

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

На правах рукопису

**КОЗІЙ ІВАН СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 502.174:66.074 - 963

**ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ПИЛОВИХ  
ВИКИДІВ ПІДПРИЄМСТВ ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник:  
кандидат технічних наук, доцент  
Гурець Лариса Леонідівна

**Суми - 2012**

## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	4
ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....	14
1.1 Пилове забруднення атмосфери підприємствами хімічної промисловості ..	14
1.2 Екологічна безпека техногенно навантаженого регіону .....	17
1.2.1 Принципи формування екологічної безпеки .....	17
1.2.2 Моделі розсіювання.....	19
1.2.3 Вплив пилових викидів на довкілля .....	23
1.3 Порівняльний аналіз існуючого пиловловлюючого обладнання .....	25
1.4 Аналіз гідродинамічних характеристик апаратів з провальними тарілками	28
1.5 Мета і задачі дослідження .....	34
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	36
2.1 Проведення паспортизації пилу .....	36
2.1.1 Паспортизація пилу ільменіту .....	36
2.1.2 Паспортизація пилу двоокису титану .....	41
2.2 Експериментальна установка .....	44
2.3 Загальна методика проведення досліджень .....	47
2.4 Методика дослідження гідродинамічних характеристик апарату .....	48
2.5 Методика дослідження пилоочищення .....	49
2.6 Методика відбору проб пилу в СЗЗ .....	51
2.7 Методика проведення мікроскопічних досліджень пилу .....	51
2.8 Методика обробки результатів експериментальних досліджень. Оцінка впливу похибок замірів на результати досліджень .....	52
Висновки .....	54
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РОЗСІЮВАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ В АТМОСФЕРІ ВІД СТАЦІОНАРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗАБРУДНЕННЯ ...	56
3.1 Фізична модель розсіювання пилу в атмосфері .....	56

3.2 Математична модель розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері ...	57
3.2 Перевірка адекватності математичної моделі .....	62
Висновки .....	66
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ І ПИЛОВЛОВЛЮЮЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ АПАРАТУ .....	67
4.1 Фізична модель гідродинаміки та пиловловлення в пилоочисному апараті	67
4.2 Гідродинаміка апарату з ПТВО .....	72
4.3 Пиловловлення в апараті з ПТВО .....	79
4.4 Регресійна модель розрахунку ефективності пилоочищення в апараті з провальними тарілками великих отворів .....	82
Висновки .....	90
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТУ .....	92
5.1 Опис дослідно-промислової установки .....	95
5.2 Результати дослідно-промислових досліджень .....	97
5.3 Заходи по утилізації шламу пилоочищення .....	102
5.4 Рекомендації з експлуатації розробленого апарату .....	104
5.5 Прогнозна оцінка стану екологічної безпеки регіону від пилових викидів	106
Висновки .....	111
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	115
ДОДАТКИ .....	129

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

### Умовні позначення

$G$	- об'ємна витрата газу, м <sup>3</sup> /с;
$L$	- об'ємна витрата рідини, м <sup>3</sup> /с;
$d$	- діаметр, м;
$d_{50}$	- середній діаметр часток пилу, м;
$w_2$	- швидкість газу в перерізі апарату, м/с;
$L_3$	- щільність зрошення, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·год);
$H$	- висота газорідинної суміші, м;
$\rho$	- густина, кг/м <sup>3</sup> ;
$g$	- прискорення вільного падіння, м/с <sup>2</sup> ;
$\tau$	- площа вільного перетину полотна тарілки, %;
$f$	- площа отворів тарілки, зайнятих рідиною, що стікає, %;
$\xi$	- коефіцієнт опору;
$n$	- число;
$\mu$	- динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;
$\Delta P$	- гідравлічний опір, Па;
$\delta$	- товщина, м;
$\eta$	- ефективність пиловловлення, %;
$K$	- кількість утримуваної рідини, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ;
$Re$	- критерій Рейнольдса;
$\varphi$	- концентрація забруднюючої речовини, мг/м <sup>3</sup> ;
$u$	- швидкість вітру, м/с;
$Q$	- потужність джерела викиду пилу в атмосферу, кг/с;

### Скорочення

СЗЗ	- санітарно-захисна зона;
ГДК	- гранично допустима концентрація;



ПТВО - провальна тарілка великих отворів;

КУР - кількість утримуваної рідини;

#### Символи

*g* - газ;

*p* - рідина;

*o* - отвір;

*o.кр* - отвір критичний.

