
на вході	12 - 15	12 - 15
на виході	1,1- 1,3	0,1-0,2
Ефективність пилоочищення, %	83 - 85	99 - 99,3
Ефективність очищення від сульфур (IV) оксиду, %	-	97-98,5
Абсорбент	Вода	Водна суспензія вапняку
Гідравлічний опір, Па	12500	1500

Відпрацьований абсорбент подається на фільтрування, після чого очищена вода повертається на приготування абсорбенту, а отриманий у результаті фільтрування шлам, який містить сульфід кальцію відправляють у золовідвал, при цьому він сприяє герметизації дна відвалу та не забруднює ґрунтові води. Можлива переробка шламу в матеріал для дорожнього будівництва, що включає попереднє окислення (сульфіту в сульфат). Таким чином, проблема очищення відхідних газів вирішується, не створюючи додаткової проблеми щодо очищення стічних вод.

6.1.4 Рекомендації з проектування й експлуатації розробленого апарата

Застосування розробленого апарата доцільне для очищення запилених газів або газів, які утворюють у процесі очищення відкладення, що призводять до забивання очисного устаткування. Апарат рекомендується для роботи в широкому діапазоні навантажень по фазах і концентраціях пилу до 50 г/м^3 .

Проектування розробленого апарата передбачає визначення геометричних розмірів, гідравлічного опору та режимів роботи кожного із блоків з метою забезпечення заданого ступеня очищення газів, що відходять. При проектуванні пилогазоочисного устаткування необхідно забезпечити співвідношення конструктивних і режимних параметрів, які визначають мінімум витрат і скоригованих на основі експериментальних і теоретичних досліджень і досвіду промислової експлуатації.

При виборі геометричних характеристик насадки, тарілок і розподільних ґрат необхідно виходити з вимоги досягнення мінімального гідравлічного опору, рівномірного розподілу рідкої фази по перетину блоків. Крім того, при проведенні процесів хемосорбції запилених газів у трифазних системах, необхідно застосовувати контактні пристрої, стійкі до заростання, з урахуванням можливого впливу зміни в'язкості поглинача на гідродинамічну

обстановку в апараті. Матеріали для виготовлення контактних пристроїв повинні бути хімічно інертні до сполук, які беруть участь у процесі хемосорбції, і продуктів реакцій.

Коридорне розташування елементів насадки в БВО сприяє найбільш рівномірному розподілу рідкої фази в реакційному об'ємі блоку.

Насадка виконується з елементів сферичної форми діаметром 40 мм, закріплених на рухомих струнах. Елементи насадки розташовуються по вертикалі на відстані 180 мм, по горизонталі – 100 мм.

При визначенні режимів роботи апарата необхідно враховувати особливості гідродинаміки кожного з блоків.

Одним із важливих завдань, які виникають при проектуванні пилогазоочисного устаткування, є визначення верхньої і нижньої меж стійкої роботи апарата, що визначаються режимами роботи кожного з його блоків. При цьому повинна досягатися висока ефективність масообмінних процесів і пиловловлення, що у значній мірі визначається гідродинамічним режимом роботи апарата.

Нижня межа роботи БВО визначається припиненням ефекту вихороутворення на елементах насадки, верхня – початком вторинного бризковиносу в блоці сепарації. Діапазон рекомендованих швидкостей газу в БВО лежить в межах $w_2 = 12 - 15$ м/с, що відповідає мінімальним питомим енерговитратам на очищення газу.

При запуску промислового апарата, який має БВО з регулярною рухомою насадкою і працює в режимі спадної прямої течії, необхідно враховувати можливість виникнення явища резонансного коливання газорідного потоку. З метою запобігання цьому явищу апарат виводять на робочий режим по газовій фазі, а потім подається рідина на зрошення БВО.

Для проектування і розрахунку БТО необхідним є визначення нижньої межі режиму вторинного піноутворення, виникнення якого характерне для ПТВО.

Нижню межу швидкості газу, при якій настає режим вторинного піноутворення, визначаємо за залежністю [125]:

$$\frac{w_{кр}^2}{S_0 g d_0} \cdot \frac{f_z}{\rho_z} = B \cdot \exp \left[-4 \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_z}{\rho_p} \right)^{0,125} \right], \quad (6.3)$$

де $w_{кр}$ – критична швидкість газу, яка відповідає виникненню режиму вторинного піноутворення, м/с;

B – коефіцієнт, який залежить від діаметра отворів тарілки (для $d_0=150$ мм $B = 0,65$).

Під час виходу на робочий режим у БТО можуть спостерігатися коливальні явища. При витіканні рідини з отворів може спостерігатися виникнення гідравлічної нестійкості в газорідинному шарі, що сприяє посиленню коливань. Крім того, в газорідинному шарі може відбуватися накопичення і провал рідини по всіх отворах одночасно. Це викликає пульсації тиску з великою амплітудою і малою частотою. Провал рідини з окремих отворів сприяє розгойдуванню рідини з утворенням поперечних хвиль. Цей режим характеризується неоднорідністю розподілу фаз і існує в діапазоні швидкостей газу 1,5 – 2,5 м/с. Збільшення швидкості газу призводить до зменшення коливань і переходу в режим вторинного піноутворення. Значення пульсацій визначається співвідношенням інерційних сил газу, гравітаційних сил рідини, фізичними властивостями системи і геометричними характеристиками тарілки. Зменшення неоднорідності розподілу фаз і поздовжнього перемішування досягається при поздовжньо-поперечному секціонуванні робочої зони апарата.

Верхня межа роботи БТО визначається виникненням надмірного бризковинесення і визначається за залежністю (5.79).

Проведений аналіз показав, що верхня межа роботи БТО в залежності від конструктивних особливостей і режимних параметрів становить 3,5 - 4,7 м/с. Таким чином, робочий діапазон навантажень за газом в БТО

відповідає швидкості газу 2,5 – 3,5 м/с.

БВО може працювати в діапазоні щільностей зрошення $L = 5 - 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$. При очищенні газів, які мають тверді складові, а також у випадку застосування в якості зрошувальної рідини суспензій, щільність зрошення повинна бути не меншою $30 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$. Витрата рідкої фази визначається з матеріального балансу блоку. При поглинанні легкокорозинних газів досить забезпечувати щільність зрошення $L = 5 - 30 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$, для важкорозинних газів $L = 40 - 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$. Зменшення щільності зрошення призводить до зменшення площі контакту фаз, зменшення середньої рушійної сили процесу і необхідності підвищення висоти блоку. Збільшення щільності зрошення призводить до збільшення витрати абсорбенту й енергоємності процесу.

Геометричні характеристики блоків визначаються, виходячи з заданої продуктивності устаткування і швидкостей, які рекомендуються у кожному із блоків, відповідно до рівняння витрати.

Сумарна ефективність газоочищення в апараті визначається ефективністю роботи кожного з блоків. Ефективність пиловловлення в апараті в загальному вигляді виражається залежністю:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{\text{БВО}})(1 - \eta_{\text{БС}})(1 - \eta_{\text{БТО}}). \quad (6.4)$$

При проведенні процесу пиловловлення полідисперсної системи з розподілом фракційного складу, близьким до нормального логарифмічного, ефективність гіпотетичної тарілки складає $\eta_{\text{ГТ}} = 29\%$, ефективність блоку сепарації – $\eta_{\text{БС}} = 23\%$, ефективність ПТВО – $\eta_{\text{ПТВО}} = 68\%$.

При розрахунку ефективності процесу пилогазоочищення в БВО необхідно враховувати, що ефективність очищення на першій гіпотетичній тарілці становить 65-70% максимальної. Недостатньо ефективна робота початкової ділянки блоку пояснюється її нестійкою гідродинамікою.

При очищенні викидів від пилу і легкокорозивних газів збільшення висоти блоку більше 1,5м є недоцільним через незначне подальше підвищення ефективності пилогазоочищення.

При виконанні технологічного розрахунку апарата доцільно використовувати метод ітерацій. При цьому виконуються по чергові розрахунки ступеня пиловловлення і газоочищення, з подальшим уточненням і коригуванням результатів.

Повний гідравлічний опір досліджуваного апарата буде складатися із суми гідравлічних опорів кожного блоку:

$$\Delta P = \Delta P_{БВО} + \Delta P_{БС} + \Delta P_{БТО}. \quad (6.5)$$

Гідравлічний опір БВО визначається по залежності (5.14).

Він значно менший гідравлічного опору інших блоків, і в залежності від режиму роботи, змінюється в межах 15 - 25 Па.

Гідравлічний опір блоку сепарації визначається відповідно до залежності:

$$\Delta P_{БС} = \xi_{\text{бс}} \frac{\rho_g w_2^2}{2}. \quad (6.6)$$

При роботі БТО в режимі вторинного піноутворення, гідравлічний опір тарілки визначається за залежністю (5.2).

Гідравлічний опір блоку тонкого очищення визначається за залежністю (5.3):

$$\Delta P_{БТО} = n \Delta P_{ПТВО}. \quad (6.7)$$

6.2 Дослідно-промислове впровадження апарата з ПТВО на Охтирській ТЕЦ

6.2.1 Характеристика джерел викидів та формулювання вимог підприємства – споживача

На Охтирській ТЕЦ встановлено шість котлоагрегатів: ТС -35у –3 шт., КВ-ГМ – 50 – 2 шт; ДЕ 10-14/250 ГМ, паливом для яких є природний газ. Очищення відхідних газів не здійснюється.

Характеристика викидів Охтирської ТЕЦ наведена в табл. 6.3.

З метою зменшення навантаження на навколишнє середовище підприємству необхідно здійснювати очищення від газовидних домішок. Наведені дані дозволили сформулювати вимоги підприємства – споживача: вибір хемосорбента для очищення відхідних газів від нітроген (IV) оксиду з можливістю зменшення витрат води; вибір високоінтенсивного обладнання, яке має невисокі енергетичні витрати на проведення процесу газоочищення.

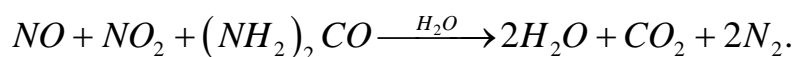
Таблиця 6.3 – Характеристика викидів Охтирської ТЕЦ

Об'єм відхідних газів, м ³ /с	Температура, °С	Найменування забруднюючої речовини	Концентрація, мг/м ³
103	96	Карбон (II) оксид	204,66
		Нітроген (IV) оксид	600,31

6.2.2 Розробка рішень по вибору хемосорбента та газоочисного обладнання

З метою підвищення рівня екологічної безпеки нами запропоновано застосування в якості абсорбенту розчину діамінометанолу [318].

Процес проходить за реакцією:



Переваги даного методу: висока ефективність очищення, проста технологічна схема; можливість очищення без попереднього охолодження відхідних газів; ефективність очищення фактично не залежить від коливань концентрації забруднюючої речовини у відхідних газах; рН абсорбційного розчину змінюється від 6 до 9, це не призводить до корозії внутрішніх поверхонь апаратів; в результаті очищення утворюються нетоксичні речовини.

Експериментальними дослідженнями [318] встановлено, що для очищення димових газів від карбон (IV) оксиду більше ніж на 95%, час перебування газів в апараті має становити 0,5-1,5 с. Ступінь очищення зростає зі збільшенням часу перебування, однак при малих швидкостях газу (менше 0,2 м /с) вона знижується внаслідок зростання товщини дифузійного граничного шару. Необхідна питома щільність зрошення – від 0,3 до 1 дм³ на 1 м³ відхідного газу.

Наведені вимоги до режимних параметрів проведення абсорбції можна реалізувати в апаратах з ПТВО, в яких при високошвидкісному русі газового потоку утворюються газорідні шари великої висоти, що збільшує час перебування відхідних газів в зоні контакту. Розвинутий турбулентний режим в апараті дозволяє працювати з потоками, забрудненими твердою фазою.

Для проведення досліджень у промислових умовах нами був запропонований запатентований газоочисний апарат з ПТВО та стабілізатором пінного шару (рис. 6.4) [319].

Діаметр апарата – 3,5 м, висота – 4,0 м в апараті встановлені дві провальні тарілки з отворами 0,15 м і вільним перетином 21,5%. Продуктивність апарата – 100 тис. м³/год.

Апарат працює таким чином. В середину корпусу 1 через вхідний патрубок 2 подається забруднений газ. Одночасно у верхню частину апарата через зрошувальний пристрій 8 подають абсорбент. Очищений газ виводиться із апарата через патрубок 3, а абсорбент – через патрубок 5. Апарат оснащений стабілізаторами 7, розміщеними в газорідинному шарі над тарілкою з метою попередження поздовжніх коливань газорідинного шару. Завдяки розміщенню стабілізатора в зоні пульсацій газорідинного шару, в апараті створюється більш рівномірна поверхня контакту газової і рідинної фаз. У той же час спостерігається рівномірний розподіл локального газовмісту пінного шару за поперечним перерізом колони (включаючи простір поблизу стінок і тарілки).

Дослідно-промислові випробування проводили при швидкості газу 2,5 - 3,5 м/с та щільності зрошення 15 - 20 м³/(м²·год), що відповідає режиму вторинного піноутворення.

В якості абсорбенту використовували розчин діамінометаналю концентрацією 40 г/л. При підтримці постійної концентрації діамінометаналю абсорбент можна використовувати до концентрації сульфату амонію, який утворюється в процесі взаємодії, до 350 г/л. Сульфат амонію можна виділити у вигляді готового продукту або переробити в гіпс.

Результати дослідно-промислових випробувань наведені в таблиці 6.4.

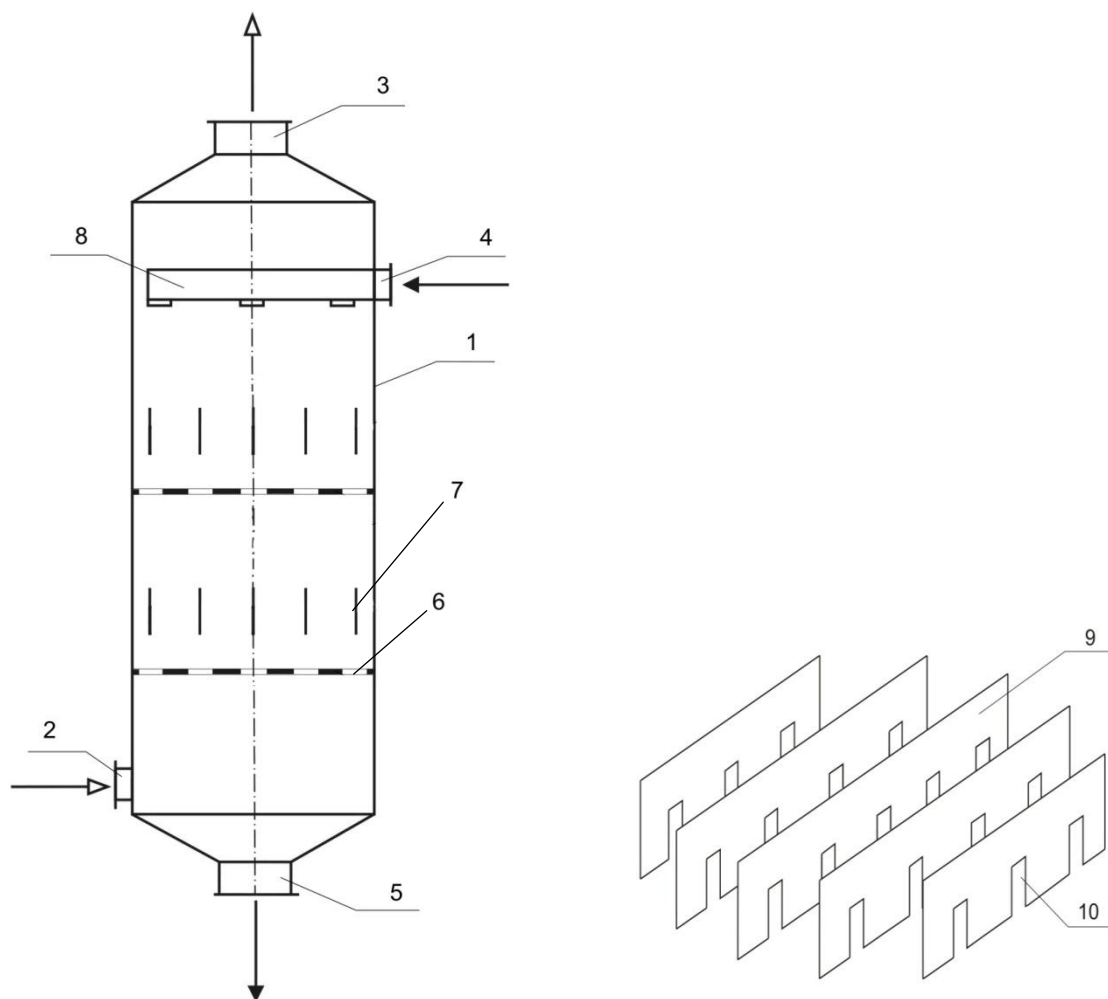


Рисунок 6.4 – Промислова установка з ПТВО:

1 – корпус; 2 – вхідний патрубок для газу; 3 – вихідний патрубок для очищеного газу; 4 – патрубок для вводу рідини; 5 – патрубок для відведення рідини; 6 – тарілка; 7 – стабілізатор; 8 – розподільний пристрій для рідини; 9 – пластина стабілізатора; 10 – пази

Таким чином, установка газоочисного апарата з ПТВО запатентованої конструкції при застосуванні в якості абсорбенту розчину діамінометаналю дозволила досягти високої ефективності очищення відхідних газів при невисоких витратах води та можливості утилізації відпрацьованого абсорбенту.

Таблиця 6.4 – Результати дослідно-промислових випробувань

Температура відхідних газів	Концентрація NO ₂ на вході в апарат C _n , мг/м ³	Концентрація NO ₂ на виході із апарата C _к , мг/м ³	Ефективність очищення, %
96	600	33	94,5

6.3 Дослідно-промислове впровадження газоочисного апарата на ПАТ «Сумихіпром»

6.3.1 Характеристика існуючого газоочисного обладнання та формулювання вимог підприємства-споживача

В існуючому виробництві титану (IV) оксиду передбачена очистка викидів в атмосферу твердих і газоподібних компонентів в газоочисному обладнанні, характеристики якого наведені в табл. 6.5 [320].

У процесі сушіння ільменітового концентрату димові газу разом з пилом ільменіту нагнітаються вентиляторами в батарейні циклони, потім проходять через мокрий скруббер і викидаються в атмосферу. Сумарна ефективність пилоочищення не перевищує 92%, що зумовлено як дисперсним складом, так і фізико-хімічними властивостями пилу ільменіту. При цьому концентрація пилу повинна становити менше ніж 1 г/м³, відповідно до регламенту виробництва. Під час розмелу ільменітового концентрату повітря з домішками пилу із розмельного обладнання нагнітається вентиляторами в циклон, потім проходить через рукавний фільтр і викидається в атмосферу з масовою концентрацією пилу менше 1 г/м³. Загальна ефективність очистки газу від пилу становить до 84%.

У процесі прокалювання гідратованого титан (IV) оксиду газу, що

утворюються в результаті згоряння природного газу, випаровування води і розкладення сульфатів температурою 375^0-400^0C , потрапляють у газоочисну установку. Газовий потік забруднений пилом титан (IV) оксиду. Газоочисна установка складається із сатуратора, скрубера Вентурі, амоніачного скрубера та димових насосів. Сумарна ефективність системи пилоочищення не перевищує 92%, що зумовлено дрібнодисперсним складом пилу та його високими адгезійними властивостями. У процесі пилоочищення пил налипає на стінках порожнистого скрубера. Крім того, процес газоочищення проводиться при великих щільностях зрошення, що призводить до утворення великих об'ємів шламу. Під час розмелу на роликово-маятниковому млину повітря з домішками пилу титан (IV) оксиду очищується в рукавному фільтрі і з масовою концентрацією до $0,6 \text{ г/м}^3$ викидається в атмосферу. Ефективність очищення газу від пилу складає близько 95%.