## ВСТУП

Принципи сталого розвитку України передбачають зростання обсягів промислового виробництва, при одночасній мінімізації викидів в навколишнє середовище. Однак застаріле очисне обладнання, недосконалість природоохоронних технологій веде за собою погіршення стану довкілля. Сучасний рівень екологічної безпеки в техногенно навантажених регіонах України не забезпечує досягнення нормованих показників навколишнього середовища. Дослідження повітряного басейну України показують, що за індексом забруднення атмосфери в 47% міст ступінь забруднення повітря оцінюється як дуже високий і високий, в 23% міст – підвищений, в 30% міст – низький [1-3], що призводить до порушення екологічної безпеки, підвищення рівня захворюваності населення.

В Резолюції Генеральної Асамблеї ООН від 1979 р. говориться: «Здоров'я населення – єдиний критерій доцільності й ефективності усіх без винятку сфер діяльності людини...». Це підкреслює необхідність розробки заходів щодо запобігання негативного впливу пилогазових викидів хімічних виробництв на навколишнє середовище та організм людини.

Промислове виробництво є одним із найважливіших чинників, який негативно впливає на довкілля та атмосферу зокрема. На території нашої держави спостерігається тенденція збільшення викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення [2], і як наслідок цього, питання охорони атмосферного повітря залишається актуальним.

Законодавством України [4] передбачено, що основою екологічної політики підприємств хімічної промисловості є принцип мінімізації викидів в атмосферне повітря (стаціонарними джерелами до 2015 року на 10 відсотків і до 2020 року на 25 відсотків базового рівня), в тому числі за рахунок упровадження енерго- та ресурсозберігаючих технологій, оснащення джерел викидів ефективним устаткуванням очистки газів, підвищення рівня технічного стану та експлуатації діючого обладнання.

### **Актуальність теми.**

Вирішення проблеми підвищення рівня екологічної безпеки для сталого розвитку держави можливе лише за умови проведення природоохоронних заходів на промислових підприємствах. Для цього діючі підприємства, діяльність яких призводить до забруднення природного середовища, повинні впроваджувати екологічно орієнтовані технології для очищення шкідливих викидів. Хімічна промисловість є однією з основних галузей промисловості, яка характеризується значними об'ємами виробництва, великою кількістю складних, багатостадійних технологічних процесів, що призводять до утворення великої кількості відходів та забруднюючих речовин на різних стадіях виробництва. Оцінці впливу забруднювачів на стан екологічної безпеки присвячені роботи таких провідних фахівців як Шмандій В.М., Некос В.Ю., Трофімчук А.М., Гомеля М.Д., Мальований М.С., Качинський А.Б. та ін.

Підприємствами хімічної галузі в Україні щороку викидається в атмосферне повітря понад 150 тис. т забруднюючих речовин [1-3], із них: рідкі та газоподібні викиди – 86,6%, тверді частки – 13,4%. Із загальної кількості пилових викидів, що утворюються на підприємствах хімічної промисловості, близько 1% належать до першого класу небезпеки, 2% – до другого, 23% – до третього, решта 74% – до четвертого класу небезпеки [1-3, 5]. Пилові викиди підприємств хімічної промисловості характеризуються багатокомпонентним складом, великими обсягами, можуть містити домішки як смолистих, так і легкозпливливих речовин, що знижує ефективність існуючих систем пилоочищення. Необхідність вибору та дослідження високоефективного пилоочисного обладнання для зменшення негативного впливу на довкілля і обумовлює актуальність роботи.

На підприємствах хімічної промисловості спостерігається як первинне пилоутворення, з джерел викидів виробництв, так і вторинне, в місцях складування відходів. Пилові викиди хімічної промисловості надходять в атмосферу на стадії підготовки сировини та виготовлення товарної продукції, що ставить задачу ресурсозбереження і створення технологій пилоочищення, здатних

повертати вловлений пил в технологічний процес, зменшити кількість відходів та знизити техногенний вплив на довкілля.

Пил є чинником формування екологічної небезпеки в техногенно навантажених регіонах. Серед забруднювачів атмосфери особливе місце займає дрібнодисперсний пил, який розсіюється на значну відстань від джерел забруднення, має фіброгенні властивості і становить значну екологічну небезпеку як для здоров'я людини так і навколишнього середовища.

Тверді частки, особливо дрібнодисперсні, здатні накопичуватися в нижньому шарі атмосфери й переміщуватися на великі відстані. Вони адсорбують з повітря шкідливі речовини й погіршують екологічний стан в локальному й глобальному масштабах. Частки пилу з розмірами менш 1 мкм не затримуються у верхніх дихальних шляхах, накопичуються в легенях і перешкоджають газовому обміну організму із зовнішнім середовищем. Їхня розрахункова кількість велика при малій масовій долі в промислових викидах в атмосферу.

Максимальний розмір часток пилу, що потрапляють у тканину легень, не перевищує 10-12 мкм. У нижніх дихальних шляхах ефективно затримуються частки розміром 1 мкм [6, 7]. Причому, чим більш дисперсний пил, тим більше його питома поверхня і хімічна активність, що підвищує фіброгенність пилу і сприяє більш швидкому розвитку пневмоконітичного процесу. Побічна дія пилу на людину та навколишнє середовище полягає в тому, що при підвищенні запиленості повітря змінюється спектр інтенсивності сонячної радіації (поглинання та розсіювання ультрафіолетового випромінювання), знижується освітленість. Запиленість повітря шкідлива також для обладнання, яке швидко спрацьовується і виходить з ладу. Тому виникає необхідність проведення певних заходів з покращення стану повітря та зменшення впливу на навколишнє середовище.

Одним із шляхів зменшення пилових викидів в навколишнє середовище є вдосконалення пилогазоочисного обладнання для зменшення викидів в атмосферу та забезпечення сталого розвитку регіонів. Проблема ускладнюється тим, що необхідно очищати великі обсяги забруднених газових викидів. Пил більшості

хімічних виробництв схильний до налипання, різний за дисперсним складом, може містити смолисті речовини, що в свою чергу приводить до зниження ефективності роботи існуючого обладнання. Це ускладнює або повністю виключає можливість використання традиційних способів і схем пилоочищення.

Проблемами розробки високоінтенсивного пилоочисного обладнання займалися такі фахівці як Молдабеков Ш., Шаригін М.П., Балабеков О.С., Пляцук Л.Д., Гурець Л.Л., Шушляков О.В., Батлук В.А. та інші.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування газоочисного обладнання високої пропускної здатності, яке може ефективно працювати з пилом різного дисперсного складу, а також, за необхідності, здійснювати комплексне очищення газів. До такого обладнання належать пилоочисні апарати з провальними тарілками великих отворів (ПТВО).

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри прикладної екології Сумського державного університету, пов'язаних із тематикою «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище підприємств хімічної та машинобудівної промисловості» згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти та науки України (№ держреєстрації 0109U008929).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вирішення наукової проблеми, що призводить до зниження техногенного навантаження від пилових викидів шляхом удосконалення системи пилоочищення з застосуванням апаратів із ПТВО.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- дослідити вплив пилових викидів на довкілля;
- дослідити характеристики пилу як чинника формування екологічної безпеки в умовах конкретного підприємства хімічної промисловості;
- розробити математичну модель процесу розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері;
- на підставі вивчення умов утворення, складу і властивостей пилу провести вибір найбільш ефективного обладнання для пиловловлення;

- дослідити вплив конструктивних та режимних параметрів апарата з ПТВО на ефективність пиловловлення;

- розробити маловідхідну технологію очищення газів від пилу;

- розробити рекомендації з експлуатації пилоочисного апарата.

**Об'єктом дослідження** є екологічна небезпека, що формується забрудненням атмосфери пиловими викидами хімічних виробництв.

**Предметом дослідження** є процес очищення відхідних газів хімічної промисловості від пилу з використанням високоінтенсивного пилоочисного обладнання.

**Методи дослідження** базуються на використанні фізичного та математичного моделювання досліджуваних процесів. Використано математичні методи для дослідження процесу розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері, а також експериментальні методи дослідження ефективності роботи апарата. 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 характеристик шламу. Теоретичні розрахунки та обробку експериментальних даних виконували із застосуванням комп'ютерних програм MapleSoft 12.0; Statistica 6.0; ЕОЛ 2000; Microsoft Excel, Advanced Grapher 2.2.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- з метою підвищення рівня екологічної безпеки виявлені шляхи інтенсифікації процесу пилоочищення газів від пилу підприємств хімічної промисловості;

- розроблена математична модель розсіювання твердих частинок та її розв'язання методом кінцевих елементів з урахуванням дисперсності пилу;

- проведено паспортизацію пилу як чинника формування екологічної безпеки в умовах конкретного підприємства хімічної промисловості;

- удосконалена фізична модель процесу пилоочищення в апараті з провальними тарілками великих отворів у режимі вторинного піноутворення;

- вперше отримано регресійні залежності для визначення ефективності пиловловлення в апараті з провальними тарілками великих отворів в режимі вторинного піноутворення.

**Практичне значення отриманих результатів.** З метою підвищення рівня екологічної безпеки запропоновано використання апарата з провальними тарілками великих отворів для очищення пилових викидів на існуючих стадіях технологічного процесу виробництва пігментного двоокису титану (акт впровадження – Сумський ДНДІ «МІНДІП» від 10 травня 2011 року та СП «Технополіс» від 5 листопада 2011 року). Розроблено стабілізатор пінного шару, який дозволяє стабілізувати поздовжні коливання газорідного шару на полотні тарілки (отримано патент на корисну модель).