Дослідження технологічного процесу виробництва титан (IV) оксиду та паспортизація пилу, який утворюється на різних стадіях виробництва показали, що викидні гази містять дрібнодисперсний та дуже дрібнодисперсний пил, здатний до налипання. Це знижує ефективність роботи пилоочисного обладнання та призводить до його нестійкої роботи. Характеристика пилогазових викидів наведена в табл. 6.6.

Наведені дані дозволили сформулювати вимоги підприємства-споживача: вибір високоінтенсивного пилоочисного обладнання, яке має високу ефективність уловлення дрібнодисперсного пилу, забезпечує стійку роботу при роботі з пилом, схильним до злипання, та має невисокі енергетичні витрати на проведення процесу пилоочищення.

Таблиця 6.5 – Параметри газоочисного обладнання цеху по випуску титан (IV) оксиду

Стадія виробництва	Найменування джерела утворення ЗР	Найменування ГОУ	Найменування ЗР	Параметри ГПП на вході у ГОУ				Ступінь очищення, %
				Об'ємна витрата, м ³ /с	t, °C	Масова концентрація ЗР, 10 ⁻³ г/м ³	Масова витрата ЗР, 10 ⁻³ кг/с	
Прокалка	Прожарювальна піч	Вод.скруббер	SO ₂	2,5	375	14,68	36,7	78
		Вентури, аміач.скруббер	H ₂ SO ₄	2,5	375	1,2	3	78
Розмол ільменіту	Кульовий млин	аміач.скруббер	Тв.частки	2,5	375	2,5	6,25	92
		Циклон	Тв.частки	1,25	80	38,16	47,7	72
Сушка ільменіту	Сушильна піч	Рук.фільтр	Тв.частки	1,36	70	9,98	13,57	84
		Скрubber	Тв.частки	1,6	100	32,4	51,84	79
Розмол TiO ₂	Млин	Рук.фільтр	Тв.частки	0,39	30	10,1	3,94	95

Таблиця 6.6 – Характеристика пилогазових викидів виробництва титан (IV) оксиду

Стадія виробництва	Кількість газу, що надходить у пилоочисну систему, тис. м ³ /год	Вміст пилу, г/м ³
Сушіння ільменіту	11,5	32,4
Розмелювання ільменіту	18,9	20,5 – 40,2
Прожарювання	18,4	2,3 – 2,4
Розмелювання TiO ₂	4,9	8,5 – 12,8

6.3.2 Розробка рішень по удосконаленню системи пилогазоочищення виробництва титану (IV) оксиду

Для очищення газів, які відходять на розглянутих стадіях виробництва титан (IV) оксиду, застосовувався запатентований апарат з ПТВО [319].

Результати дослідження ефективності пиловловлення наведені в табл. 6.7 та на рис. 6.5.

Таблиця 6.7 – Значення ефективності пилоочищення, %, для різних швидкостей газу та щільності зрошення в апараті

Вид пилу та щільність зрошення апарату	Ефективність пилоочищення, %, при швидкості газу, м/с			
	2,5	2,9	3,2	3,5
Пил TiO ₂ , L = 15 м ³ /(м ² ·год)	80	89	94,5	96
Пил TiO ₂ , L = 20 м ³ /(м ² ·год)	83	93	98	99,2
Ільменіт, L = 15 м ³ /(м ² ·год)	85	92	96	98
Ільменіт, L = 20 м ³ /(м ² ·год)	88	94	98,5	99,5

Згідно з рис. 6.5 ефективність очищення газу від титану (IV) оксиду в промислових умовах становить 99,2%, що відповідає дослідженням на лабораторній моделі. Розроблений апарат пропонується включити в технологічну схему на перелічених стадіях виробництва титан (IV) оксиду замість існуючого пилогазоочисного обладнання (рис. 6.6 – 6.8) [320- 322].

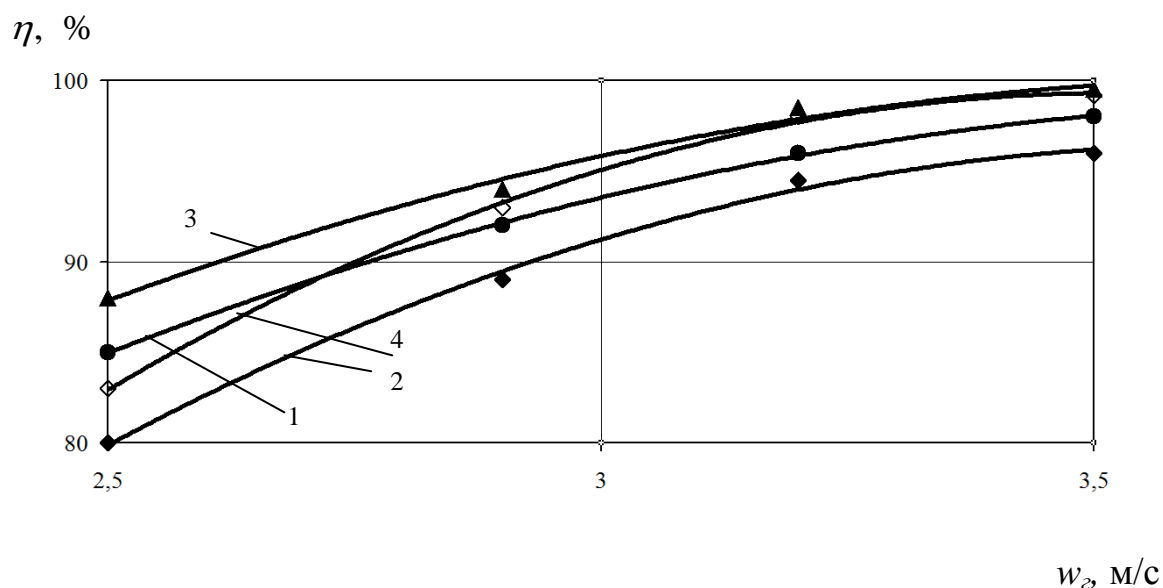


Рисунок 6.5 – Залежність ефективності пилловловлення від швидкості газу: 1 – пил ільменіту при $L = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; 2 – пил титану (IV) оксиду при $L = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; 3 – пил ільменіту при $L = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; 4 – пил титану (IV) оксиду при $L = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$

6.3.3 Оцінка зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря

З метою прогнозної оцінки стану екологічної безпеки регіону проведено аналіз розсіювання пилу ільменіту та титан (IV) оксиду до і після можливої заміни пилоочисного апарату (частки ГДК для населених місць) та наведено порівняльні карти розсіювання, отримані в програмі ЕОЛ (Додаток

Г).

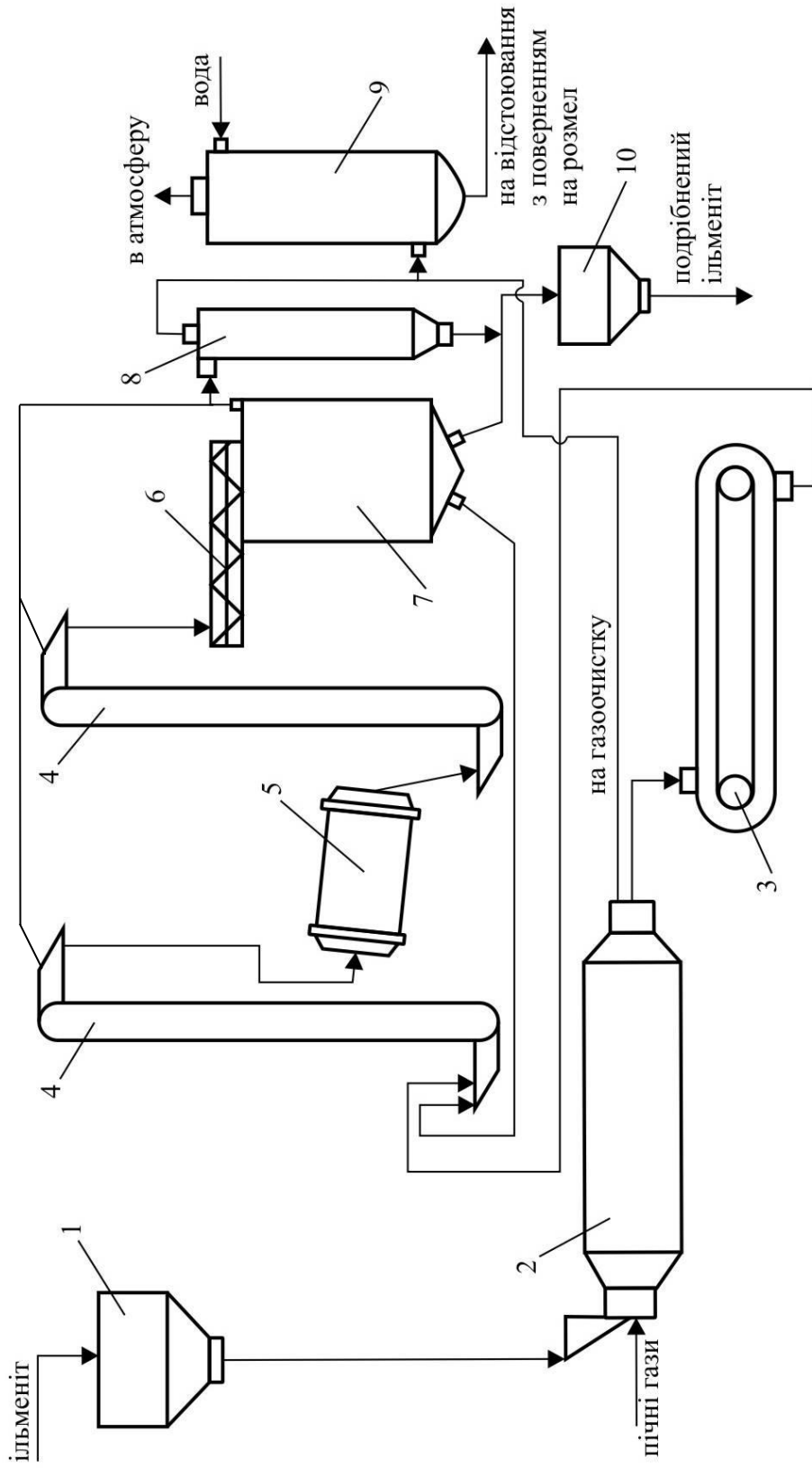


Рисунок 6.6 - Запропонована схема очищення газів на стадії сушки ільменітового концентрату:

1 – витратний бункер; 2 – сушильний барабан; 3 – скребковий транспортер; 4 – елеватор; 5 – трубний млин; 6 – живильник; 7 – повітряний сепаратор; 8 – циклон; 9 – апарат з ПТВО; 8 – бункер видачі

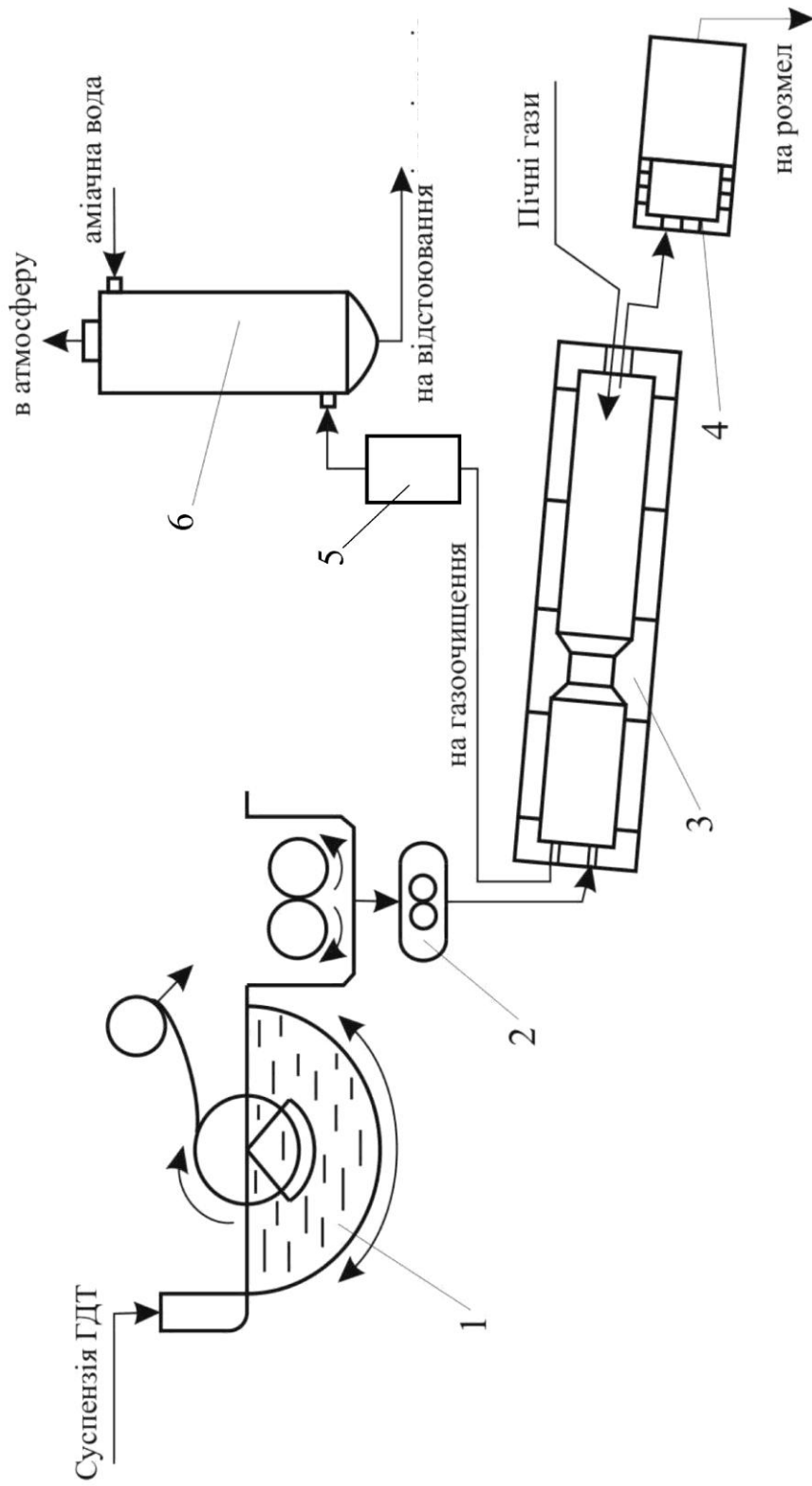


Рисунок 6.7 - Запропонована схема очищення газів на стадії фільтрації і прокалювання титан (IV) оксиду: 1 – барабанний вакуум-фільтр (прес-фільтр); 2 – шестеренчастий насос; 3 – прожарювальна піч; 4 – холодильний барабан; 5 – пилова камера; 6 – апарат з ПТВО

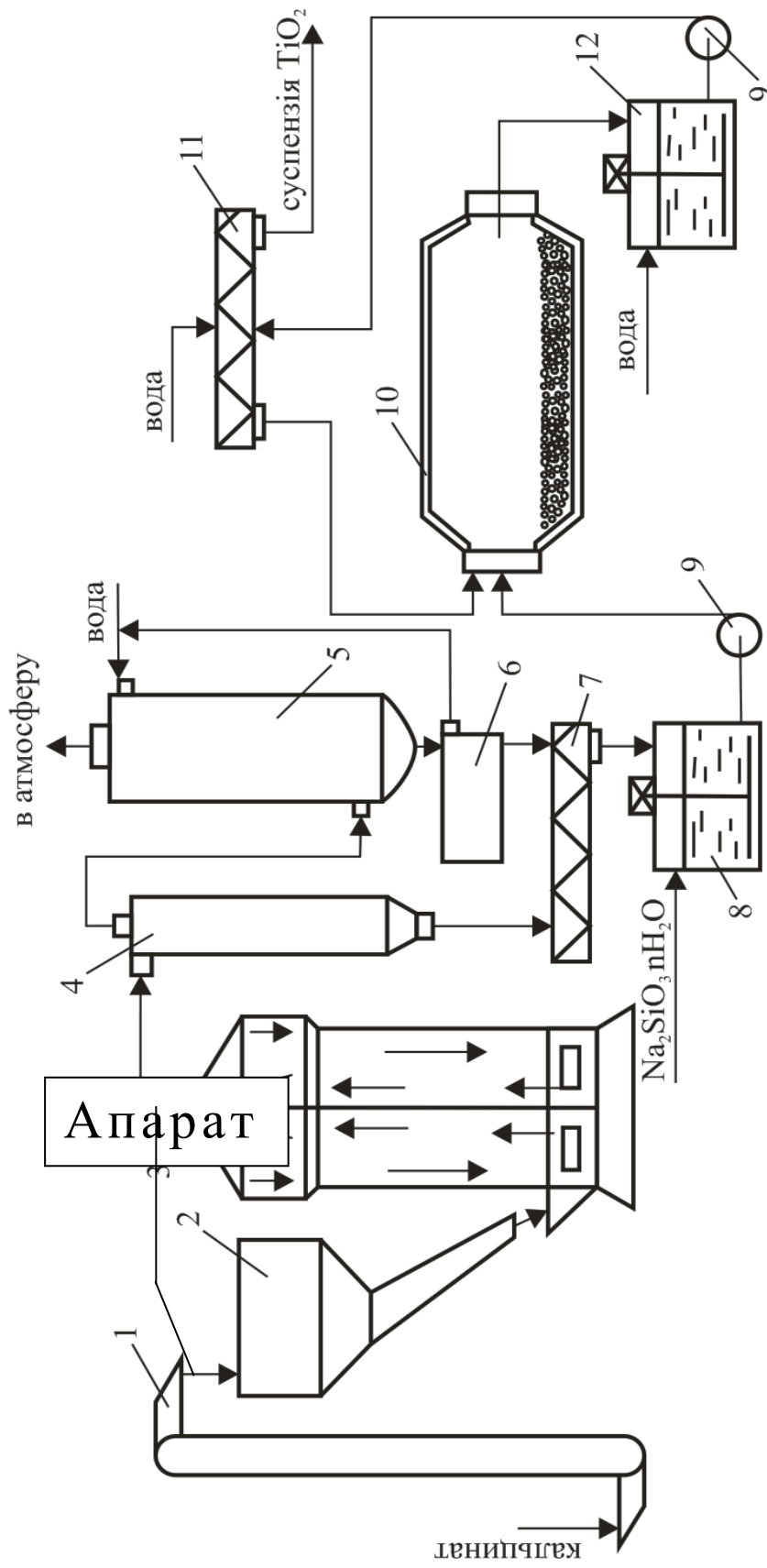


Рисунок 6.8 - Запропонована схема очищення газів на стадії сухого і мокрого розмелу титан (IV) оксиду:

1 1– елеватор; 2 – бункер-накопичувач; 3 – млин Раймонда; 4 – циклон; 5 – апарат з ПТВО; 6 – відстійник;
7 – шнек; 8 – репульгатор; 9 – насос; 10 – млин мокрого розмелювання; 11 – відстійна центрифуга; 12 – збірна

ЄМНІСТЬ

Як видно з карт, на межі СЗЗ концентрація пилу ільменіту зменшилась майже в 15 разів (до 0,1 ГДК для населених пунктів), а пилу TiO_2 – до рівня, що менший за значення ГДК для населених пунктів майже в 4,5 рази, що суттєво впливає на екологічний стан довкілля в районі розташування підприємства.

Розрахунок відвернутого збитку від забруднення атмосферного повітря наведено в Додатку Д. Еколого-економічний ефект від застосування високоінтенсивного газоочисного обладнання запатентованих конструкцій становить: по Сумській ТЕЦ – 2 282 666,26 грн; Охтирській ТЕЦ – 977 812, 71 грн; ПАТ «Сумхімпром» – 75 391,95 грн.

Висновки до розділу 6

З метою підвищення рівня екологічної безпеки шляхом поліпшення якості атмосферного повітря розроблені та запатентовані конструкції пилогазоочисного обладнання, які пройшли промислову апробацію на Сумській ТЕЦ, Охтирській ТЕЦ ТОВ та ПАТ «Сумхімпром», що підтверджено актами впровадження (Додаток Е)

Проведено аналіз утворення пилогазових викидів та існуючого пилогазоочисного обладнання підприємств та розроблено пропозиції щодо заміни існуючого обладнання на запатентовані конструкції апаратів з ПТВО та РРН.

Порівняльний аналіз розроблених апаратів й існуючих систем пилогазоочищення показав, що застосування апаратів запропонованої конструкції призводить до підвищення ефективності очищення викидних газів від твердих частинок та газовидних забруднювачів: золи - 99 - 99,3%; пилу титан (IV) оксиду – 99,2% та пилу ільменіту – 99,5%; ефективність очищення від сульфур (IV) оксиду 97- 98,5%, від нітроген (IV) оксиду – 95%.

Еколого-економічний ефект від застосування високоінтенсивного газоочисного обладнання запатентованих конструкцій становить: по Сумській ТЕЦ – 2 282 666,26 грн; Охтирській ТЕЦ – 977 812, 71 грн; ПАТ

«Сумихімпром» – 75 391,95 грн.

Випробуваннями дослідно-промислових установок в умовах очищення газових викидів неоднорідного компонентного складу підприємств теплоенергетики та хімічної промисловості підтверджено високу ефективність і можливість комплексного очищення відхідних газів на основі інтенсифікації процесів газоочищення за рахунок вибору оптимальних режимних параметрів проведення процесу.

Проведені дослідження показали ефективність застосування розробленої методології вибору газоочисного обладнання для зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [317, 319- 322].

Загальні висновки

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну проблему – розроблено наукові засади підвищення рівня екологічної безпеки промислових підприємств та поліпшення якості атмосферного повітря населених пунктів при удосконаленні систем газоочищення. Отримані результати дали можливість обґрунтувати вибір, дослідити та впровадити високоефективні конструкції газоочисного обладнання для комплексного очищення відхідних газів – апарати з регулярною рухомою насадкою та апарати з провальними тарілками великих отворів.

1. Розглянуто основні компоненти управління екологічною безпекою при забрудненні атмосферного повітря відхідними газами промислових підприємств. Для оцінки стану екосистем та здоров'я людини при забрудненні атмосферного повітря введено поняття «поріг техногенного впливу». Показано, що одним із факторів, які сприяють досягненню прийняттого рівня екологічної безпеки, є впровадження природоохоронних заходів щодо удосконалення газоочисного обладнання.

2. Проведене прогнозування впливу газопилових викидів промислових підприємств на стан екологічної безпеки населених пунктів шляхом розробки математичних моделей розсіювання шкідливих речовин на основі рівняння конвективної дифузії. Урахування опору житлової забудови та дисперсності пилу дозволило отримати вирази для визначення концентрації забруднюючих речовин та підтвердило необхідність розробки природоохоронних заходів щодо зменшення концентрації шкідливих речовин у відхідних газах промислових підприємств для забезпечення екологічної безпеки атмосферного повітря населених пунктів.

3. Проведений системний аналіз факторів впливу на стан екологічної безпеки при забрудненні атмосферного повітря, що дозволило при розгляді факторів впливу на велику систему «екологічна безпека» виявити місце конкретного природоохоронного процесу в забезпеченні рівня

екологічної безпеки та визначити шляхи оптимізації процесів газопилоочищення. В якості параметра оптимізації прийнято інтенсивність процесу, що дозволило виявити фактори, які враховуються при виборі газоочисного обладнання: гідродинамічний режим та конструктивні особливості апарата.

4. На основі проведеного аналізу розроблена методологія вибору пилогазоочисного обладнання для очищення відхідних газів промислових підприємств, яка враховує вимоги галузей-споживачів і підприємств-виробників газоочисного обладнання, а також сучасний рівень наукових розробок, дозволяє сформулювати блок основних завдань та виробити шляхи їх реалізації. Розроблена класифікація газоочисного обладнання, при використанні гідродинамічних та конструктивних параметрів інтенсифікації газоочисних процесів, а також енергетичних витрат на проведення процесу, дозволила виявити позитивні ознаки апаратів з вихоровою та швидкісною взаємодією потоків і вибрати для дослідження апарати з ПТВО та РРН.

5. Врахування кінетичних параметрів оптимізації процесу газоочищення дозволило розробити вимоги до вибору абсорбенту. Розроблена математична модель процесу хемосорбції, яка з використанням положень плівкової теорії дозволила отримати вирази для визначення концентрації абсорбенту по висоті контактної зони та для визначення фактору інтенсифікації процесу абсорбції при протіканні хімічної реакції.

6. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження апаратів з ПТВО та РРН показали їх високу ефективність та низьку енергоємність, що свідчить про правильність розроблених положень методології вибору газоочисного обладнання та застосування критеріїв оптимізації. У результаті проведених досліджень встановлені робочі режими роботи апаратів, вплив гідродинамічних та конструктивних параметрів на ефективність процесів газоочищення та пилловловлення. Отримані регресійні залежності впливу режимних та конструктивних параметрів на ефективність процесів пилогазоочищення в апаратах з ПТВО; залежності ефективності

пиловловлення від горизонтального та вертикального кроку розташування насадкових тіл в апараті з РРН. Отримані теоретичні залежності для розрахунку коефіцієнтів масовіддачі в рідкій та газовій фазах на основі використання гідродинамічної аналогії між тертям та масоперенесенням, дисипативного підходу, моделі короткочасного контакту фаз.

7. За результатами досліджень отримано два патенти України на конструкції пилогазоочисних апаратів. Реалізація розробленої методології вибору газоочисного обладнання та запатентованих конструкцій пилогазоочисного обладнання проводилась на Сумській ТЕЦ, Охтирській ТЕЦ та на ПАТ «Сумхімпром», у системі пилоочищення виробництва титану (IV) оксиду. Результати дисертаційних досліджень передані до ДП «Український науково-технічний центр «Енергосталь», м. Харків, Державного науково-дослідного і проектного інституту основної хімії «НІОХІМ», м. Харків та ПрАТ Інститут «Сумипроєкт».

Список джерел літератури

1. Державна служба статистики України. Статистична інформація. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<http://www.ukrstat.gov.ua/>
2. Стратегія державної екологічної політики України на період до 2020 року. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<http://www.menr.gov.ua/about/strategy>
3. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера / В.И. Вернадский. – М.: Айрис-пресс, 2004. – 576 с.
4. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні в 2014 році. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<http://www.menr.gov.ua/docs/activity-dopovidi/NacDopovid2014.pdf>
5. Реймерс Н. Ф. Охрана природы и окружающей человека среды: Словарь-справочник / Н.Ф. Реймерс. – М.: Просвещение, 1992. – 320 с.
6. Биченок М.М. Проблеми природно-техногенної безпеки в Україні / М.М. Биченок, О.М. Трофімчук.– К.: УІНСіР, 2002.– 179 с.
7. Экология, охрана природы и экологическая безопасность / под ред. В.И. Данилова-Данильяна. – М.: Изд. МНЭПУ, 1997. – 744 с.
8. Качинський А.Б. Екологічна безпека України: аналіз, оцінка та державна політика / А.Б. Качинський, Т.А. Хміль. – К.: НІСД, 1997. – 127 с.
9. Шмандий В.М. Стратегия управления экологической безопасностью: общие теоретические положения и региональный аспект / В.М. Шмандий // Вісник КДПУ.– Кременчук: КДПУ.– 2003.– Вип. 2 (19).– С.160-163.
10. Шмандий В.М. Теоретические и практические основы управления техногенной безопасностью на региональном уровне / В.М. Шмандий // Захист довкілля від антропогенного навантаження: Зб.наук.праць.– Харків-Кременчук: ХНУ.–2001.– Вип.4(6).–С.95-100.
11. Реймерс Н.Ф. Экология (теория, законы, правила, принципы, гипотезы) / Н.Ф. Реймерс. – М.: Россия молодая, 1994. – 367 с.

12. Экологическая безопасность, устойчивое развитие и природоохранные проблемы / под ред. К.Ф. Фролова.– М.: МГФ «Знание», 1999.– 704с.
13. Дорогунцов С.И. Управление техногенно-экологической безопасностью в контексте парадигмы устойчивого развития: концепция системно-динамического решения/ С.И. Дорогунцов, А.Н. Ральчук. – К.: Наукова думка, 2002. – 200 с.
14. Bykov A. Safety criteria of man and environment: their role and importance in risk management / A. Bykov // Proc. ESI VIII: systems.– Stockholm.– 1992.– P.111-132 (Europ. Journ Operational Research; Special issue).
15. Рудько Г.І. Стратегія екологічної безпеки (регіональний контекст) / Г.І.Рудько, М.І.Долішній, В.С. Кравців, Ю.І.Стадницький.– Львів: Інститут стратиграфічних досліджень НАН України, 1999. –243 с.
16. Гошовський С.В. Екологічна безпека техноприродних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком геологічних процесів / С.В.Гошовський, Г.І. Рудько, Б.М. Преснер. – К.: ЗАТ “НІЧЛАВА”, 2002.– 624 с.
17. Лозанський В.Р. Екологічне управління в розвинутих країнах світу у порівнянні з Україною / В.Р. Лозанський. – Харків: УкрНДІЕП, 2000. – 68 с.
18. Методические подходы к выбору стратегии устойчивого развития территорий: В 2т. / под научн.ред. А.Г. Шапаря.– Днепропетровск: ИППЭ НАН Украины, 1996.–Т.1.– 162с.
19. Масленникова И.В. Управление экологической безопасностью / И.В.Масленникова. – С.-Петербург: Из-во гос. университета, 2001. – 130 с.
20. Качинський А.Б. Екологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращення / А.Б. Качинський.– К.: НІСД, 2001.– 312с.
21. Дарагунцов С.І. Сталий розвиток: траєкторія можливостей та обмежень (спроба створення моделі функціонування еколого-економічної

системи) / С.І. Дарагунцов, О.М. Ральчук // Вісник НАН України. – 2000. – №8. – С.3-14.

22. Данілішин Б.М. Природно-техногенні катастрофи: проблема економічного аналізу та управління / Б.М.Данілішин .– К.: УІНСіР, 2002.– 153с.

23. Хоружая Т.А. Оценка экологической опасности / Т.А. Хоружая. – М.: Книга сервис, 2002.– 208с.

24. Толстоухов А.В. Екобезпечний ризик: пошуки стратегм / А.В.Толстоухов, М.І. Хилько.– К.: Знання України, 2001.– 333с.

25. Волошин В.В. Підходи до концепції стійкого розвитку та її інтерпретації стосовно України / В.В. Волошин, І.О. Горленко // Укр. геогр. журнал.– 1995.– №3.– С.3-10.

26. Гиззатулин Х.Н. Концепция устойчивого развития: новая социально-экономическая парадигма / Х.Н. Гиззатулин, В.А. Троицкий // Обществ. науки и современность. – 1998. – №5.– С.124-130.

27. Хильчевская Р.И. Проблемы экологической экономики в свете концепции устойчивого развития / Р.И.Хильчевская // Экономика и мат.методы.– 1996.– Т.32, Вып.3.– С.81-90.

28. Гусев А.А. Об экономическом механизме экологического устойчивого развития / А.А. Гусев, И.Г. Гусева // Экономика и мат. методы. – 1996.–Т.32, Вып.2.– С.67-76.

29. Кондратьев К.Я. Устойчивое развитие: концептуальные аспекты / К.Я. Кондратьев, Я.П. Романюк // Известия РГО.– 1996.– Т.128, Вып.6.– С.1-12.

30. Концепція сталого розвитку України / під керівн. Ю.І.Костенко, Б.Е.Патопа.– К.: Світ, 1997.– 17с.

31. Руденко Л.Г. Основные принципы устойчивого развития регионов и их претворение в Украине / Л.Г. Руденко, И.А. Горленко // Географические проблемы стратегии устойчивого развития природной среды и общества.– М.: РАН, 1996.– 325 с.

32. Шапарь А.Г. Методические подходы к выбору критериев и стратегии устойчивого развития ландшафтных регионов Украины / А.Г.Шапарь // Матер. II науково-техн.конф. "Техногено-екологічна безпека регіонів як умова сталого розвитку України".-К.: Тов. "Знання" України.- 2002.- С.8-12.

33. Долішній М.І., Кравців В.С. Економічний розвиток і екологічна безпека: шлях України / М.І. Долішній, В.С. Кравців // Проблеми сталого розвитку.- К.: НАН України.- 1998.- С.88-100.

34. Палагін О.В. Про системний підхід щодо реалізації концепції сталого розвитку України / О.В. Палагін, А.О.Калинчук-Порханова, В.М. Томашков // Проблеми сталого розвитку.- К.: НАН України.- 1998.- С.151-153.

35. Пащенко В.М. Загальнонаукові проблеми природничих досліджень у контексті парадигми сталого розвитку / В.М. Пащенко // Проблеми сталого розвитку України.- К.: НАН України.- 1998.- С. 402.

36. Яжлев И.К. Управление экологическими рисками при реорганизации производственных территорий/ И. К. Яжлев // Экономика природопользования. – 2008. –№2. – С. 60-67.

37. Яжлев И.К. Эколого-градостроительные аспекты реорганизации производственных территорий российских городов/ И. К. Яжлев // Экономика природопользования. – 2009. –№ 4. – С. 68-80.

38. Сравнительный анализ воздействия промышленных предприятий региона на окружающую среду / В.В. Шило, А.М. Быков, В.М. Шмандий, Н.Г. Гальчук. – М.: Гидрометиздат (ВДНХ СССР), 1988. – 117с.

39. Шмандий В.М. Научно-методические принципы исследования состояний техногенной безопасности в регионе / В.М. Шмандий // Вісник КДПУ.- 2002.- Вип.5(16). – С. 19-24.

40. Шмандий В.М. Управління екологічною безпекою на регіональному рівні (теоретичні та практичні аспекти): автореф. дис... д-ра техн. наук: 21.06.01 / В.М. Шмандий. –Харків, 2003. – 36 с.

41. Челядин Л.І. Наукові засади ресурсозберігаючих технологій та устаткування підвищення екологічної безпеки промислових об'єктів Прикарпаття : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01/ Л. І. Челядин. – Івано-Франківськ, 2011. –340 с.

42. Бахарев В.С. Екологічна безпека регіону в умовах техногенного пилового забруднення атмосферного повітря: дис... канд.. техн. наук: 21.06.01 / В. С. Бахарев. – Кременчук, 2005. – 179 с.

43. Быков А.А., Мурзин Н.В. Проблемы анализа безопасности человека, общества и природы / А.А. Быков, Н.В. Мурзин // . – СПб.: Наука, 1997. – 247 с.

44. Николайкин Н.И. Метод экологической оценки химического и парникового антропогенного загрязнения / Н.И. Николайкин, А.М. Матягин, Ю.В. Смирнова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007, № 10. – С. 38-40

45. Шмандий В.М. Современные методы контроля загрязнения атмосферного воздуха при управлении техногенной безопасностью на региональном уровне / В.М. Шмандий, А.М. Касимов, А.Н.Кучук // – Библиотека ІТЕ: Том 3.– Харків: КДПУ, 2001. – 136с.

46. Шмандий В.М. Оценка техногенной опасности, формируемой промышленными предприятиями / В.М. Шмандий, А.Л. Старовойда // Вісник КДПУ: Наукові праці КДПУ.– Кременчук: КДПУ.– 2002.– Вип.2(13).– С.77-80.

47. Шмандий В.М. Определение степени техногенной опасности машиностроительных предприятий / В.М. Шмандий // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научн. трудов.– Донецк: ДонГТУ.– 1998.– Вып.6, Т.3.– С.287-290.

48. Радиация. Дозы, эффекты, риск / [Пер. с английского Ю.А. Банникова]. – М.: Мир, 1988. – 79 с.

49. Кузьмин И.И. Безопасность и техногенный риск / И.И. Кузьмин // Журнал Всесоюзн. химич. Общества им. Д.И. Менделеева. – 1990. –Т.35. – С. 415-421.
50. Качинський А.Б. Методологічні основи ризику в медико-екологічних дослідженнях та його значення для екологічної безпеки України / А.Б. Качинський, А.М. Сердюк // Лікарська справа. – 1995. – № 3-4. – с.5-15
51. Пирожков С.І. Концепція ризику та екологічна безпека / С.І. Пирожков //Довкілля та здоров`я. – 1996. – № 1. – с.12-15
52. Маршалл В. Основные опасности химических производств / В. Маршалл. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
53. Хенли Э.Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э.Дж. Хенли, Х. Кумамото. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
54. Деньга В. О понятиях эcobезопасности и эcobриска/ В. Деньга // Управление риском. – 2000. № 4. – с.4-42
55. Лимитовский М.А. Основы оценки инвестиционных и финансовых решений / М.А. Лимитовский . – М.: Дека. – 120 с.
56. Морозов Д.С. Основные принципы управления проектными рисками / Д.С. Морозов // Управление риском. – 1999. - №1. – С. 13-21
57. Субетто А.И. Управление экологическим риском в системе качества жизни: ч.1/ А.И. Субетто // Стандарты и качество. – 1995. - № 7. – С. 28 - 33
58. Пляцук Л.Д.Зниження рівнів екологічних ризиків – умова раціонального природокористування / Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець, О.А. Положій // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: Вид. КДПУ, 2006.– Вип. 6, – № 41. – С. 127-129
59. Сканай Л.В. Рискообразующие факторы / Л.В. Сканай // Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2000. – №4. – С.32-36
60. Грачева М. В. Анализ проектных рисков / М. В. Грачева. – М. : Фантастин-форм, 1999. –215 с.
61. Баранова М.Е. Методы расчетного мониторинга загрязнения

атмосферы мегаполисов / М.Е. Баранова, А.С. Гаврилов // Естественные и технические науки – 2008. – № 4. – С.221- 225.

62. Турос О.І. Аналіз ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря промисловими підприємствами м. Запоріжжя / О.І. Турос // Методичні перспективи. – 2008. – Т. XIII № 1. – С. 93–97.

63. Присяжнюк В.Є.Захворюваність дитячого населення окремих регіонів України в залежності від екологічного стану довкілля/ В.Є. Присяжнюк, В.М. Доценко, М.А. Климчук // Гігієна населених місць. – 2004.– Вип. 43.– С. 52-57.

64. Динамика выявления профессиональных и профессионально обусловленных пылевых заболеваний / Т.П. Бодаченко, Г.А. Бондаренко, Е.А. Гладчук [и др.] // Вестник гигиены и эпидемиологии. – 1998. – № 1(3). – С. 52.

65. Work-related lung diseases. Asbestos-related lung diseases. ELF Patient Factsheet / Breath. – 2008. - vol.4, №3. - P. 295–300.

66. Краснюк Е.П. Пылевые заболевания легких у рабочих промышленного производства Украины / Е.П. Краснюк // Український пульмонологічний журнал. - 1998. - № 4. - С. 13–16.

67. Виноградов Б.Ф. Биологические критерии выделения зон экологического бедствия России / Б.Ф. Виноградов, В.П. Орлов, В.В. Снакин // Изв. РАН. Сер.географ.– 1993.– №5 – С.77-89.

68. Безель В.С. Экологическое нормирование антропогенных нагрузок. 1. Общие подходы / В.С. Безель, Ф.В. Кряжимский // Экология.– 1992.– № 6.– С. 3-11.

69. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень) / Е.Л. Воробейчик, О.Ф. Садыков, М.Г. Фарафонов.– Екатеринбург: УИФ “Наука”, 1994.– 280с.

70. Александрова Т.Д. Нормирование антропогенно-техногенных нагрузок на ландшафт. Состояние проблемы. Возможности и огорчения /

Т.Д. Александрова // Известия АН СССР. Сер. географ.– 1990.– № 1.– С.46-54.

71. Мелехова О.П. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование. / О.П. Мелехова, Е.И. Егорова, Т.И. Евсеева. - М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 288 с.

72. Романова Е. В. Лишайники – биоиндикаторы атмосферного загрязнения г. Кемерово / Е. В. Романова // Вестник Томского государственного университета. Биология. –2012. –№ 4 (20). – С. 203–214

73. Неверова О.А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды / О.А. Неверова // Биосфера. – Т. 1, № 1. – С. 82-92.

74. Луцкан Е.Г. Биоиндикационная оценка состояния окружающей среды города на основе анализа флуктуирующей асимметрии березы плосколистной / Е.Г. Луцкан, Е.Г. Шадрин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – №8. – С. 139-141.