З метою ресурсозбереження проведено дослідження з пошуку шляхів повернення в процес продукту зі шламонакопичувача, що свідчить про можливість зменшення втрат сировини та готового продукту виробництва двоокису титану на ПАТ «Сумхімпром» шляхом повернення вловленого пилу в технологічний процес.

Впроважено в навчальний процес кафедри прикладної екології Сумського державного університету розроблену в дисертації математичну модель та алгоритм розрахунку розсіювання дрібнодисперсного пилу від стаціонарних джерел забруднення у дисципліні «Моделювання та прогнозування стану навколишнього середовища» (акт впровадження від 12 грудня 2011 року).

#### **Особистий внесок здобувача.**

1. Здобувачем проведено аналіз апаратів для очищення газів від пилу. Встановлено, що використання апаратів з провальними тарілками дозволяє ефективно очищувати великі обсяги газових викидів, що містять як легкозлипливі так і смолисті речовини, а також має значний потенціал для інтенсифікації пилогазоочисного обладнання [8].

2. Здобувачем виконано аналіз виробництва двоокису титану на ПАТ «Сумхімпром» та його вплив на атмосферу і здоров'я людини. Розглянуто рекомендації про можливість застосування апаратів з провальними тарілками великих отворів для очистки промислових газів замість існуючого пилоочисного обладнання [9].

3. Автором розглянуто проблему розробки й впровадження високоефективного газоочисного обладнання. Проведено дослідження гідродинаміки апарата з провальними тарілками великих отворів на експериментальній установці [10].

4. Здобувачем проведено експериментальні дослідження пилоочищення на лабораторному стенді з провальними тарілками великих отворів, які підтвердили високу ефективність порівняно з існуючим пилогазоочисним обладнанням, яке використовується у виробництві пігментного двоокису титану на ПАТ «Сумхімпром» [11].

5. Здобувачем проведено паспортизацію пилу на стадії прокалки гідратованого двоокису титану після пилової камери з метою вдосконалення подальшої системи очистки газу на підприємстві ПАТ «Сумхімпром». Проведено пошук шляхів повернення в технологічний процес продукту з пилової камери з метою зменшення втрат сировини, негативного впливу на навколишнє середовище і підвищення якості готової продукції [12].

6. Здобувачем проведено моделювання методом рівнянь регресій, які адекватно описують залежність висоти газорідного шару від ряду факторів - щільності зрошення рідини, швидкості газу в апараті й вільного перетину полотна тарілки. Розроблено регресійні рівняння розрахунку ефективності пиловловлення [13].

**Апробація результатів роботи.** Результати дисертаційної роботи доповідалися на наукових та науково-практичних конференціях: IV Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження», м. Суми, 2007 р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Екологічні проблеми техногенно-навантажених регіонів», м. Дніпропетровськ, 2008 р; Міжнародній



науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки», м. Кременчук, 2008 р.; V Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження», м. Суми, 2009 р.; VIII Міжнародній науковій конференції аспірантів і студентів «Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів», м. Донецьк, 2009 р.; Науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету СумДУ, м. Суми, 2007 – 2011 рр.; XI Міжнародній науково-практичній конференції "Біосферно-ноосферні ідеї В.І. Вернадського й еколого-економічні та гуманітарні проблеми регіонів", м. Кременчук, 2009 р.; Міжнародній науково-практичній конференції "Карпатська конференція з проблем охорони довкілля", м. Мукачево-Ужгород, 2011 р.

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць: 6 статей у спеціалізованих виданнях, що входять до переліку ВАК України, патент України на корисну модель, 5 тез доповідей.

**Структура дисертації.** Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг роботи становить 141 сторінку. Дисертаційна робота містить 40 рисунків і 15 таблиць по тексту, з яких 6 на окремому аркуші. Додатки розміщені на 13 сторінках, список використаних джерел у кількості 137 найменувань – на 14 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Першочергова увага до охорони навколишнього природного середовища, раціонального використання природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки життєдіяльності населення – невід’ємна умова сталого розвитку регіону і, в цілому, країни. Саме тому на території України повинна здійснюватися політика, що спрямована на досягнення гармонійної взаємодії суспільства і природи і, безпосередньо, на забезпечення раціонального використання, охорону і відтворення природних ресурсів.

За умов покращення загальної економічної ситуації та збільшення обсягу випуску продукції промисловими підприємствами зростає і антропогенне навантаження на компоненти довкілля, що може призвести до загострення екологічної ситуації в країні.

Серед техногенних чинників формування екологічної небезпеки слід виділити пилове забруднення атмосферного повітря промисловими підприємствами.

#### **1.1 Пилове забруднення атмосфери підприємствами хімічної промисловості**

Основними напрямками діяльності, що спрямована на стабілізацію стану повітряного басейну в Україні є зменшення викидів від стаціонарних джерел забруднення. Особливу небезпеку становить дрібнодисперсний пил, що має фіброгенні властивості. У 2010 році середньомісячні концентрації пилу перевищували ГДК більш ніж в 35 містах України, де проводилися систематичні спостереження за забрудненням атмосферного повітря на стаціонарних постах [2, 3]. Найбільші рівні концентрацій пилу зафіксовано у атмосферному повітрі міст Східного регіону – м. Алчевськ, Макіївка, Дзержинськ, Горлівка, Єнакієве, Маріуполь; Центрального регіону – м. Кривий Ріг, Дніпропетровськ, Кременчук,

Полтава; Західного регіону – м. Хмельницький; Південного регіону – м. Армянськ, Красноперекіпськ, Ялта; Північного регіону – м. Суми [14].

Одним з видів промисловості, що є джерелом надходження пилу у атмосферне повітря і становить значну екологічну небезпеку є хімічна промисловість. Зокрема, гостро стоїть питання забезпечення екологічної безпеки в містах, в межах яких розташовано об'єкти хімічного виробництва.

Хімічна промисловість належить до галузей, які споживають велику кількість сировини та енергії. Різноманітність виробництв хімічної промисловості, а також складні багатостадійні процеси в результаті яких утворюється велика кількість речовин, які викидаються в атмосферне повітря, ускладнює роботу пилоочисного обладнання, адже пил відрізняється за дисперсним складом та може містити як легкозлипливі, так і смолисті речовини. Під час виробництва утворюється велика кількість побічної продукції, яка часто накопичується у вигляді відходів. Важливим моментом є те, що окрім викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря викидається значна кількість сировини та готової продукції.

Серед підприємств хімічної промисловості нами було розглянуто ПАТ «Суміхіпро», яке є типовим хімічним виробництвом. Вибір цього підприємства є не випадковим, адже до основних потужностей підприємства відносяться: виробництво сульфатної кислоти, складних мінеральних добрив та пігментів (основний продукт двоокис титану). Разом з тим ПАТ «Суміхіпро» входить до переліку 100 найбільших забруднювачів довкілля в Україні [15].

Аналіз діючих систем очистки газу від пилу на ПАТ «Суміхіпро» та порівняння їх з літературними даними за ефективністю роботи наведено у табл. 1.2. [16]

Як видно із табл.1.2 не все пилоочисне обладнання відповідає заявленій у літературі ефективності роботи з пиловими викидами підприємства. Причиною невідповідності є власне викиди підприємства, що містять різний як за розмірами, так і за властивостями пил. Так, зокрема при виробництві двоокису титану на ПАТ «Суміхіпро» виключаються з технологічного циклу значна кількість

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз ефективності очистки газу від пилу на ПАТ «Суміхіпром»

Стадія виробництва	Джерело утворення	Обладнання	Ступінь очищення, %	
			Фактичний	[17,18]
1	2	3	4	5
<b>Виробництво пігментного двоокису титану</b>				
Прокалка	Прожарювальна піч	Вод.скрубер Вентури + аміач.скрубер	92	95
Розмел ільменіту	Кульовий млин	Циклон Рук.фільтр	72 94	80-85 95
Сушка ільменіту	Сушильна піч	Скрубер	79	85-90
Розмол $TiO_2$	Млин	Рук.фільтр	93	95
Підготовка деревної муки	Деревообробний верстат	Циклон	73	80-85
<b>Виробництво складних мінеральних добрив</b>				
Пересів гранул.продукту	Грохот	Циклон	78 - 84	80-85
Гранулювання	Грануляційний барабан	Циклон Скрубер	80 88	80-85 85-90
Силосний склад фосфоровини	Бункер	Циклон	64	80-85
Приймні бункера	Пневмоперекачка	Циклон Скрубер	- 72	80-85 85-90
<b>Виробництво екстракційної фосфорної кислоти</b>				
Приймні бункера сировини	Пневмоперекачка	Циклон Скрубер	73 82	80-85 85-90
<b>Виробництво вапна</b>				
Вапняний цех	Випалювальна піч	Циклон	85	80-85
Сортування вапняку	Грохот	Циклон	70	80-85
<b>Виробництво залізоокисних пігментів</b>				
Червоні пігменти	Сушарка, упаковка, елеватор	Циклон	78	80-85
		Скрубер	73	85-90
		Рук.фільтр	96	95
Жовті пігменти	Сушарка	Рук.фільтр	96	95
<b>Цех - активізатор</b>				
Лінія активізації	Сушарка	Циклон	70	80-85
		Абсорбер	92	95
Аспірація	Підсипна стрічка, грохот	Циклон Скрубер	53 95	80-85 95

сировини за рік [16, 19, 20]. Отже, це дозволяє стверджувати, що для ефективної роботи пилоочисного обладнання необхідно підбирати таке обладнання, яке в більшій мірі відповідає як фізико-механічним властивостям пилю так і його дисперсному складу.