75. Бойко В.В. Біоіндикаційна оцінка впливу техногенного навантаження від забруднення атмосферного повітря в умовах зміни промислової інфраструктури регіону/ В.В.Бойко, Л.Д.Пляцук, Л.Г.Філатов, І.О. Трунова // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2012. – № 2(73). – С. 152-155.

76. Суханова І.П. Лехіоіндикація якості повітряного середовища дендропарку «Софіївка» НАН України / І.П. Суханова // Збірник наукових праць Харківського національного педагогічного університету імені Г.С. Сковороди. Біологія та валеологія. – 2012. – Вип. 14. – С. 162-170.

77. Bargagli R. Lichen biomonitoring of mercury emission and deposition in mining, geothermal and volcanic areas of Italy / R. Bargagli, C. Barghigiani // Environ. Monit. Assess. – 1991. – V. 16. N 32. – P. 265-275.

78. Розанова Л.Н. Опыт оценки токсичности техногенного загрязнения атмосферного воздуха Республики Татарстан в рамках теории принятия компромиссных решений / Л.Н. Розанова // Вестник ТИСБИ. – вып. 3 –2000. – С. 22-27

79. Вараксин А.Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами / Вараксин А.Ю. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 192 с.
80. Rogers C.B. The behavior of small particles in a vertical turbulent boundary layer in air / C.B. Rogers, J.K. Eaton // *Int. J. Multiphase Flow*. – 1990. – V.16.№5. – P. 819 – 834.
81. Вараксин А.Ю. Модификация турбулентности потока твердыми частицами / А.Ю. Вараксин // *Научные основы технологий XXI века*. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – С. 98 – 104.
82. Згуровский М.З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / Згуровский М.З. – К.: Наук.думка, 1997. – 368 с.
83. Расчет загрязнения атмосферы при аварии на базе модели конвективно-диффузионного переноса примеси / А.В. Радкевич, Н.Н. Беляев, А.А. Степаненко [та ін.] // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна*. – 2010. – вип. 32. – С. 203 – 205.
84. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. / Берлянд М.Е. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
85. Бабков В.С. Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников. / В.С. Бабков, Т.Ю. Ткаченко // *Наукові праці ДонНТУ*. – 2011. – вип. 13(185). – С. 147 – 155.
86. Cole C.F. Surface mine pit retention. / C.F. Cole, A.J. Fabrick // *Journal of Air Pollution Control Association*. – 1984. – ver. 34(6), – P. 674-675.
87. Беляев Н.Н. Моделирование процесса рассеивания токсичного газа в условиях настройки. / Н.Н. Беляев // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. – 2009. – вип. 29. – С. 83 – 85.
88. Бруяцкий Е.В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е.В. Бруяцкий. – К.: Изд-во ин-та гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.

89. Hanna S. Air Quality Modelling over Short Distances / S. Hanna // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling, 1994. - № SMR/760-2.- P. 712 – 743.

90. Ханна С.Р. Применение исследований в области турбулентности для моделирования загрязнения воздуха / С.Р. Ханна // Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – С. 281-314

91. Яглом А.М. О турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы / А.М. Яглом. – Изв. АН СССР. ФАиО. – 1972. – №6. – С. 579-594.

92. Алоян А.Е. Численная модель переноса примесей в пограничном слое атмосферы/ А.Е. Алоян, Д.Л. Йорданов, В.В. Пененко // Метеорология и гидрология. – 1981. –№1.– С. 32-43.

93. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 320 с.

94. Меньшов, М.В. О математической модели миграции осаждения полидисперсного аэрозольного образования / М.В. Меньшов / Вестн. Сам. госуд. ун-та. Естественнонаучная серия. – 2006. –№6/1(46). – С.114-122.

95. Шлычков, В.А. Численная модель пограничного слоя атмосферы с детализацией конвективных процессов на основе вихреразрешающего подхода / В.А.Шлычков / В кн.: Аэрозоли Сибири. – Новосибирск: Изд-во СОРАН. –2005. – С.43–48.

96. Леженин, А.А. Численная модель миграции аэрозолей, образовавшихся в зоне лесных пожаров / А.А. Леженин, В.А. Мальбахов, В.А. Шлычков // Оптика атмосферы и океана. –2003. –Т.16,№5-6. – С.485-488.

97. Меньшов М.В. О математической модели миграции и осаждения полидисперсного аэрозольного образования / М.В. Меньшов// Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. – 2006. - №6/1(46). – С. 114 - 122.

98. Меньшов М. В. Математическое моделирование динамики распространения и осаждения полидисперсного аэрозольного образования в условиях пересеченного рельефа местности / М,В, Меньшов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: физико-математические науки. – 2007. – №2/15. – С. 176 - 178.

99. Мокін В. Б. Моделювання поширення забруднювальних речовин у повітрі міста з використанням геоінформаційних технологій / В. Б. Мокін, І.В. Варчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 5. — С. 13-18.

100. Гурець Л.Л. Програми контролю за станом навколишнього середовища/ Л.Л. Гурець, І.М. Гурець// Матеріали Всеукраїнської міжвузівської науко-технічної конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві». Суми, 2010. – С. 121-122

101. Бызова Н.Л. Методическое пособие по расчету рассеяния примесей в пограничном слое атмосферы по метеорологическим данным. – М.: Гидрометеоиздат, 2003.- 46с.

102. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД – 86. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 93 с.

103. Безуглая Э. Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов / Э. Ю. Безуглая. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 184с.

104. ДСТУ ISO 14001:2006. Системи екологічного керування. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO14001:2004, IDT)

105. ДСТУ ISO 14004:2006 Системи екологічного управління. Загальні настанови щодо принципів, систем та засобів забезпечення (ISO 14004:2004, IDT)

106. Гурець Л.Л. Оцінка впливу промислового підприємства на навколишнє середовище / Л.Л. Гурець // Матеріали V Міжнародної

ювілейної науково-практичної конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження». – Суми, 2009. – С. 48

107. Быков В.И. Перспективы снижения вредных выбросов на предприятиях фосфорной промышленности / В.И. Быков, О.Г. Воробьев // Научные труды отраслевого совещания работников фосфорной промышленности. – Л., 1974. – С. 52 - 57.

108. Шарыгин М.П., Мусин Н.А. Анализ эффективности пылеулавливающего оборудования производств фосфора и фосфорных удобрений / М.П. Шарыгин, Н.А. Мусин // Технология неорганических веществ и минеральных удобрений. – Чимкент, 1986. – Т.2. – С.299-303.

109. Гурець Л.Л. Забруднення атмосфери підприємствами хімічної промисловості / Гурець Л.Л., Будионий О.П. // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Карпатська конференція з проблем охорони довкілля» “Carpathian environmental conference” – СЕС-2011, Мукачеве, 2011 р. – С. 7.

110. Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений / Под ред. И.П. Мухленова, О.С. Ковалева. – М.: Химия, 1987. – 206 с.

111. Шарыгин М.П. Закономерности осаждения пыли в слое подвижной насадки и разработка интенсивных пылеуловителей: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / М.П. Шарыгин . – Иваново, 1982. – 185 с.

112. Воробьев О.Г. Экологические проблемы химического предприятия / Воробьев О.Г., Балабеков О.С., Молдабеков Ш.М., Уфимцев Б.С. – Алма-Ата, 1984. –182 с.

113. Балабеков О.С. О некоторых проблемах очистки газопылевых выбросов производств фосфора и минеральных удобрений / Балабеков О.С., Янковский Б.А., Тарат Э.Я. // Реферативный сборник «Фосфорная промышленность». – М.: НИИТЭХИМ, 1978. – вып.1. – С. 24 – 26

114. Задорский В.М. Интенсификация химико-технологических процессов на основе системного подхода / В.М. Задорский. – К.: Тэхника, 1989. – 208 с.
115. Сучасні напрями підвищення екологічної безпеки виробництва соди: монографія / В.П. Шапорєв, М.А. Цейтлін, В.Ф. Райко, Л.Л. Гурець та ін. – Суми: Сумський державний університет, 2014. – 246 с.
116. Рамм В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
117. Коган В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии / В.Б. Коган. – Л.: Химия, 1977. – 592 с.
118. Войнов Н.А. Конструирование и методы расчета трубчатых пленочных аппаратов / Н.А. Войнов, Н.М. Коновалов, Н.А. Николаев // Химическая промышленность. – 1992. – №2. – С.110 - 113.
119. Николаев А.Н. Высокоэффективные вихревые аппараты для комплексной очистки больших объемов промышленных газовых выбросов / А.Н. Николаев, А.А. Овчинников, Н.А. Николаев // Химическая промышленность. – 1992. – №9. – С.540 - 544.
120. Малюсов В.А. Новые процессы и аппараты для разделения и очистки веществ / В.А. Малюсов // Теор. осн. хим. технол. – 1987. – Т.21, №1. – С.26-34.
121. Орлов М.А. Оценка режима нисходящего прямотока фаз в насадочном абсорбере / М.А. Орлов, А.И. Фурман, С.А. Малашкина, Т.П. Сидельчикова // Химическая промышленность. – 1990. – №11. – С. 689-690.
122. Конобеев Б.Н. Изучение пленочной абсорбции при высоких скоростях газа / Б.Н. Конобеев, В.А. Малюсов, Н.М. Жаворонков // Химическая промышленность. – 1961. – №1. – С.475-481.
123. Холпанов Л.П. Интенсификация переноса массы в пленке жидкости, двигающейся прямоточно с высокоскоростным потоком газа или пара / Л.П. Холпанов, Н.А. Николаев, В.А. Малюсов, Н.М. Жаворонков // Теор. осн. хим. технол. – 1989. – Т. 23, №5. – С. 563-568.

124. Позин М. Е. Пенные газоочистители, теплообменники и абсорберы. Работа и расчет пенных аппаратов / М. Е. Позин, И. П. Мухленов, С. Я. Тарат. – Л. : Госхимиздат, 1959. – 153 с.
125. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Интенсивные аппараты со стабилизированным слоем пены для очистки отходящих газов: [монография] / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, В.Ф. МОИСЕЕВ, В.П. БАЙРАЧНЫЙ, В.П. ШАПОРЕВ. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 228 с.
126. Hoppe K. Grundlagen der Dimensionierung von Kolonnenboden. / K. Hoppe, M. Miffelstrass - Dresden: Theodor Steinkopff, 1967. – 239 p.
127. Фертман Г. И. Провальные тарелки ректификационных аппаратов. / Г. И. Фертман, К. А. Калулянец // Спиртовая промышленность, - 1958. – № 7. – С. 11-14.
128. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. / И.А. Александров – М.: Химия, 1967. – 280 с.
129. Набутовская Л.Л. Исследование тепловых и гидродинамических процессов в пенных аппаратах с провальными тарелками: автореф. дис... канд. техн. наук: спец. 05.17.08 – Л., 1975. – 26 с.
130. Фруммин В.М. Десорбция аммиака в дистиллере содового производства / В.М. Фруммин // Вестник Харьковского гос. политехн. ун-та. – Харьков: ХГПУ, – 2000. – Вып. 118. – С. 41-42
131. Цейтлин М.А. Исследование кинетики отложения инкрустаций на внутренней поверхности контактного подогревателя. / М.А. Цейтлин, В.Ф. Райко // Химическая промышленность. – 1991. – № 9. – С. 23-25
132. Кочергин Н.А. Определение предельно допустимой скорости пара на тарелках провального типа/ Н.А. Кочергин, В.В. Дильман, С.И. Марусова, В.Д. Шмарова // Химическая промышленность. – 1966. – № 10. – С. 782-783.
133. Касаткин А.Г. К расчету колонн с провальными тарелками/ А.Г. Касаткин, Ю.И. Дытнерский, С.У. Умаров // Химическая промышленность. – 1958. №3, – С 166-173.

134. Кочергин Н.А. Исследование работы тарелок провального типа в условиях ректификации/ Н.А. Кочергин, В.М. Олевский, В.В. Дильман // Химическая промышленность. – 1960. – № 7. – С 591-595.

135. Sanderman U. Zum Hydraulik von Sieboden mit Bohrungen grosser Durchrrfes-ser / Sanderman U. // Chem. Techn. – 1967 – № 5. – P. 267-271.

136. Взаимодействие газов с жидкостями в пенном режиме. / Мухленов И.П., Ткач Г.А., Зайцев И.Д. и др. // Химическая промышленность. – 1983. –№ 8. – С. 38-41.

137. Гисматулин Ч.Н. Влияние диаметра отверстий на гидродинамику и массообмен на провальных тарелках с крупными отверстиями: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.17.08/ Гисматулин Ч.Н. – Чимкент., 1982. – 16 с.

138. Молдабеков Ш.М. Особенности взаимодействия фаз на крупнодырчатых тарелках / Ш.М. Молдабеков, Ч.Н. Гисматулин, Ю.К. Молоканов, И.П. Мухленов // Современные машины и аппараты химических производств: тез. докл. III Всесоюзной научн. конф 4.5. – Ташкент, 1983. – С. 71-73.

139. Молоканов Ю.К. Гидравлическое сопротивление тарелок провального типа с крупными отверстиями. / Ю.К. Молоканов, Ч.Н. Гисматулин, О.С Балабеков, Ш.М. Молдабеков // Известия вузов. Химия и хим. технология. – 1984. – Т.27. – Вып.7. – С. 861-865.

140. Айтбаев Е.М. Взаимодействие фаз при истечении газа в жидкость через одно и группу отверстий и гидродинамика крупнодырчатых провальных тарелок: автореф. дис... канд. техн. наук.: 05.17.08 / Е.М. Айтбаев. – М., 1983. – 16 с.

141. Лебедев В.П. Массообмен при десорбции газа из мелкодисперсных капель жидкости в пристенной двухфазной струе/ В.П. Лебедев, В.И. Терехов, Н.Е. Шишкин // ПМТФ. – 1995. – т. 36. – № 3. – С. 122 -129

142. Сорокопуд А.Ф. Исследование работы нового контактного элемента роторного распылительного аппарата / А.Ф. Сорокопуд, Д.С.

Стрижков, В.С. Козымаев // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – №4. – С. 120-125.

143. Моисеев В.Ф. Исследование массообмена в центробежном теплообменном аппарате / В.Ф. Моисеев, Е.В. Бубликова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – 1/3 (25). – С. 33-37.

144. А. с. 899102 СССР, В 01 0 53/18. Распылительное устройство для массообменных аппаратов / Поникаров И. И., Володин В. К., Булкин В. А.; заявитель и патентообладатель Казанский химико-технологический ин-т им. С. М. Кирова. – № 4669312/26; заявл. 14.03.80; опубл. 23.01.82, Бюл. № 3– 2с.

145. Пат. 1646587 СССР, В 01 0 53/18. Массообменный аппарат для очистки газов / Поникаров И. И., Алексеев В. А., Кручинин С. Л., Булкин В.А.; заявитель и патентообладатель Казанский химико-технологический ин-т им. С. М. Кирова. – № 289466823-26; заявл. 16.01.89; опубл. 07.05.91, Бюл. № 17 – 3с.

146. Нечаева Е.С. Исследование дисперсного состава пыли и факела распыла жидкости в роторном распылительном пылеуловителе / Е.С. Нечаева Д.М. Попов // Техника и технология пищевых производств. – 2013. – № 2. – С.1-5

147. Усманова Р.Р. Комплексное исследование проблемы интенсификации очистки газа ударно-инерционном аппарате / Р.Р. Усманова, Г.Е. Заиков // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 10, Иннов. деят. - 2014. – № 2 (11). – С. 75 – 85.

148. Пат. № 5852 Україна, МКИ В04С 3/06. Вихровий пиловловлювач / Л.М. Євса – № 20040907479; Заявлено 18.09.2004; Опубл. 15.03.2005, Бюл. № 3. –3 с.

149. Холин Б. Г. Гидродинамика двухфазных потоков в вихревом противоточном массообменном аппарате / Б. Г. Холин, И. А. Ковалев, В. И. Склабинский // Известия вузов. Серия «Химия и химическая технология». – 1982. – Т. XXV, № 7. – С. 894–897.

150. Распыливание жидкости / Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Новиков Б. В., Ягодкин В. И. – [2-е изд., доп. и перераб.] – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
151. Броунштейн Б. И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах / Б. И. Броунштейн, Г. А. Фишбейн – Л. : Химия, 1977.– 280 с.
152. Подвысоцкий А. М. Массоперенос при взаимодействии капель со смоченной твердой поверхностью в широком диапазоне углов столкновений/ А. М. Подвысоцкий, А. И. Баштовой // Промышленная теплотехника. – 2002. – Т. 24, № 5. – С. 16-18.
153. Канагін В.О. Інтенсифікація технологічних процесів на основі використання різних фізичних ефектів / В. О. Канагін, І. І. Конюхова, В. Ф. Кохан, Н. В. Ярکا // Наукові записки Української академії друкарства. – 2009/ 2 (16). – С. 83-89
154. Баштовой А. І. Процеси переносу при взаємодії крапель у турбулентних полідисперсних потоках: дис...канд.. техн. наук: спец. 01.02.05/ А. І. Баштовой. – Київ, 2003. – 146 с.
155. Об устойчивости вращающегося газожидкостного слоя / А. П. Бурдуков, А. Р. Дорохов, В. И. Казаков [и др.] // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1987. – № 21, Вып. 6. – С. 65–67.
156. Лаптев С. А. Динамика газожидкостного потока в вихревых камерах / С. А. Лаптев, А. А. Овчинников, Н. А. Николаев // Химическая промышленность. – 1994. – № 9. – С. 52–55.
157. Протодьяконов М.О. Гидродинамика и массообмен в системах газ-жидкость / М.О Протодьяконов, И.Е. Люблинская – Л.: Наука, 1990. – 349 с.
158. Ужов В.Н. Очистка газов мокрыми фильтрами / В.Н.Ужов, А.Ю. Вальдберг. – Л.: Химия, 1972. – 248 с.

159. Балабеков О.С. Учет формы капли при расчете ее скорости движения / О.С. Балабеков, Б.Н. Корганбаев, М.З. Ескендилов, М.А. Алтаев // Доклады НАН РК. – Алматы, 2002. – №6. – С.99-105.
160. Hottoway I.D. Drag Coefficients for Irregularly Shaped Particles/ I.D.Hottoway, N.D. Sulbert // Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1979. – V. 18, №13. – P.433-436.
161. Перри Дж. Справочник инженера-химика / Дж. Перри.– Л.: Химия, 1969., т.1. – 640с.
162. Коваленко В.С. Деформация капель жидкости в газовом потоке / В.С. Коваленко // Теор основы хим.технол., 1978. – т.12. №2. – С.297-299.
163. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов от пыли/ В.Н.Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков. – М.: Химия, 1981. – 192 с.
164. Фукс Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 261 с.
165. Вальдберг А.Ю. Расчет пылеулавливания при работе скрубберов в конденсационном режиме / А.Ю. Вальдберг, Н.М. Савицкая // Теор. осн. хим. техн. – 1993. – Т.27, № 5. – С. 526 -530.
166. Вальдберг А.Ю. Технология пылеулавливания / А.Ю. Вальдберг, Л.М. Исянов, Э.Я. Тарат. – Л.: Машиностроение, 1985. – 192 с.
167. Русанов В.А. Очистка дымовых газов в промышленной энергетике / В.А. Русанов, И.И.Урбах, А.П.Анастасиади. – М.: Энергия, 1969. – 215с.
168. Вальдберг А.Ю. Метод расчета эффективности осаждения частиц в скруббере Вентури / А.Ю. Вальдберг, Н.С. Кирсанова // Теор. осн. хим. техн. – 1991. – Т. 25, № 4. – С. 594 -598.
169. Вальдберг А.Ю. О влиянии смачиваемости пыли на эффективность мокрого пылеулавливания / А.Ю.Вальдберг, Н.М. Савицкая // Теор. осн. хим. техн. – 1992. – Т. 26, № 6. – С. 907 - 911.

170. Волненко А.А. Научные основы разработки и расчета вихревых массообменных и пылеулавливающих аппаратов: автореф. дис... д-ра. техн. наук: 05.17.08 / А.А. Волненко – Шымкент, 1999. – 52 с.
171. Кафаров В.В. Основы массопередачи / В.В. Кафаров. М.: Наука, 1972. – 494 с.
172. Методика оценки технико-экономической эффективности контактных массообменных устройств. М.: ГК СССР по науке и технике, 1976. – 50с.
173. Гурець Л.Л. Системний підхід до управління екологічною безпекою / Л.Л. Гурець// Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки». – Кременчук, 2015. – С. 60
174. Примак А.В. Системный анализ контроля и управления качеством воды и воздуха / А.В.Примак, В.В. Кафаров, К.И.Качиашвили. – К.: Наук. думка, 1991. – 360 с.
175. Пэнтл Р. Методы системного анализа окружающей среды / Р. Пэнтл. – М.: Мир, 1979. – 214 с.
176. Теорія систем в екології: підручник / Ю.Г. Масікевич, О.В. Шестопапов, А.А. Негадайло та ін. – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 330 с.
177. Суворов Н.П. Формирование оптимальных систем энергопреобразования на основе использования принципов гармонии и целостности / Н.П. Суворов, И.Г. Суворова, О.В. Кравченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011.- № 3/10(41). – С. 44-46
178. Ризниченко Г. Ю. Математические модели в биофизике и экологии: монография / Г.Ю. Ризниченко. – Ижевск; М. : Ин-т компьютер. исслед., 2003. – 183 с.
179. Александров В.В. Развивающиеся системы в науке, технике, обществе и культуре. ч. 1. Теория систем и системное моделирование. / В.В. Александров. – Изд-во СПбГТУ, 2000. –243 с.

180. Карлович И.А. Геоэкология / И.А. Карлович. – М.: Академический проект, АльмаМатер. 2005. – 215с.
181. Шмандій В.М. Алгоритм розрахунку техногенного навантаження від викидів забруднюючих речовин в атмосферу/ В.М. Шмандій, Д.Л. Пляцук, Л.Л. Гурець // Науковий журнал «Science Rise». – том 5, № 2 (2015). – С. 43 – 48.
182. Гурець Л.Л. Оценка техногенной нагрузки с учетом порога техногенного воздействия /Л.Л. Гурець, Д.Л. Пляцук// Научное издание. Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов: сб. научн. тр. II Междунар. научн.-практ. конф. – Пенза: ПГУАС, 2013. – с.212-216
183. Пляцук Л.Д. Підвищення якості атмосферного повітря на основі управління екологічною безпекою промислового підприємства/ Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець // Sciences of Europe. – VOL 1, No 3 (3) (2016). – р. 62-66
184. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
185. Бейнз А. Организация исследований в химической промышленности. Условия, цели и стратегия / А. Бейнз, Ф. Бредбери, С. Саклинг; [пер. с англ. В.Воронина]. – М.: Химия, 1974. – 336 с.
186. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк; [пер. с англ. Е.Г. Коваленко]. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
187. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента: [Т.2.] / Н. Джонсон, Ф. Лион; [пер. с англ. Э. К. Лецкого, Е.В. Марковой]. – М.: Мир, 1972. – 516 с.
188. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – К.: Техніка, 1975. – 168 с.
189. Бондарь А.Г. Планирование эксперимента в химической технологии /А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха. – К.: Вища школа, 1976. – 184 с.

190. Mathcad 14.0 / Пакет программ для инженерных расчетов [Электронный ресурс]. – 2009. - Режим доступа: <http://www.mathcad.com.ua/>.
191. Statistica 6.0 / Система статистического анализа данных [Электронный ресурс]. – 2007. - Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/>.
192. Advanced Grapher 2.2 / Alentum Software, Inc. [Электронный ресурс]. – 2009. - Режим доступа: <http://www.alentum.com/agrapher/>.
193. Смирнов Н.Н., Белоглазов И.Н. Интенсификация некаталитических процессов в системе твердое тело – жидкость // Химическая пром. – 1991. – № 8. – С. 8 – 12.
194. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования / Розен А.М., Матюшин Е.И., Олевский В.М. и др./ Под ред. А.М. Розена. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
195. Современные методы определения газосодержания и поверхности контакта фаз в двухфазных газожидкостных системах / А.А. Абишев, В.Л. Долганов, С.Х. Загидуллин, В.В. Красоткин // Вестник ПГТУ. Химическая технология и биотехнология. – Пермь, 2009. – № 9. – С. 243-253.
196. Пенный режим и пенные аппараты / Э.Я. Тарат, И.П. Мухленов, А.Ф. Туболкин [и др.] – Л.: Химия, 1977. – 304 с.
197. Вальдберг А.И. К вопросу о предельных параметрах пенного режима в аппаратах с полным протеканием жидкости через отверстия решеток / А.И. Вальдберг Э.Я. Тарат // Журн. прикл. хим. – 1970. – Т. 43. – № 8. – С. 1712-1715.
198. X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78 / Brookhaven Instruments Limited [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.brookhaven.co.uk/products/particle-size-analysis>.
199. МВВ № 081/12-0161-05. Викиди газопилові промислові. Методика виконання вимірювань масової концентрації речовини у вигляді суспендованих твердих частинок в організованих викидах стаціонарних джерел гравіметричним методом. –Київ. – 2005.

200. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоиздат, 1985. – 248 с.
201. Воеводин В. В. Математические модели и методы в параллельных процессах / В. В. Воеводин. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
202. Грешилов А.А. Математические методы построения прогнозов / А.А. Грешилов, В.А. Стакун, А.А. Стакун. – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.
203. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Сумській області у 2015 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
[http://www.menr.gov.ua/dopovidi/regionalni/5560-rehionalni-dopovidi-pro-
stan-navkolyshnoho-pryrodnoho-seredovyshcha-u-2015-rotsi](http://www.menr.gov.ua/dopovidi/regionalni/5560-rehionalni-dopovidi-pro-
stan-navkolyshnoho-pryrodnoho-seredovyshcha-u-2015-rotsi)
204. Коваленко П.П. Городская климатология / П.П. Коваленко, Л.Н. Орлова. – М.: Стройиздат, 1993. - 144с.
205. Гурець Л.Л. Вибір високоефективного газоочисного обладнання з метою запобігання забрудненню атмосфери / Л.Л. Гурець // Екологічна безпека, вип. 2/2009 (6). – с. 69-72
206. Тетиор А.Н. Городская экология/ А.Н. Тетиор. – М.: Академия, 2006. - 257с.
207. Колубков А.Н. Инженерные решения высотных жилых комплексов / А.Н. Колубков // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2007. – №9. – С. 122 -126.
208. Серебровский Ф.Л. Аэрация населенных мест / Ф.Л. Серебровский. – М.: Стройиздат, 1985. – 170с.
209. Реттер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика / Э.И. Реттер. – М.: Стройиздат, 1984. – 294с.
210. Ковеня В. М. Метод расщепления в задачах газовой динамики/ В. М. Ковеня, Н.Н. Яненко. – Новосиб.: Наука, 1981 – 304 с.
211. Марчук Г.И. Методы расщепления/ Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1988 – 264 с.

212. Прусов В.А. Метод численного решения многомерной задачи конвективной диффузии/ В.А. Прусов, Дорошенко А.Е., Черныш Р.И. // Кибернетика и системный анализ. – 2009. – №1. – С. 100 - 107

213. Гурець Л.Л. Розсіювання шкідливих речовин в умовах міської забудови / Л.Л. Гурець, І.М. Гурець // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Екологія міст та рекреаційних зон». Одеса, 3-4 червня 2010 р. – С.79 -82

214. Гурець Л.Л. Моделювання розсіювання забруднюючих речовин з урахуванням міської забудови / Л.Л. Гурець // Экология и промышленность. – 2013 – № 4. – С. 96-98

215. Гурець Л.Л. Забруднення довкілля газопиловими викидами промислових підприємств / Л.Л. Гурець // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Еколого-правові та економічні аспекти екологічної безпеки регіонів» 16 -18 жовтня 2013, Харків. – С. 185-188

216. Козій І.С. Моделювання розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері від стаціонарних джерел забруднення/ І.С. Козій, Л.Л. Гурець, О.П. Будьоний // Вісник НТУ «ХП». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – 2012. - № 66 (972). – С. 114 – 118.

217. Гурець Л.Л. Застосування системного аналізу для вибору газочисного обладнання / Л.Л. Гурець // Первый независимый научный вестник. – № 9-10 / 2016. – с.94-98

218. Броунштейн Б.И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах / Б.И. Броунштейн, В.В. Щеголев. – Л.: Химия, 1988. — 336 с.

219. Бердт Р. Явления переноса / Р.Бердт, В.Стьюарт, Е.Лайтфут. – М.: Химия, 1974. — 688 с.

220. А.с. 1368010 СССР, МПК 7 В 01 D 53/18, В 01 D 3/30 . Пленочный механический абсорбер / В.Ф. Сергеев, М.Г. Тарабанов, Л.В.

Косарев (СССР). – №4087200/29-26; заявлено 03.07.86; опубл. 23.11.88, Бюл. № 71. – 2 с.

221. Пат. РФ 2342968 МПК 7 В01D3/30, В01D47/16. Роторный распылительный аппарат /А.Ф. Сорокопуд, Е.С. Тузовский; заявитель и патентодержатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Кемеровский технологический институт пищевой промышленности; заявлено 02.10.2007; опубл.10.01.2009, Бюл. № 5. – 3 с.

222. Пат. РФ 2296610 МПК 7 В01D47/16. Роторный пылеуловитель/ А.Ф. Сорокопуд, Н.М. Горячкина, И.Е. Бельдяев; заявитель и патентодержатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Кемеровский технологический институт пищевой промышленности; заявлено 08.04.2005; опубл.10.04.2007, Бюл. № 15. – 2 с.

223. Пат. РФ 2294791 МПК 7 В01D47/16. Способ мокрой очистки газов/ А.Ф. Решетняк, В.А. Конев, А.Н. Пещеров; заявитель и патентодержатель А.Ф. Решетняк, В.А. Конев, А.Н. Пещеров; заявлено 09.03.2004; опубл.10.03.2007, Бюл. № 12. – 2 с.

224. Пат. РФ 2201279 МПК 7 В01D47/00, В01D53/00. Устройство для улавливания пыли и вредных газов/ А.В. Лапшина, П.П. Гуюмджян, В.Б. Лапшин; заявитель и патентодержатель Ивановская государственная архитектурно-строительная академия; заявлено 08.06.2000; опубл. 27.03.2003, Бюл. № 10. – 3 с.

225. Патент України 37506 МПК В01D53/54. Абсорбер для очищення газів/ Х.О. Дерейко; Я.М. Гумницький; М.С. Мальований; заявник та патентовласник Відкрите акціонерне товариство «Інститут гірничо-хімічної промисловості». – № 99052589; заявлено 07.05.1999; опубл. 15.05.2001, Бюл. №4 – 3 с.

226. Ладыгичев М.Г. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: справочное издание: ЭБ / М.Г. Ладыгичев, Г.Я. Бернер. – М: Теплотехник, 2004. – 696 с.

227. Кузнецов И.Е. Оборудование для санитарной очистки газов: Справочник / И.Е.Кузнецов, К.И.Шмат, С.И.Кузнецов. – К: Техніка,1989. – 303 с.

228. Пат. РФ 2522655 МПК 7 В01D47/14, В01J19/30. Конический форсуночный скруббер/ О.С. Кочетов, В.К. Шумилин, Г.И. Шумилина, М.О. Стареева, А.В. Шумилин, Ю.В. Шумилин; заявитель и патентодержатель О.С. Кочетов; заявлено 05.04.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 8. – 3 с.

229. Патент України 87566 МПК В01D47/00, С21С5/38, С21С5/40. Система очищення конвертерних газів/ Д.В.Сталінський; В.Д. Мантула; В.А. Ботштейн; О.Ю. Пірогов; А.З. Рижавський; Г.М. Каненко; Л.М. Ключова; заявник та патентовласник Український державний науково-технічний центр з технології та обладнання, обробки металів, захисту навколишнього середовища та використання вторинних ресурсів для металургії та машинобудування «Енергосталь». - № а200711428; заявлено 15.10.2007; опубл. 27.07.2009, Бюл. №8. – 2 с.

230. Михайленко Г.Г. Новые распыливающие устройства в системах промышленной пылегазоочистки: монография / Г.Г. Михайленко. – Одесса: Астропринт, 2008. –116 с.

231. Пат. РФ 2491982 МПК 7 В01D53/18. Прямоточный абсорбер / С.В. Демихов; заявитель и патентодержатель С.В. Демихов; заявлено 03.04.2012; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 14. – 2 с.

232. Пат. РФ 2466767 МПК 7 В01D53/18, В01D3/30. Теплообменная вихревая колонна/ Н.А. Войнов, С.А. С.А. Ледник, О.П. Жукова, С.М. Воронин, А.Н. Войнов; заявитель и патентодержатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный

технологический университет" (СибГТУ); заявлено 03.04.2012; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 16. – 3 с.

233. Пат. РФ 2527472 МПК 7 B01D47/06, B05B1/34. Многофункциональный аппарат со встречными закрученными потоками/ О.С. Кочетов, М.О. Стареева, М.М. Стареева; заявитель и патентодержатель О.С. Кочетов, М.О. Стареева, М.М. Стареева; заявлено 02.03.2012; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 14. – 2 с.

234. Шушляков А.В. Применение вихревых турбулентных промывателей в качестве аппаратов комплексной очистки газов / А.В. Шушляков, Д.А. Шушляков, Е.Ю. Данилова. – Комунальне господарство міст. – 2009. – №88. – С. 175-179.

235. Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями. / Под общей редакцией проф. Э.Я Тарата. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1975. – 239 с.

236. А.с. 394059 СССР, МКИ В 01 D 53/20. Массообменный аппарат для очистки газа/ Л.Ш. Балтабаев, Н.П. Болгов, Э.Я Тарат., О.С. Балабеков, В.В. Порошин (СССР). – № 1604102/23-26; заявлено 28.12.70; опубл. 22.08.73, Бюл. № 34. – 2 с.

237. А.с. 829122 СССР, МКИ В 01 D 53/20. Массообменный аппарат/ В.А. Бондаренко, М.П. Шарыгин, О.С. Балабеков, Б.С. Шакиров, П.А. Климов (СССР). – № 2808574/23-26; заявлено 14.08.79; опубл. 15.05.84, Бюл. № 13. – 2 с.

238. Соколов В.Н. Газожидкостные реакторы / В.Н. Соколов, И.В. Доманский. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.

239. Пляцук Л.Д. Очистка отходящих газов в производстве суперфосфата / Л.Д. Пляцук, Кетанех О.М., Гурець Л.Л., Лазненко Д.О. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2002. – Вип. 16, – № 5. – С. 57-59

240. Пляцук Л.Д. Очистка отходящих газов от соединений фтора / Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець, Д.О. Лазненко, О. М. Кетанех // Вісник СумДУ. – Суми: Вид-во СумДУ, 2003. – Вип. 49, – №3. – С. 121 – 126
241. Астарита Дж. Массопередача с химической реакцией/ Дж. Астарита. – Л. Химия, 1971г. – 224 с.
242. Кишиневский М.Х. Некоторые результаты современных теоретических работ в области абсорбции, осложненной химическими реакциями / М.Х. Кишиневский // ТОХТ, 1967. – т.1, – №6. – С. 759 -775
243. Пляцук Л.Д. Методология исследования и выбора пылегазоочистного оборудования / Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець // Региональная архитектура и строительство. –2014. – №1(18). – С. 144-148.
244. Гурець Л.Л. Принципы выбора газоочистного оборудования/ Л.Л. Гурець, Д.С. Романенко // Сборник докладов Международной молодежной научной конференции «Экология и рациональное природопользование агропромышленных регионов»: Белгород, 2013. – ч.1., С. 106-109.
245. Физико-химические свойства пыли промышленности нерудных строительных материалов: Справочник. – Новороссийск, 1974. – 157 с.
246. Скрыбина Л.Я. Атлас промышленных пылей / Л.Я. Скрыбина. – М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1980, ч. 1. – 31 с.
247. Скрыбина Л.Я. Атлас промышленных пылей / Л.Я. Скрыбина. – М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1981, ч. 2. – 38 с.
248. Коузов П. А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. / П. А. Коузов, Л. Я. Скрыбина. – Л.: Химия, 1983. – 143 с.
249. РД РТМ 26-14-10-78. Пыль промышленная. Лабораторные методы исследования фізико-химических свойств. 1978. – 134 с.
250. Козій І.С. Паспортизація пилу двоокису титану та пошук шляхів для зменшення його втрат на ВАТ «Сумхімпром» / І.С. Козій, Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець, С.В. Вакал // Вісник КДПУ ім. М.Остроградського – 2009. - №6(59). – С. 193-195.

251. Балабеков О.С. Очистка газов в химической промышленности / О.С. Балабеков, Л.Ш. Балтабаев. – М.: Химия, 1991. – 256 с.

252. Специальное оборудование и процессы неорганической химии: учебник / Л.Л. Гурец, Л.Д. Пляцук, В.Ф. Моисеев и др. – Сумы: Сумский государственный университет, 2015. – 360 с.

253. Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений/ И.П. Мухленов, О.С. Ковалев, А.Ф. Туболкин, О.С. Балабеков и др. / Под ред. И.П. Мухленова и О.С. Ковалева. М.: Химия, 1987. – 208 с.

254. Гурець Л.Л. Аналіз ефективності пилоочисного обладнання хімічного підприємства / Л.Л. Гурець, О.В. Білокур// Матеріали І Всеукраїнської науково-практичної конференції «Ресурсозбереження і хіміко-екологічні проблеми технологічних процесів». – Харків, 2014. – С. 15 - 17

255. Гурець Л.Л. Аналіз пилогазоочищення виробництва гранульованого суперфосфату / Л.Л. Гурець, О.В. Білокур// Сучасні технології у промисловому виробництві: м-ли наук.-техн. конф. викладачів, співробітників, аспірантів і студ. фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 14-17 квітня 2015 р.) – Суми : СумДУ, 2015. – Ч.2. – С. 178.

256. Гурець Л.Л. Захист атмосфери від викидів промислових підприємств // Міжвузівська науково-практична конференція студентів, аспірантів і молод.вчених «Екологічний розвиток країни рамках Європейської інтеграції» – Житомир: ЖДТУ, 2014. – с.15-16

257. Гурець Л.Л. Комплексне очищення газів у апаратах з інтенсивним гідродинамічним режимом / Л.Л. Гурець, Я.П. Паляничка // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали та програма III Всеукраїнської міжвузівської конференції (Суми, 22-24 квітня 2014 р.) – Суми : СумДУ, 2014. – Ч.2. – С. 52-53.

258. Корганбаев Б. Н. Гидродинамика и массообмен в аппарате с регулярной пластинчатой вращающейся насадкой: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.17.08. – Шымкент, 1999. – 30 с.

259. Кумисбеков С.А. Гидродинамика и массообмен в аппарате с регулярной пластинчатой вибрирующей насадкой: Автореф. дис... канд. Техн. наук: 05.17.08. – Шымкент, 1999. – 24 с.

260. Пляцук Л.Д. Гидродинамика и массообмен в прямоточном массообменном аппарате с регулярной подвижной насадкой: Дис... канд. техн. наук: 05.17.08. – Казань, 1982. – 206 с.

261. Геліх О.О. Інтенсифікація процесів масообміну в абсорберах з пульсаційною насадкою: Дис....канд. техн. наук: 05.05.13. – Суми, 1998. – 160 с.

262. Мустафина А.И. Гидродинамика и массообмен в аппарате с регулярной подвижной пластинчатой насадкой в широком диапазоне нагрузок по жидкости: Дис.... канд. техн. наук: 05.17.08. – М., 1989. – 234 с.

263. Гурець Л.Л. Інтенсифікація процесу масообміну при низхідному прямотоці взаємодіючих фаз: Дис....канд. техн. наук: 05.17.08. – Суми, 2001. – 136 с.

264. А.с. 997761 СССР, МКИ В 01 D 53/20. Газожидкостной контактный аппарата для взаимодействия газа с жидкостью / Дорошенко А.В., Кологривов М.М., Угольникова Н.П., Зусманович Л.М. (СССР). - № 3334113/23-26; заявл. 09.09.81; опубл. 23.02.83, Бюл. № 7. – 6 с. : ил.