Рішенням проблеми зменшення негативного пилового впливу на довкілля та здоров'я людини є поліпшення технологій виробництва і застосування високоефективних пилогазоочисних установок, що здатні забезпечити на достатньому рівні екологічну безпеку регіону та країни в цілому.

## **1.2 Екологічна безпека при техногенному впливі на атмосферу**

### **1.2.1 Принципи формування екологічної безпеки**

За результатами досліджень в роботі [21] встановлено, що пилове забруднення атмосферного повітря визначає стан безпеки регіону.

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

Автор роботи [22] зазначає, що оптимальне і ефективне управління екологічною безпекою можливе тільки на основі моніторингу, об'єктивно присутнього в будь-якому регіоні, із застосуванням відповідних заходів щодо зменшення до мінімуму негативного впливу джерел небезпеки (або по 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 [23].

В роботі [24] 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 задач управління безпекою автор вважає за доцільне

аналізувати шкідливий вплив в основному за межами такого об'єкту в зонах неприйнятної небезпеки, а також урахувати стани небезпеки на території самого об'єкту (рис. 1.1). У більшості випадків основний вплив на процес формування техногенної небезпеки мають чинники, що присутні в самому регіоні.

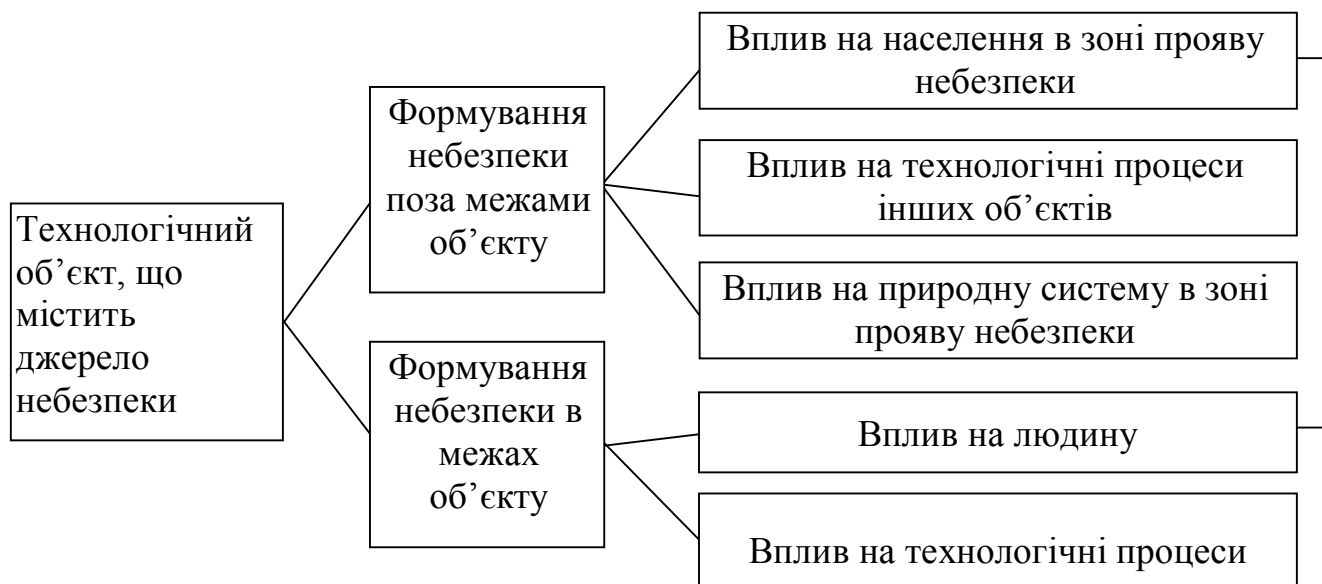


Рисунок 1.1 - Диференціація шкідливого впливу об'єкту формування техногенної небезпеки на елементи соціально-економічної і природної підсистем регіону.

Також особливої уваги заслуговує представлена у роботах [25, 26] 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 і енергії в компонентах природної підсистеми конкретного регіону. В моделі відзначено, що техногенні джерела ініціюють негативні процеси у навколишньому середовищі, які під дією природних і природно-антропогенних чинників розповсюджуються в ній і змінюють її стан, що приводить до екологічного дисбалансу соціально-економічної підсистеми, і у результаті формується техногенна небезпека.