265. А.с. 1018698 СССР, МКИ В 01 D 53/20. Аппарат для тепломассообмена и мокрого пылеулавливания / Шаймарданов В.Х., Житков К.Ф., Быков В.И., Собянин В.М., Курмаев Р.Х., Каравайный В.И., Соляков П.С., Рябчиков Н.М. (СССР). – № 3378032/ 23-26; заявл. 07.01.81; опубл. 23.05.83, Бюл. № 19. – 3 с. : ил.

266. А.с. 793620 СССР, МКИ В 01 D 53/20. Тепломассообменный аппарат / Алексеев В.П., Дорошенко А.В., Угольникова Н.П., Кологривов

М.М. (СССР). – № 2475062/23-26; заявл. 14.04.77; опубл. 07.01.81, Бюл. № 12. – 3 с. : ил.

267. А.с. 682255 СССР, МКИ В 01 D 53/20. Теплообменный аппарат / Алексеев В.П., Дорошенко А.В., Угольникова Н.П., Гонаслес Р., Осьмак В.В., Юдин А.И. (СССР). – № 2194879/23-26; заявл. 01.12.75; опубл. 30.08.79, Бюл. № 32. – 3 с. : ил.

268. А.с. 1152630 СССР, МКИ В 01 D 53/20. Аппарат с насадкой / Чаусов М.В., Федоров В.А., Миронов В.П., Кларк В.Н. (СССР). – № 3508384/23-26; заявл. 03.11.82; опубл. 30.04.85, Бюл. № 16. – 4 с.: ил.

269. Шарыгин М.П. Разработка и расчет устройств для разрушения отложений и пылеулавливания с управляемым вихревым потоком: Дис.... д-ра. техн. наук: 05.17.08/ М.П. Шарыгин. – Чимкент, 1992. – 480с.

270. Ткач А.Г. Исследование абсорбционно-десорбционных процессов содового производства с целью их интенсификации: автореф. дис... докт. техн. наук: спец. 05.17.08 / А.Г.Ткач. – Харьков, 1977. – 41 с.

271. Колесниченко В.Т. Применение плоских тарелок с большими отверстиями в средах, инкрустирующих и забивающих аппараты осадками. Реф. сб. Оборудование, его эксплуатация, ремонт и защита от коррозии в химической промышленности / В.Т. Колесниченко. – М.: НИИТЭХИМ, 1977. – №12. – С. 1-5.

272. Цейтлин М.А. Массопередача в процессах очистки и охлаждения газов и жидкостей содового производства: дис. ... докт. техн. наук: 05.17.08 / М.А. Цейтлин. – Харьков, 2003. – 305 с.

273. Крашенинников С.А. Технология соды / С.А. Крашенинников. – Химия, 1988. – 304 с.

274. Фрумин В.М. Гидродинамика контактных элементов крупной перфорации с продувкой переливов. / В.М. Фрумин, В.М. Бурштейн, В.Н. Иваньчиков // Вопросы химии и хим.технологии. – Днепропетровск: УГХТУ. – 2002. – №1. – С. 109 – 111.

275. Цейтлин М.А. Абсорбционная очистка газов в содовом производстве: Монография / М.А. Цейтлин, В.Ф. Райко, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, В.П. Шапорев. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – 144 с.

276. А.с. 634756 СССР, МКИ В 01 D 3/22. Провальная тарелка / Ю.А. Арнаутов, З.С. Ахунов, М.А. Берлин, С.В. Гладильщикова, В.Г. Гореченков, Ю.К. Молоканов, Р.Е. Сусанов (СССР). – №2162901/23-26; заявл. 06.08.75; опубл. 30.11.78, Бюл. № 44. – 2 с. : ил.

277. А.с. 816480 СССР, МКИ В 01 D 3/22. Барботажная провальная тарелка / В.С. Мельников, С.Е. Глейкин, О.В. Мельникова, С.А. Круглов, Ю.К. Молоканов (СССР). – № 2768188/23-26; заявл. 18.05.79; опубл. 30.03.81, Бюл. № 12. – 3 с.

278. А.с. 980740 СССР, МКИ В 01 D 3/22. Тарелка провального типа / В.Г. Плаксин, М.Н. Поспелов, О.Д. Путилина, М.А. Зайденберг, В.Г. Назаров (СССР). – № 3285670/23-26; заявл. 06.05.81; опубл. 15.12.28, Бюл. № 46. – 2с.

279. Гурець Л. Газоочистное оборудование для комплексной очистки газов / Л. Гурець, И. Козий, Д. Пляцук. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 57 с.

280. Гурець Л.Л. Очистка промислових газів в апаратах із провальними тарілками великих отворів / Л.Л. Гурець, І.С. Козій // Вісник КДПУ ім Остроградського. – вип. 5/2008 (52), ч.2.– С. 162 – 164.

281. Пляцук Л.Д. Гидродинамика аппаратов с контактными элементами провального типа / Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець // Труды Международной научно-практической конференции «Современные проблемы инновационных техно-логий в образовании и науке», т. 1. Химия, технология – Республика Казахстан, г. Чимкент, 2009. – с. 43 – 48.

282. Пляцук Л.Д. Експериментальні дослідження гідродинаміки провальних тарілок великих отворів / Пляцук Л.Д., Гурець Л.Л., Козій І.С. // Вісник СумДУ. – 2009. – №1. – С.61-66.

283. Гурець Л.Л. Визначення гідравлічного опору в апаратах в крупнодірчастими тарілками / Л.Л.Гурець, І.С. Козій // М-ли науково-

технічної конф. викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – С. 119

284. Пляцук Л.Д. Очищення газових викидів в апаратах з провальними тарілками великих отворів/ Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець // Матеріали VI Международной конференции «Сотрудничество для решения проблемы отходов» – Харьков: Независимое агентство экологической информации, 2009. – с.131-133

285. Козій І.С. Дослідження ефективності пилоочищення в апараті з провальними тарілками великих отворів / І.С. Козій, Л.Л. Гурець // Вісник КДПУ ім. М.Остроградського – 2010. - №6(65). – С. 160-162.

286. Козий И.С. Исследование гидродинамики пылеочистных аппаратов/ И.С. Козий, Л.Л. Гурець // Матеріали міжнародної наукової конференції аспірантів та студентів – Донецьк, 14-16 квітня 2009 р. – С. 11-12.

287. Грешилов А.А. Математические методы построения прогнозов / А.А. Грешилов, В.А. Стакун, А.А. Стакун. – М.: Радио и связь, 1997.–112 с.

288. Шашков В.Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: Учебное пособие / В.Б. Шашков — Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. –363 с.

289. Козий И.С. Расчет высоты газожидкостного слоя в аппарате с провальными тарелками больших отверстий / Козий И.С., Гурець Л.Л., Чаплыгин А.А. // Вісник СумДУ. –2010. – №3. – С. 61-67.

290. Соломаха Г.П. Уравнение массоотдачи в газовой фазе на решетчатых и дырчатых провальных тарелках// Хим. пром. – 1964. – № 10. – С. 749 – 753.

291. Пляцук Л.Д. Гидродинамика аппарата для мокрой пылегазоочистки / Л.Д. Пляцук, О.М.М. Кетанех, Л.Л. Гурець, Д.О. Лазненко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: Вид-во КДПУ, 2003.– Вип. 21, – № 4. – С. 181-182.

292. Кафаров В.В. Перспективы развития научных основ химической технологии / В.В. Кафаров, Н.Н. Кулов, И.И. Дорохов // Теор. осн. хим. технол. – 1990. – Т.24, №1. – С. 3 – 11.

293. Стулов Л.Д. Об эффективности столкновений твердых аэрозольных частиц с поверхностью воды / Л.Д. Стулов, Ф.И. Мурашкевич, Н.А. Фукс // Коллоид. жур. – 1978. – Т.40, №3. – С.513 – 517.

294. Гурець Л.Л. Гідродинамічні характеристики апаратів з регулярною рухомою насадкою // Вісник КрНУ ім Остроградського. – вип. 6/2014 (89), ч.1.– С. 166 – 170

295. Волненко А.А. Особенности формирования и течения пленок жидкости по плоским и криволинейным поверхностям / А.А. Волненко, Б.Н.Корганбаев, О.С. Балабеков // Индустриально-инновационное развитие – основа устойчивой экономики Казахстана: Тр. межд. науч.-практ. конф. – Шымкент: ЮКГУ им. М.Ауезова, 2006. – С. 306-309.

296. Балабеков О.С. Об аналогии между изменением формы капли и интенсивностью массопереноса в обтекающем ее потоке / О.С. Балабеков, Б.Н. Корганбаев, М.З. Ескендиоров, М.А. Алтаев // Вестник НАН РК. – 2002. –№6. – С.22-26.

297. Осама Мостафа Махмуд Кетанех. Зниження техногенного впливу виробництва гранульованого суперфосфату на атмосферу: дис... канд.техн. наук: 21.06.01/ Осама Мостафа Махмуд Кетанех. – Львів.: 2005. – 150 с.

298. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: справочник / Г. Корн, Т. Корн ; Под ред. И.Г. Арамановича. — 5-е изд. — М. : Наука, 1984. — 831 с.

299. Гурець Л.Л. Масообмін при хемосорбції відхідних газів / Л.Л. Гурець, Л.Д. Пляцук // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки, №1, 2011. – с. 58-61.

300. Пляцук Л.Д. Процеси та апарати природоохоронних технологій. Теоретичні основи: підручник / Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець. – Суми: Університетська книга, 2011. – 270 с.

301. Крылов В.С. Теоретический анализ массопередачи в сферических каплях при больших числах Пекле / В.С. Крылов, А.И. Сафонов, К.В. Гомонова // Теор. основы хим. технол., 1979. – т.13, №4. – С.518-522.

302. Полянин А.Д. Качественные особенности внутренних задач нестационарного конвективного массо- и теплообмена при больших значениях Пекле/ А.Д. Полянин //Теор. основы хим. технол., 1984. – т.18, №3 – С. 284-296

303. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости / Бэтчелор Дж. – М.: Мир, 1973. – 758с.

304. Кишиневский М.Х. О двух путях теоретического анализа абсорбционных процессов / М.Х. Кишиневский //Журнал прикл. химии, 1955. – т.28, №9. – С.927-933.

305. Кафаров В.В. Об оценке параметров математических моделей гидродинамической структуры потоков статистическими методами / В.В. Кафаров, В.Г. Выгон, Л.С. Гордеев // Теор. основы хим. технол., 1968. – т.2, №2. – С.267-271.

306. Гурець Л.Л. Масоперенесення в краплі рідини при вихровому русі газового потоку/ Л.Л. Гурець // КАЗАНТИП-ЭКО-2014. Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго-ресурсосбережения: сборник трудов XXII Межотраслевой научно-практической конференции: в 2 т. Т.2 / ГП «УкрНТЦ «Энергосталь». – Х.:НТМТ, 2014. – С. 118-121

307. Гурець Л.Л. Оцінка ефективності газоочищення на основі визначення коефіцієнта масовіддачі у краплі рідини в апаратах з вихровим рухом газового потоку/ Л.Л. Гурець // Екологія и промисленность. – №2. – 2015. – С. 46-48

308. Гурець Л.Л. Абсорбція добре розчинних газів в апаратах з провальними тарілками великих отворів / Л.Л. Гурець // Екологічна безпека. – 2/2013(16). – С. 74-77

309. Хромова Е.М. Конденсационные механизмы улавливания субмикронных пылей в мокрых газоочистителях: дис.... канд. физ.-мат.наук: 01.04.14 / Хромова Елена Михайловна. – Томск, 2005. – 152 с.

310. Тадалов Т. Структура потоков и массообмен на крупнодырчатой провальной тарелке промышленных размеров. – дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Тадалов Т. – М., 1983. – 180 с.

311. Козій І.С. Аналіз гідродинамічних і пиловловлюючих характеристик апарата з провальними тарілками / І.С. Козій, Л.Л. Гурець, І.О. Трунова, Т.В. Курбет // Вісник ЖДТУ. – 2013, № 4 (67). – С. 120 – 125.

312. Пляцук Л.Д. Производство гранулированного суперфосфата. Защита окружающей среды от пылевых выбросов / Л.Д. Пляцук, Д.А. Лазненко, Л.Л. Гурец, Кетенех Осама Мостафа Махмуд // Хімічна промисловість України. – 2003, Вип. 56, – № 3. – С. 9 - 12

313. Гурець Л.Л. Комплексний підхід до очищення газів, що відходять, у апаратах з регулярною рухомою насадкою / Л.Л. Гурець // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: Вид. КДПУ, 2007, Вип. 1, – № 42, ч.1. – С. 132 -134

314. Зенков В.В. Исследование межфазной поверхности и массопередачи в жидкой фазе в колонне с провальными тарелками: автореф. дис.. канд. техн. наук: 05.17.08 / В.В. Зенков. – М., 1974. – 22с.

315. Минаков И.А. Сравнительный анализ некоторых методов случайного поиска и оптимизации / И.А. Минаков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 1999. – № 2. – Том 1. – С. 286-293.

316. Гладкий А.В. Абсорбционные методы очистки газов от двуокиси серы. Обзорная информация / А.В. Гладкий // Промышленная и санитарная очистка газов. – М., ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1978, серия ХМ-14 – С.3-7

317. Деклараційний пат. на винахід 57669 А Україна, МКИ В 01 D 47/02. Апарат для мокрого очищення газів: Деклараційний пат. 57669 А Україна, МКИ В 01 D 47/02/ Пляцук Л.Д., Лазненко Д.О., Гурець

Л.Л.(Україна), Осама Мостафа Махмуд Кетанєх (Ю); Сумський державний університет. - № 2002108337; Заявл. 22.10.2002; Опубл. 16.06.2003; Бюл. № 6. – 3 с.ил.

318. Коваленко А. П. Очистка отходящих газов тепловых электростанции от оксидов азота и серы растворами карбамида. – автореф. дис. ... канд. техн. наук: 11.00.11. /А.П. Коваленко– М., Российский химико-технологический университет им. Д.Л.Менделеева., 1994. – 16 с.

319. Пат. 44700 України на корисну модель, МПК (2009) B01D47/04. Пінний апарат / Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець, І.С. Козій; заявник та утримувач патенту Сумський державний університет. – № а 2009 00337; заявл. 19.01.09; опубл. 10.08.10, Бюл. №15. – 2 с.

320. Гурець Л.Л. Дослідження впливу пилових викидів виробництва двоокису титану/ Л.Л. Гурець, І.С. Козій // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – №4. – С. 180-185

321. Pliatsuk L. D. Industrial research studies of gas treatment device with a large hole sieve trays / Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець, І.С. Козій, Р.А. Васькін// Науковий вісник НГУ. – 2016. – № 3. – С. 95 - 100

322. Гурець Л.Л. Очистка газових викидів при виробництві двоокису титану // М-ли науково-технічної конф. викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету ТеСЕТ – Суми: Вид-во СумДУ, 2009. – С. 79

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Карти м. Суми з нанесенням промислових підприємств

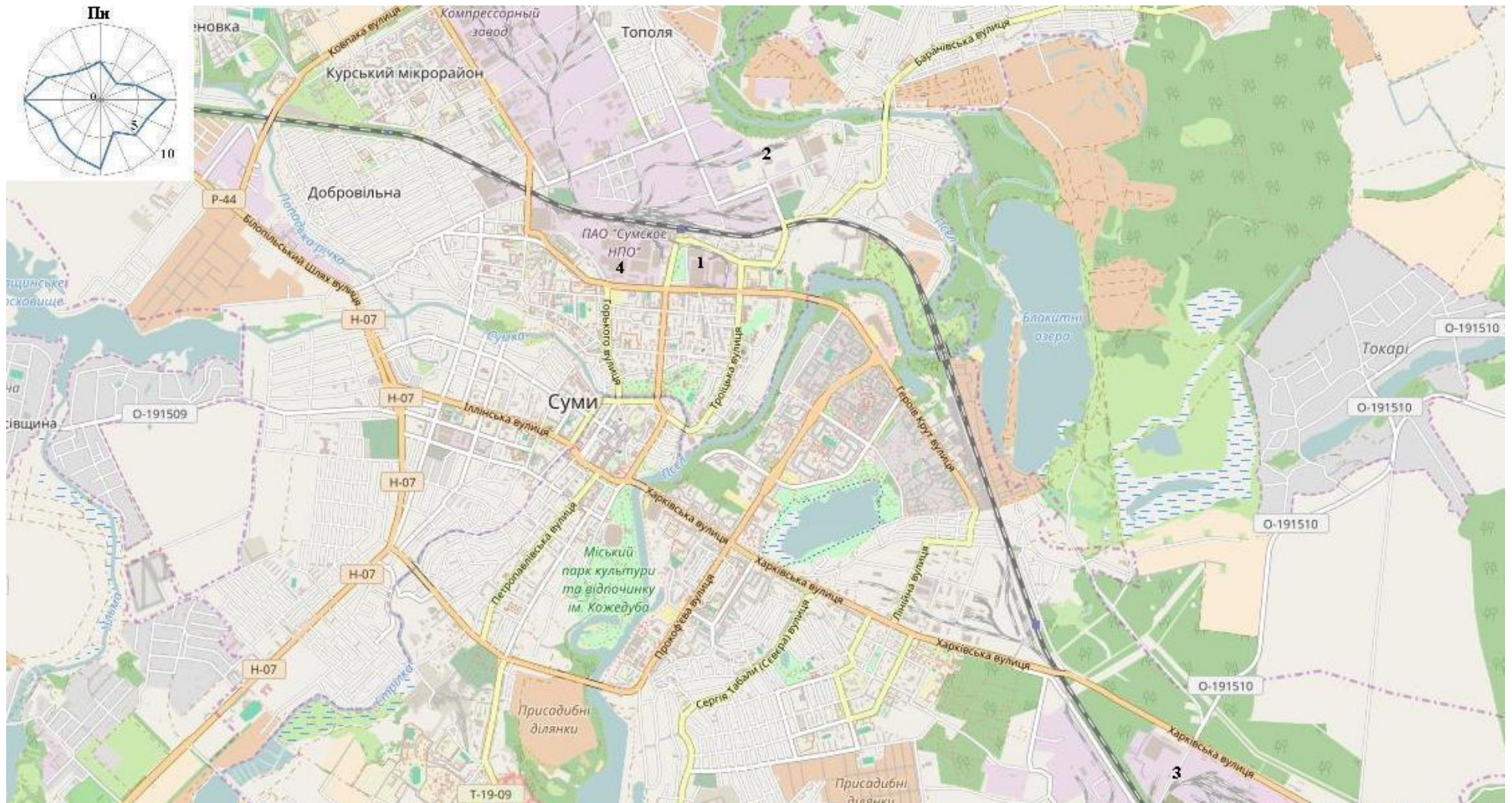
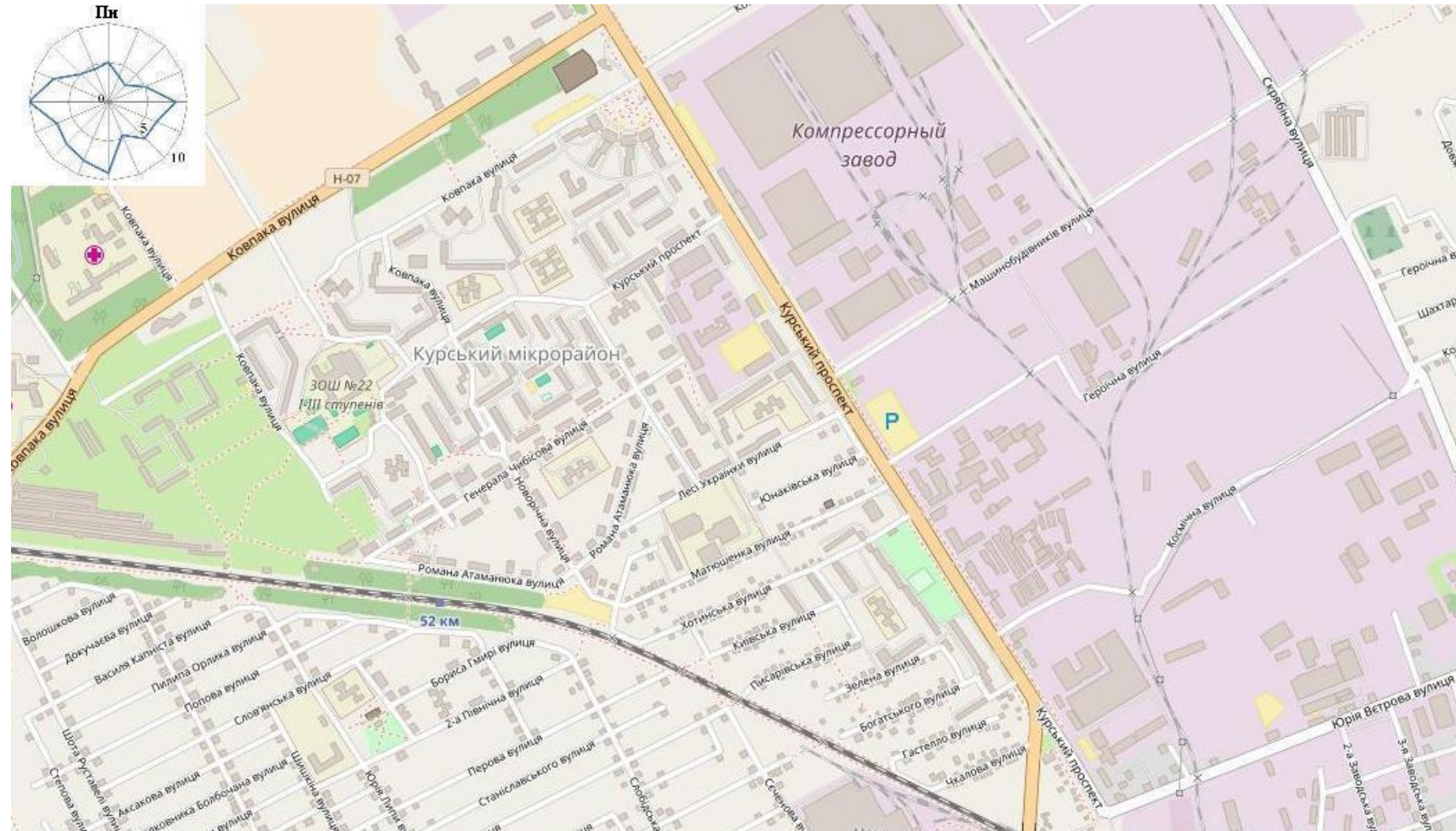