Таким чином, встановлення закономірностей формування екологічної небезпеки і особливостей її проявів повинне служити базисом для розробки системи управління екологічною безпекою. Одним з основних методів забезпечення безпечного екологічного стану довкілля є попередження забруднень шляхом прогнозування та вживання необхідних природоохоронних заходів.

### 1.2.2 Моделі розсіювання

У зв'язку з постійним зростанням навантаження на довкілля та проголошеним світовою спільнотою курсом на сталий розвиток очевидна висока роль саме екологічного моделювання, як способу передбачення впливу наслідків економічної діяльності на довкілля.

Тому, однією з важливих задач в галузі екологічної безпеки є прогноз забруднення атмосфери шкідливими речовинами при діючих виробництвах. Результати такого прогнозу є підґрунтям для розробки захисних заходів. Підвищена концентрація забруднюючих речовин, зокрема пилу, спостерігається в атмосфері практично кожного промислового міста, тому виникає необхідність в оцінці і моделюванні розповсюдження пилу в атмосфері саме від точкових стаціонарних джерел з метою попередження або зменшення їх впливу на екосистему. Особливу увагу заслуговує дрібнодисперсний пил, який має більш негативний вплив на живі організми і довкілля в цілому, а також розповсюджується за межі санітарно-захисної зони (СЗЗ) підприємств.

Розробці математичних моделей розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері присвячені роботи таких фахівців як Берлянд М.Г., Марчук В.Г., Згуровський М.З., Нестеров А.В., Алоян О.Є., Беляєв М.М., Радкевич О.Р. та інші [27-40].

На теперішній час існує велика кількість методів, що реалізують різноманітні підходи до моделювання процесу поширення домішок в атмосфері. Для застосування моделей треба володіти метеорологічною і географічною інформацією, а також даними про джерело забруднення і викиди. Майже всі моделі розсіювання описують процеси турбулентної дифузії в атмосфері і

переважну більшість їх можна класифікувати як гаусівські, ейлерові та лагранжеві [33].

Алгоритм Гаусівської моделі є найбільш розповсюдженим в моделюванні аналізу повітряної дисперсії [37]. Він ґрунтується на припущенні, що забруднююча речовина буде розповсюджуватись відповідно до нормального статистичного розподілу. Загальне Гаусівське рівняння

$$\frac{dC}{dt} + U \frac{dC}{dx} = \frac{d}{dy} \left( K_y \frac{dC}{dy} \right) + \left( K_z \frac{dC}{dz} \right) + S, \quad (1.1)$$

де  $x$  – виміряна координата від джерела вздовж напрямку вітру;

$y$  – виміряна координата від джерела перпендикулярно напрямку вітру;

$z$  – вертикальна координата, що відраховується від поверхні ґрунту;

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

$K_y, K_z$  – розповсюдження турбулентності (коефіцієнти дифузії) за напрямками вісі  $y$  і  $z$ ;

$U$  – середня швидкість вітру вздовж вісі  $x$ .

При реалізації моделі можуть бути зроблені деякі припущення:

- концентрація забруднюючих речовин не впливає на розріджений потік (пасивна дисперсія);
- молекулярна дифузія і дифузія вздовж напрямку вітру незначні;
- турбулентні потоки лінійні;
- бічна середня і вертикальна швидкість вітру дорівнює нулю, ідеальний випадок плоскої поверхні.

Гаусівська модель частіше використовується для прогнозу дисперсії безперервних викидів від поверхні землі або наземних джерел.

Модель Ейлера [32] розв'язує рівняння збереження маси для даного забруднювача. Загальне рівняння виглядає наступним чином



$$\frac{\partial(c_i)}{\partial t} = -\bar{U}\nabla(c_i) - \nabla(c_i') + D\nabla^2\langle c_i \rangle + \langle S_i \rangle, \quad (1.2)$$

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

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

$\bar{U}$  – середній вектор області вітру;

$U'$  – вектор коливань області вітру;

$C$  – концентрація забруднюючої речовини;

$\langle c \rangle$  – середня концентрація забруднюючої речовини;

$c'$  – концентрація забруднюючої речовини в 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.

Алгоритм моделі Лагранжа [33] 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 потрапляє на напрямок забруднюючої області. Модель Лагранжа може бути представлена наступним чином

$$\langle c(r, t) \rangle \geq \iint p(r, t \| r', t') S(r', t') dr' dt', \quad (1.3)$$

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

$S(r', t')$  – 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 це повинно бути додано в якості розподілу міри і щільності часток. Модель Лагранжа описує перенос 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 дуже важко належним чином охарактеризувати взаємодію газопилового потоку з атмосферними масами.