Рисунок А.1 – Карта міста Суми з розташуванням підприємств: 1 – АО «Сумський завод «Насосенергомаш»; 2 – Сумська ТЕЦ; 3 – ПАТ «Сумхімпром»; Сумське НВО



a)



б)

Рисунок А.2 – Розташування машинобудівних підприємств міста Суми в забудові: а) ПАО «Сумське НПО» та АО «Сумський завод «Насосенергомаш»; б) компресорний завод ПАО «Сумське НПО»

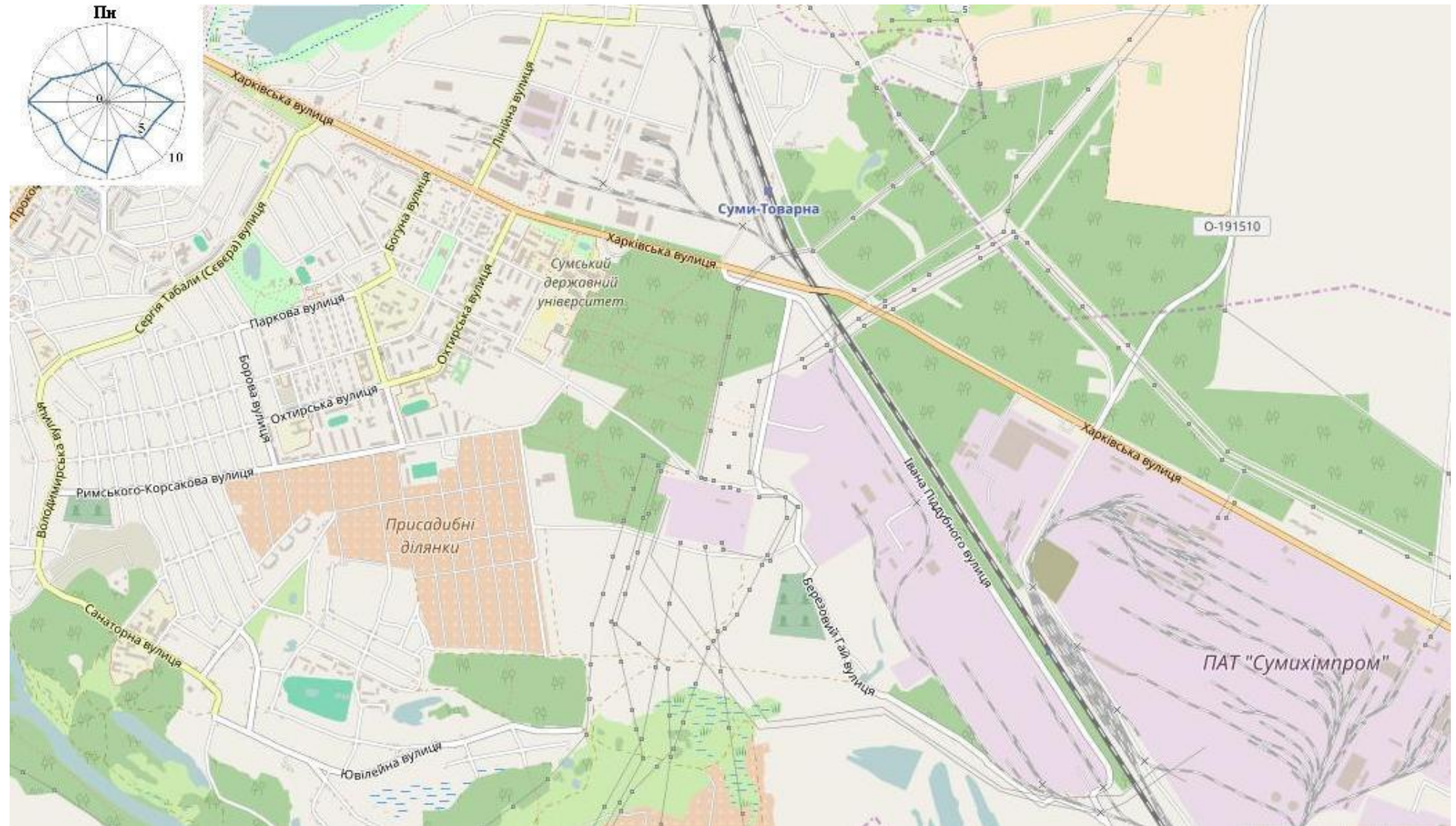


Рисунок А.3 – Розташування ПАТ «Суміхімпром» в забудові міста

Додаток Б

Схема реалізації чисельного розв'язку диференційного рівняння розповсюдження домішок в атмосфері

1. $Q \leftarrow$
2. $\mu \leftarrow$
3. $\sigma \leftarrow$
4. $U \leftarrow$
5. $x_0 \leftarrow$
6. $h \leftarrow$
7. $C[N] \leftarrow$
8. $C[1] \leftarrow$
9. $C[2] \leftarrow$
10. for $i=2..N-1$ do
11. $C[i+1] = [Q * \delta * [x - x_0] - [\mu / [h * h] - u / 2 * h] * C[i-1] + [-2 * \mu / [h * h] + \sigma] * C[i]] / [\mu / [h * h] + u / 2 * h]$
12. end do
13. $C[N] \Rightarrow$

Додаток В

Результати оптимізаційних розрахунків



maximize $11.25(x^{1.15})y^{0.325}(0.45x^2 - 1.01x + 1.141)$ in $1.5 \leq x \leq 3.5$; $5 \leq y \leq 20$ ☆



Web Apps Examples Random

Input interpretation:

maximize	function	$11.25 x^{1.15} y^{0.325} (0.45 x^2 - 1.01 x + 1.141)$
	domain	$1.5 \leq x \leq 3.5 \wedge 5 \leq y \leq 20$

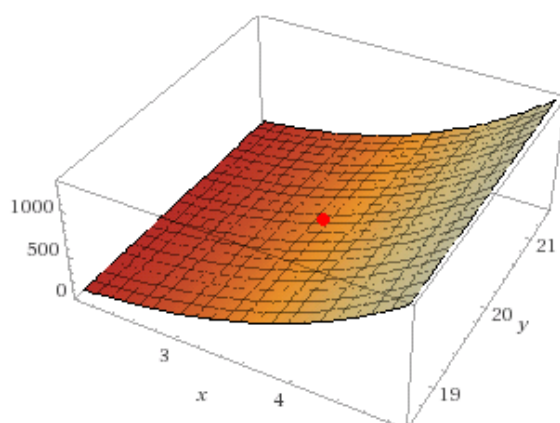
Open code

$e_1 \wedge e_2 \wedge \dots$ is the logical AND function

Global maximum:

$$\max\{11.25 x^{1.15} y^{0.325} (0.45 x^2 - 1.01 x + 1.141) \mid 1.5 \leq x \leq 3.5 \wedge 5 \leq y \leq 20\} \approx 392.294 \text{ at } (x, y) \approx (3.5, 20.)$$

3D plot:



mazimize (y * 9 * 13.172 * (x^0.772)*(y^0.34))/(1.951*x^0.83) in 12<=x<=20; 20<=y<=40



Web Apps Examples Random

Interpreting 'mazimize' as 'maximize'

Input interpretation:

maximize	function	$\frac{y \times 9 \times 13.172 x^{0.772} y^{0.34}}{1.951 x^{0.83}}$
	domain	$12 \leq x \leq 20 \wedge 20 \leq y \leq 40$

Open code

$e_1 \wedge e_2 \wedge \dots$ is the logical AND function

Global maximum:

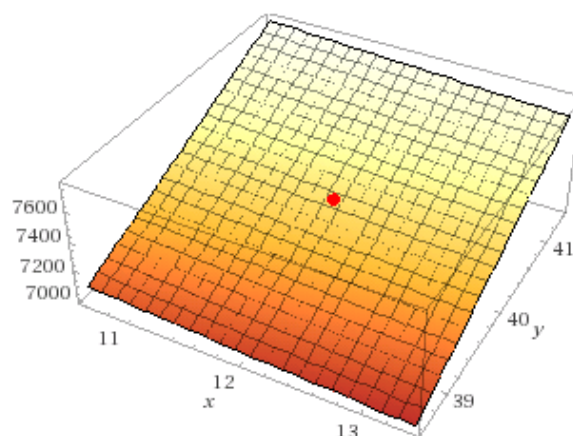
Approximate form

$$\max \left\{ \frac{y \times 9 \times 13.172 x^{0.772} y^{0.34}}{1.951 x^{0.83}} \mid 12 \leq x \leq 20 \wedge 20 \leq y \leq 40 \right\} =$$

$$\frac{1}{1951} 1580640 \times 2^{1519124650404119/1680447622128450} 5^{17/50} \text{ at } (x, y) = (12, 40)$$



3D plot:



Додаток Г

Карти розсіювання забруднюючих речовин

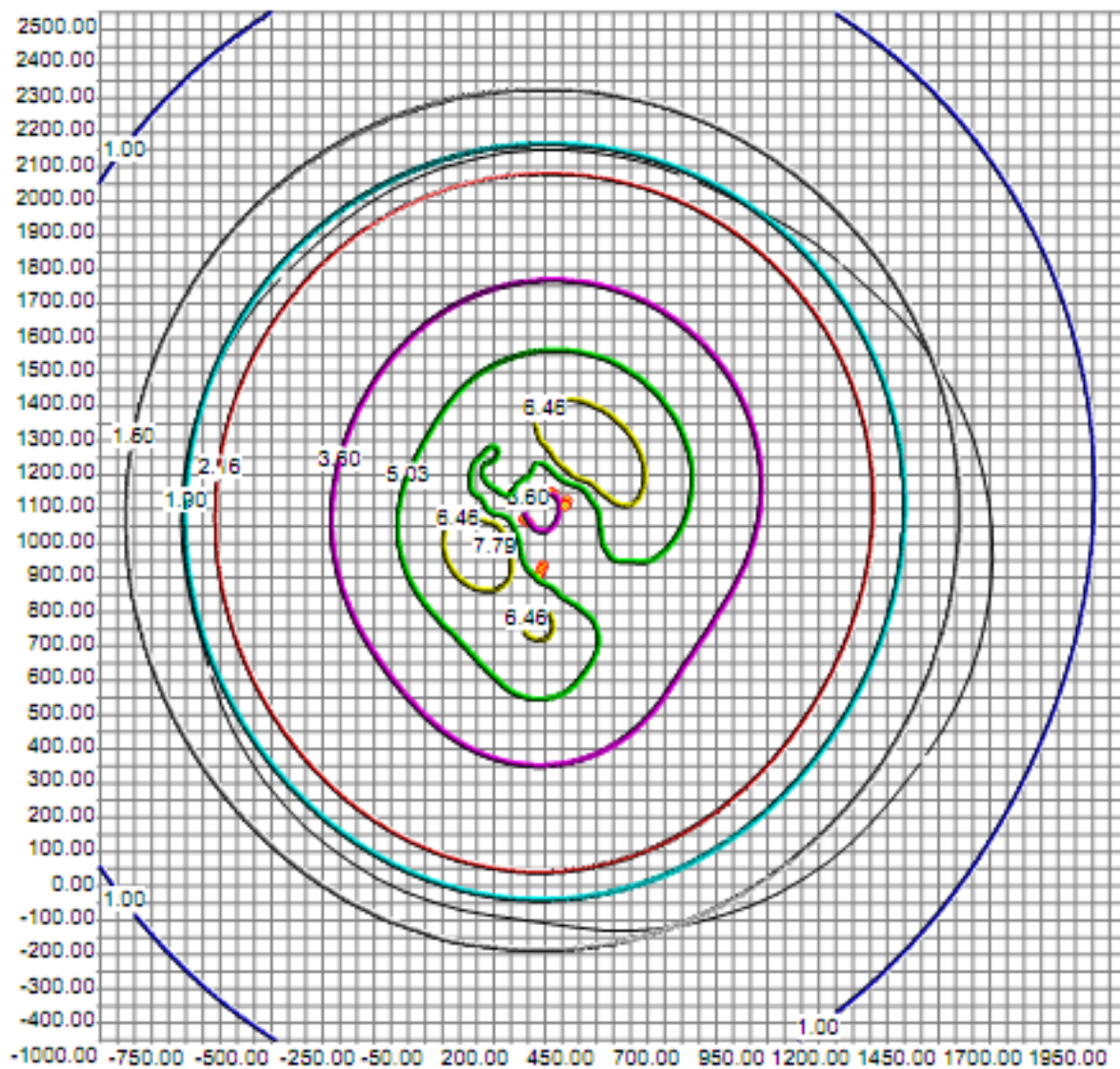


Рисунок Г.1 – Карта розсіювання пилу ільменіту за існуючої системи
пилловловлення

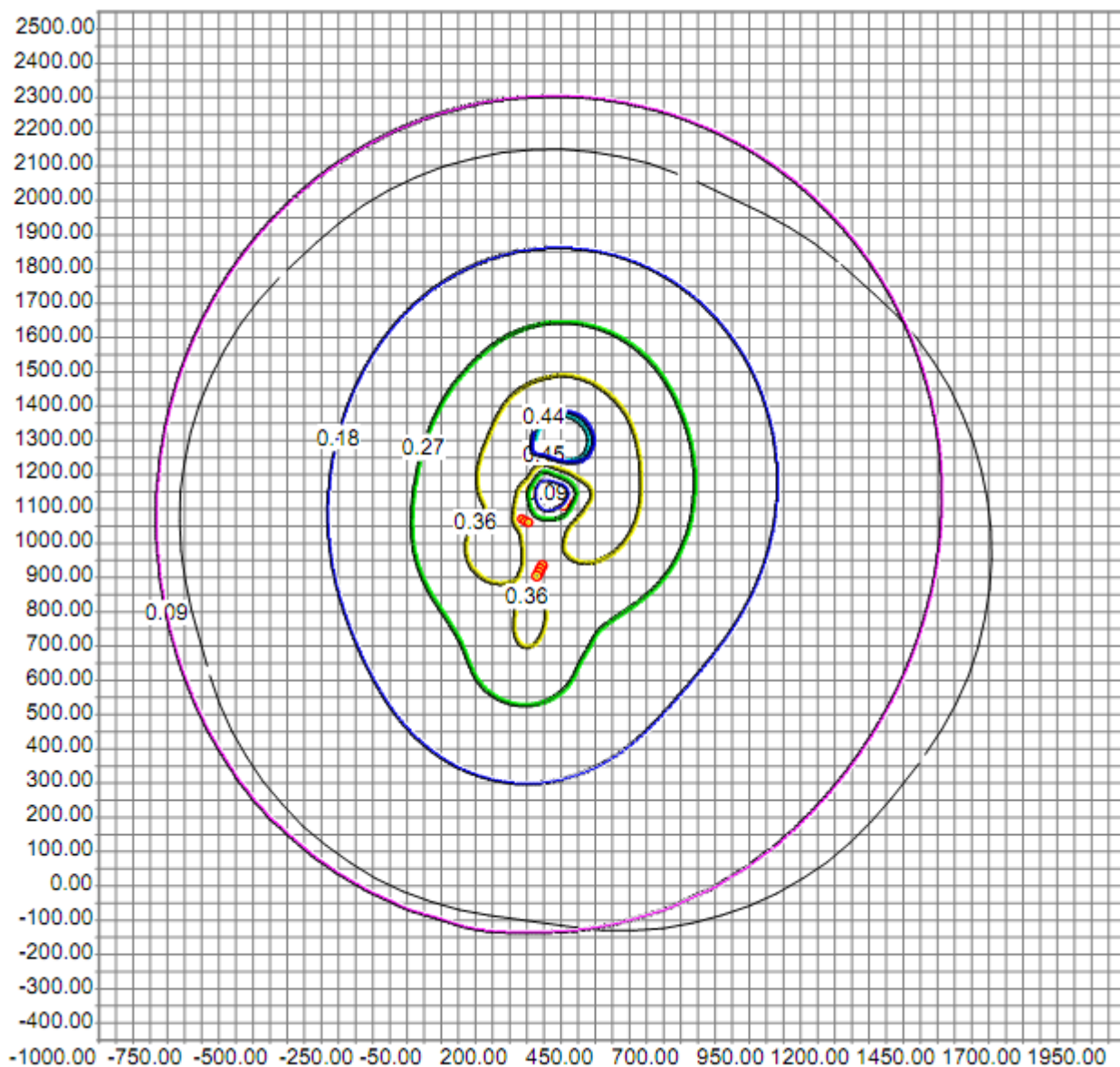


Рисунок Г.2 – Карта прогнозу розсіювання пилу ільменіту з впровадженням апарату з ПТВО

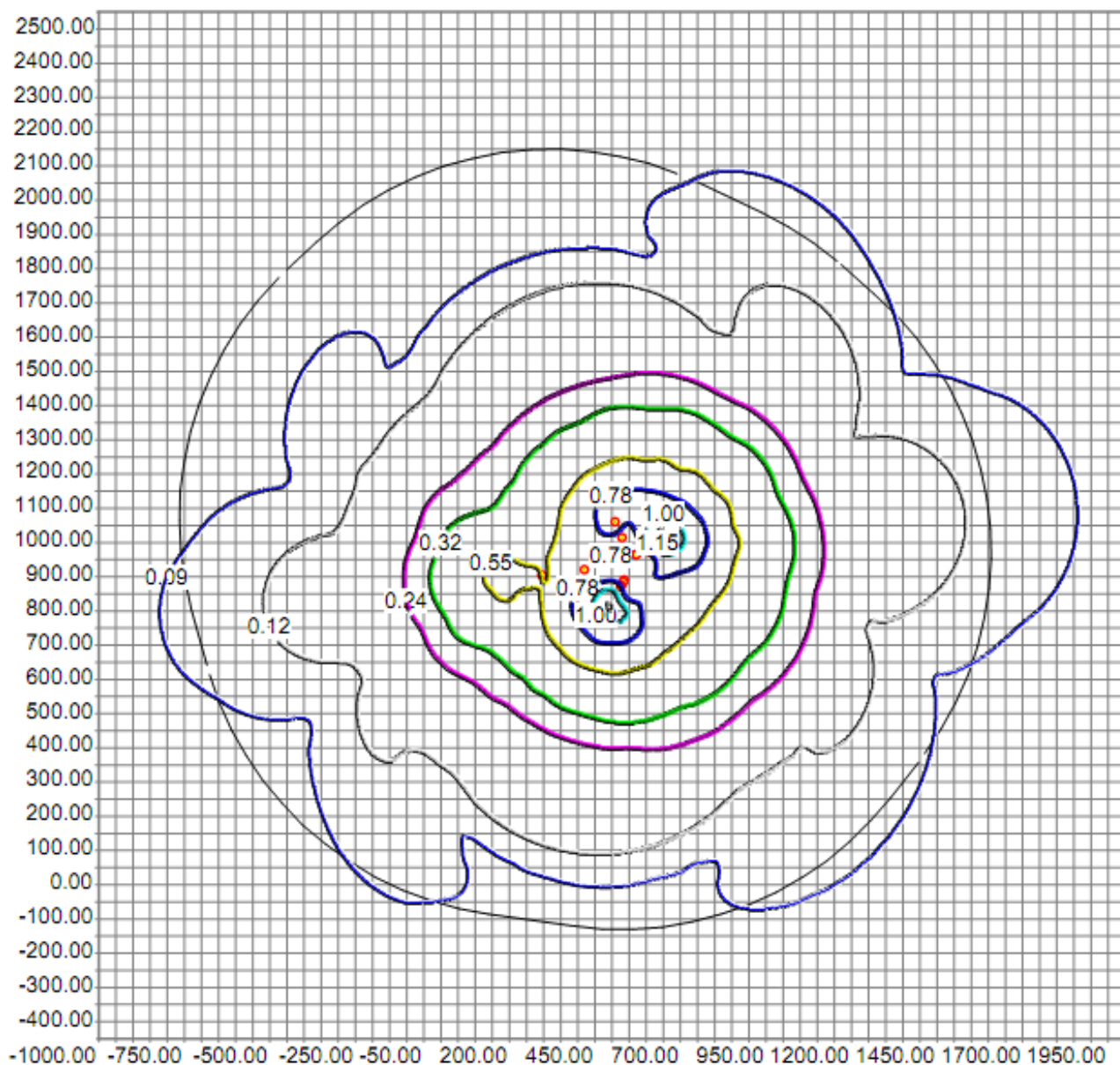


Рисунок Г.3 – Карта розсіювання пилу титану (IV) оксиду за існуючої системи пиловловлення

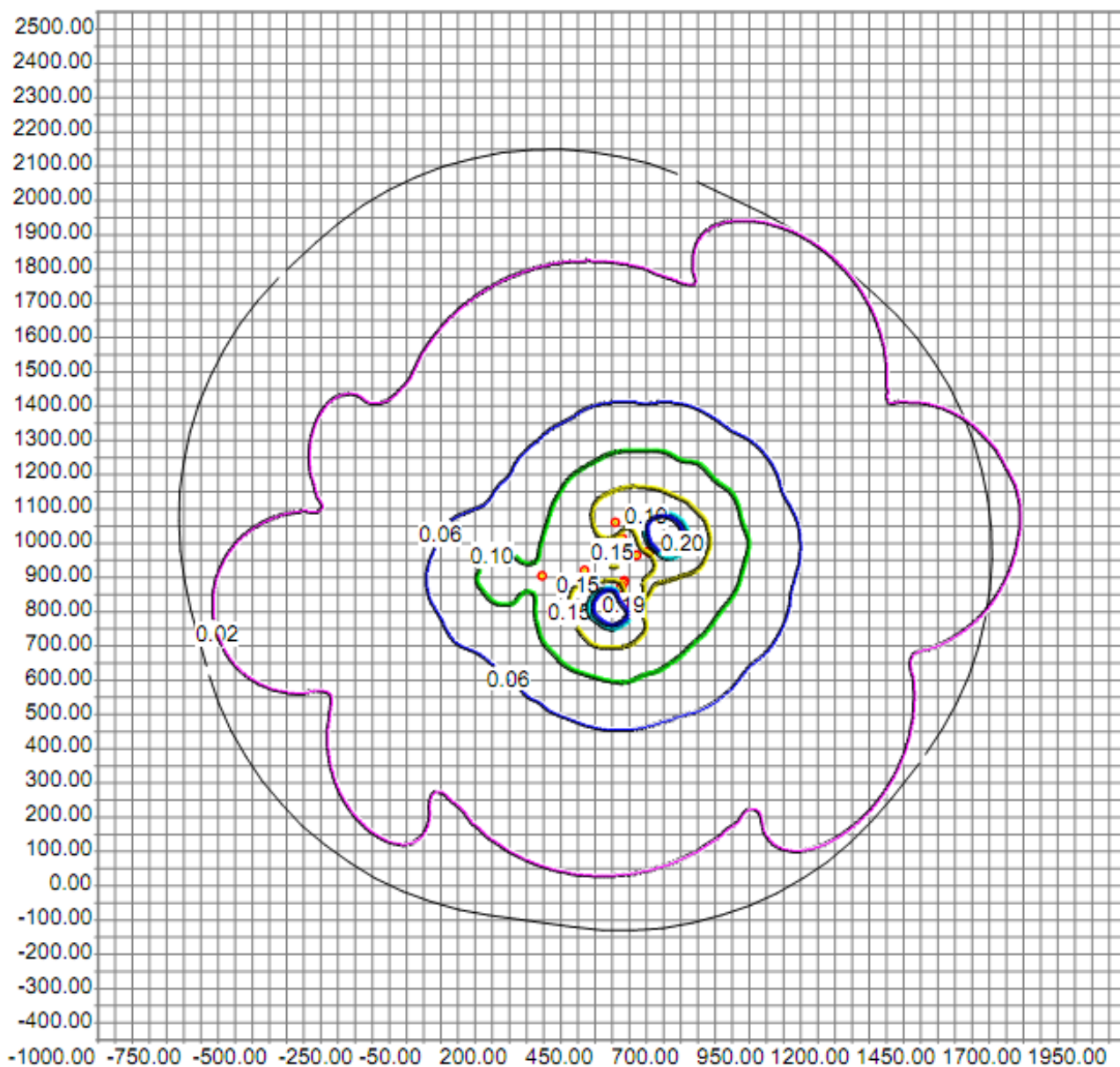


Рисунок В.4 – Карта прогнозу розсіювання пилу титану (IV) оксиду з впровадженням апарату з ПТВО

ДОДАТОК Д

Розрахунок еколого-економічного ефекту від зменшення забруднення атмосферного повітря при впровадженні запатентованого газоочисного обладнання

Еколого-економічний ефект від впровадження запатентованого газоочисного обладнання розраховувався як відвернутий економічний збиток, заподіяний викидами забруднень в атмосферне повітря від окремих стаціонарних джерел забруднення.

Розрахунок еколого - економічного ефекту, одержаного за рахунок відвернутого збитку на Сумській ТЕЦ ТОВ «Сумитеплоенерго»

За рахунок впровадження апарата запатентованої конструкції на Сумській ТЕЦ ТОВ «Сумитеплоенерго» викиди сульфур (IV) оксиду зменшились на 1086,24 т/рік; золи – на 1944,72 т/рік

$$m_1 = 1086,24 \text{ т/рік};$$

$$m_2 = 1944,72 \text{ т/рік}.$$

У відповідності до розділу VIII, ст.243 Податкового кодексу України [1] ставки податку за викиди в атмосферне повітря становлять:

для сульфур (IV) оксиду – 1968,65 грн/т;

для твердих речовин – 74,17 грн/т.

Відвернутий збиток :

$$Z = 1086,24 \cdot 1968,65 + 1944,72 \cdot 74,17 = 2\,282\,666,26 \text{ грн/рік}$$

Розрахунок еколого-економічного ефекту, одержаного за рахунок відвернутого збитку на Охтирській ТЕЦ ТОВ «Брокенергія»

За рахунок впровадження апарата запатентованої конструкції на Охтирській ТЕЦ ТОВ «Брокенергія» викиди нітрогену (IV) оксиду зменшились на 496,692 т/рік.

У відповідності до розділу VIII, ст.243 Податкового кодексу України ставки податку за викиди в атмосферне повітря становлять:

для нітрогену (IV) оксиду – 1968,65 грн/т.

Відвернутий збиток :

$$Z = 496,692 \cdot 1968,65 = 977\,812,71 \text{ грн/рік}$$

Розрахунок еколого-економічного ефекту, одержаного за рахунок відвернутого збитку на ПАТ «Суміхімпром» у виробництві двоокису титану пігментного

За рахунок впровадження апарата запатентованої конструкції на ПАТ «Суміхімпром» викиди пилу зменшились на 1016,475 т/рік.

У відповідності до розділу VIII, ст.243 Податкового кодексу України ставки податку за викиди в атмосферне повітря становлять:

для твердих речовин – 74,17 грн/т.

Відвернутий збиток :

$$Z = 1016,475 \cdot 74,17 = 75\,391,95 \text{ грн/рік}$$

1. Податковий кодекс України <https://buhgalter911.com/normativnaya-baza/nalogovy-kodeks/rozdil-viii-ekologichniy-1020945.html>

ДОДАТОК Е**Акти впровадження результатів дисертаційної роботи**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Сумського ДНДІ «МІНДІП»



Вакал С.В.

2011 р.

АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи
Гурець Лариси Леонідівни при дослідно-промислових випробуваннях
пилоочисного апарата**

У відповідності з планом науково-дослідних робіт кафедри прикладної екології Сумського державного університету для дослідження у промислових умовах розроблений пилоочисний апарат для мокрого очищення відхідних газів. Дослідно – промислові дослідження проводились на відхідних газах, які містили пил ільменіту та двоокису титану.

Дослідно-промислові випробування проводили за таких умов:

- навантаження установки по газовому потоку складало 1000 м³/год;
- концентрація твердих частинок на вході в апарат – 2,5 -3 г/м³;
- гідравлічний опір апарата - 1300 Па.

Випробування показали, що запропонований апарат має високу ефективність очищення від твердих частинок (99,2 - 99,5%), низьку енергоємність і стабільну роботоздатність за умов тривалої експлуатації.

На основі аналізів результатів випробувань зроблено такі висновки:

- встановлено роботоздатність пилогазоочисного апарату та його висока ефективність при очищенні відхідних газів від твердих частинок широкому робочому діапазоні навантажень по газовій та рідкій фазах;
- рекомендувати пилоочисний апарат для широкого впровадження в для очищення відхідних газів промислових підприємств.

Передані Сумському ДНДІ «МІНДІП» результати будуть використані в якості рекомендацій при реконструкції виробництва двоокису титану на ПАТ «Сумхімпром».

Від Сумського ДНДІ «МІНДІП»

Начальник відділу пігментів та
лакофарбових рецептур



Н.Г. Єфіменко

Від Сумського державного університету

Науковий керівник, к.т.н., доцент



Л.Л.Гурець

Відповідальний виконавець



І.С. Козій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора з наукових питань
СП «Технополіс»

О.С. Шевченко

„15” листопада 2011 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Гурець Лариси Леонідівни для підвищення ефективності пилоочищення у
виробництві пігментного двоокису титану

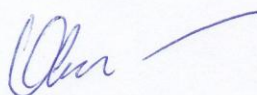
У відповідності з планом науково-дослідних робіт кафедри прикладної екології Сумського державного університету розроблений пилоочисний апарат для мокрого очищення відхідних газів. Дослідно – промислові дослідження проводились на відхідних газах, які містили пил ільменіту та двоокису титану.

Зміст переданих матеріалів у повній мірі відображає дані дослідно-промислових випробувань, на основі яких розроблені рекомендації з проектування та експлуатації апарата.

Отримані результати використовувались для розробки та проектування пилоочисного обладнання у виробництвах залізоокисних пігментів та пігментного двоокису титану.

Від СП «Технополіс»

Головний інженер проекту



В.І. Овсяник

Від Сумського державного університету

Науковий керівник, к.т.н., доцент



Л.Л. Гурець

Відповідальний виконавець



І.С. Козій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова правління ПрАТ інститут «Сумипроєкт»

Павловський В.Г.

2014 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Гурець Лариси Леонідівни для використання в процесі проектування
промислових підприємств

Цим актом стверджується, що Гурець Л.Л. передано у ПрАТ інститут «Сумипроєкт» результати її дисертаційної роботи «Науково-теоретичні основи системного підходу до вибору газоочисного обладнання з метою підвищення рівня екологічної безпеки» щодо вибору газоочисного обладнання промислових підприємств. Зміст переданих матеріалів у повній мірі відображає методологію вибору газоочисного обладнання, порядок розрахунку газоочисних апаратів. Матеріали дисертації будуть використані для вибору та розрахунку газоочисного обладнання промислових підприємств.

Від ПрАТ інститут «Сумипроєкт»

Директор по проектній діяльності

Л.Л. Тихонкова

Від Сумського державного університету

Завідувач кафедри прикладної екології
д.т.н., професор
Доцент кафедри прикладної екології
к.т.н., доцент

Л.Д. Пляцук

Л.Л. Гурець

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ТОВ «БРОКЕНЕРГІЯ»
 Щербина О.Ю.
 „3” листопада 2015 р.



АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
Гурець Лариси Леонідівни на Охтирській ТЕЦ

Ми, комісія у складі:

Васильєв В.В. - головний інженер Охтирської ТЕЦ,

Пляцук Л.Д. - д.т.н., завідувач кафедри прикладної екології СумДУ,

Гурець Л.Л. - к.т.н., доцент кафедри прикладної екології СумДУ,
 стверджуємо, що на підприємстві Охтирська ТЕЦ ТОВ «БРОКЕНЕРГІЯ» проведені
 промислові випробування апарату з ПТВО для очищення відхідних газів,
 запропонованого у дослідженнях доцента кафедри прикладної екології Гурець
 Лариси Леонідівни.

Дослідно-промислові випробування проводили за таких умов:

- в якості абсорбенту використовувався розчин карбаміду концентрацією 40 г/л;
- навантаження установки по газовому потоку складало 100 тис.м³/год;
- концентрація оксидів азоту - 600 мг/м³;
- гідравлічний опір апарату складав 1500 Па.

Випробування показали, що запропонований апарат має ефективність
 очищення 94 - 95%, низьку енергоємність і стабільну роботоздатність за умов
 тривалої експлуатації.

Запропоновано рекомендувати газоочисний апарат для широкого
 впровадження на підприємствах теплоенергетики промисловості.

Члени комісії

В.В. Васильєв

Л.Д. Пляцук

Л.Л. Гурець

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер ДНДПІ основної хімії «НІОХІМ»

Кузенко Ю.М.

« 09 » _____ 2016 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Гурець Лариси Леонідівни для використання в процесі проектування
підприємств основної хімії

Цим актом стверджується, що доцентом кафедри прикладної екології Сумського державного університету Гурець Л.Л. передано у ДНДПІ основної хімії «НІОХІМ» результати її дисертаційної роботи щодо прогнозування впливу промислових підприємств на атмосферне повітря та методології вибору газоочисного обладнання. Матеріали дисертації будуть використані при розробці проектів содового виробництва та оцінки впливу на навколишнє середовище підприємств основної хімії.

Від ДНДПІ основної хімії «НІОХІМ»

Заст. директора з розвитку та науки
к.т.н.

З.А. Малакей

Від Сумського державного університету

Завідувач кафедри прикладної екології
д.т.н., професор
Доцент кафедри прикладної екології
к.т.н., доцент

Л.Д. Пляцук

Л.Л. Гурець

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор ТОВ «Сумитеплоенерго»

„21” _____ 2015 р.



АКТ

**промислового випробування пилогазоочисного апарату для очищення
відхідних газів від парового котла Сумської ТЕЦ**

У відповідності з планом науково-дослідних робіт кафедри прикладної екології Сумського державного університету та ТОВ „Сумитеплоенерго” проведені промислові випробування апарату для комплексного очищення відхідних газів на Сумській ТЕЦ.

Використання високоінтенсивного апарату для комплексного очищення відхідних газів за умов застосування в апараті низхідного руху фаз, регулярної рухомої насадки та провальних тарілок великих отворів запропоновано Сумським державним університетом в дослідженнях доцента кафедри прикладної екології Гурець Лариси Леонідівни.

Дослідно-промислові випробування проводили за таких умов:

- в якості абсорбенту використовували 15% водну суспензію вапняку;
- навантаження установки по газовому потоку складало 100 тис. м³/год;
- концентрація твердих частинок на вході в апарат - 12-15 г/м³;
- концентрація двоокису сірки - 1,3 г/м³;
- гідравлічний опір апарату складав 1500 Па.

Випробування показали, що запропонований апарат має високу ефективність очищення (ступінь очищення від оксиду сірки 97-98,5 %, ефективність очищення від твердих частинок 99 - 99,3%), низьку енергоємність і стабільну роботоздатність за умов тривалої експлуатації.

На основі аналізів результатів випробувань зроблено такі висновки:

- встановлено роботоздатність пилогазоочисного апарату та його висока ефективність при комплексному очищенні відхідних газів від твердих частинок та двоокису сірки в широкому робочому діапазоні;
- гідравлічний опір апарату до 1200 Па.

Запропоновано рекомендувати пилогазоочисний апарат для широкого впровадження в для очищення відхідних газів промислових підприємств та підприємств теплоенергетики

Від ТОВ „Сумитеплоенерго”

Головний інженер

Смертяк С.Ю.

Начальник КТЦ

Супрун С.І.

Начальник ПТО

Куровський С.М.

Від Сумського державного університету

Науковий керівник, к.т.н., доцент

Гурець Л.Л.

Відповідальні виконавці

к.т.н., доцент

Васькін Р.А.

к.т.н., доцент

Козій І.С.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
Сумського державного університету

В.Д.Карпуша

„26” травня 2016 р.

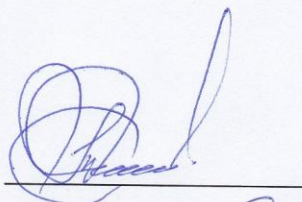
АКТ

використання в навчальному процесі результатів дисертаційної роботи
Гурець Лариси Леонідівни
«Науково-теоретичні основи системного підходу до вибору газоочисного
обладнання з метою підвищення рівня екологічної безпеки»

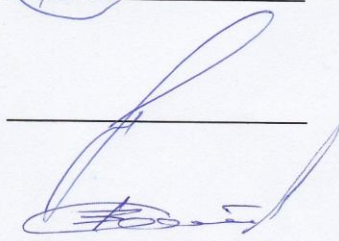
Основні положення та результати дисертаційного дослідження Гурець Лариси Леонідівни на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук впроваджені у навчальний процес та застосовуються при підготовці магістерських кваліфікаційних робіт, викладанні дисциплін «Моделювання та прогнозування стану навколишнього середовища», «Процеси та апарати природоохоронних технологій», «Техноекологія» для студентів спеціальностей 6.040106, 7.040106, 8.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування». Зокрема, у навчальному процесі впроваджено запропоновані Гурець Л.Л.:

- математична модель розсіювання забруднюючих речовин (дисципліна «Моделювання та прогнозування стану навколишнього середовища», тема «Моделювання рівня вмісту домішок в атмосфері»);
- методологія вибору газоочисного обладнання (дисципліна «Процеси та апарати природоохоронних технологій», тема «Газоочисне обладнання»);
- оцінка впливу промислових підприємств на довкілля (дисципліна «Техноекологія», тема «Загальна характеристика техногенно-екологічної ситуації в Україні»).

Завідувач кафедри
прикладної екології
д.т.н., професор
Заст. завідувача
кафедри прикладної екології
к.т.н., доцент
Доцент кафедри
прикладної екології
к.т.н., доцент



Пляцук Л.Д.



Трунова І.О.

Соляник В.О.