Один з основних методів, передбачений нормами України це метод моделювання ОНД-86 [41].

ОНД-86 відноситься до негаусівської нормативної моделі поширення забруднювача від множини джерел, розроблена групою фахівців Головної геофізичної обсерваторії ім. Воейкова. В її основі лежать аналітичні апроксимації чисельного розв'язку рівняння адвективної дифузії, спочатку отримані для одиночних джерел забруднення, а потім інтегровані для сукупності лінійних і розосереджених по площі джерел забруднення.

Дана модель призначена, насамперед, для розрахунків найгірших полів концентрації, а не для розрахунків поточних концентрацій при конкретних метеоумовах. ОНД-86 застосовується в Україні в обов'язковому порядку при оформленні дозволу на викиди, при визначенні нормативів викидів («гранично припустимих концентрацій») у ході проектування нових промислових об'єктів.

Результати модельних експериментів використовуються для визначення СЗЗ. За допомогою моделі ОНД-86 розраховується відстань, на якій концентрація шкідливих речовин буде нижчою за державні нормативні рівні, визначаючи, таким чином, географічну межу СЗЗ.

Українське законодавство забороняє розміщення екологічно вразливих земельних ресурсів (тобто сільськогосподарських угідь) і зони проживання людей (тобто використання землі під житловими будовами) у СЗЗ.

У моделі ОНД-86 використовується спрощений опис розсіювання шкідливих речовин, і обмежений об'єм метеорологічної інформації, характерний для конкретної ділянки.

Аналізуючи різноманіття моделей [33] можна зробити висновок, що більшість з них побудовані на основі Гаусівського розподілу. Аналіз робіт показав, що 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 в Україні) і знаходилось обґрунтування правильності використання емпіричних залежностей для коефіцієнтів дисперсії та інших параметрів. В цілому можна сказати, що аналітичні моделі не дозволяють комплексно врахувати ті закономірності, які відіграють суттєвий вплив на перенесення домішок в атмосфері в силу тих припущень, які прийняті для отримання аналітичного рішення [39].

Тому, універсальним методом вирішення задачі розсіювання пилу в атмосферному повітрі є чисельне моделювання.

### 1.2.3 Вплив пилових викидів на довкілля

Забруднення атмосферного повітря за ступенем хімічної небезпеки для людини посідає перше місце. Це зумовлено в першу чергу тим, що забруднюючі речовини з атмосферного повітря мають найбільше поширення та випадають на ґрунт та водне середовище.

У структурі професійної захворюваності перше місце (50-60%) належить хворобам органів дихання (силікоз та інші форми пневмоконіозів, хронічні бронхіти) [42]. Запилене повітря промислових міст наносить велику шкоду населенню, тому ослаблює імунну й захисну системи організму, особливо великої небезпеки зазнають люди, що страждають хворобами дихальних шляхів, астмою й різними видами алергії. Так, в [43] виявлена чітка залежність між рівнем захворюваності гострими пневмоніями, ларинготрахеїтами, бронхітами і ступенем забруднення навколишнього середовища в різних районах промислових центрів з

розвинутим виробництвом. Поширеність бронхіальної астми у дітей в одному з таких міст [44] складала 9,7 на 1000 чоловік населення.

При визначенні ступеня техногенного навантаження на регіональні екосистеми особлива увага приділяється хімічним чинникам забруднення навколишнього природного середовища, як визначальним у формуванні зон екологічного неблагополуччя. Наслідок тривалого шкідливого впливу забруднюючих речовин на організм людини негативно відображається на її імунну стійкість [45]. Значно менше уваги приділяється пиловому забрудненню атмосфери але вплив механічних домішок також наносить шкоди здоров'ю людини та довкіллю вцілому.

Тонкодисперсні тверді частки (розмір менше 1 мкм) мають час перебування в нижніх шарах атмосфери 10-20 діб, що достатньо для їхнього поширення на велику відстань від джерел утворення. При цьому за рахунок переміщень повітряних потоків вони можуть проникати у верхні шари тропосфери й з них - у стратосферу. Атмосферний пил і аерозолі послабляють сонячне випромінювання в результаті розсіювання, відбиття й поглинання променистої енергії [46]. При досить тривалому збереженні інтенсивних забруднень атмосфери це приводить до зниження температур і локальним змінам кліматичних умов, що найбільше помітно у великих містах і промислових центрах. Пил і аерозолі відіграють помітну негативну роль у процесах корозії металевих і силікатних матеріалів через утворення на поверхнях відкладень. Пил адсорбує з повітря сульфати й інші кислі домішки, що втримують вологу, у якій можуть розчинятися кислотні гази. Кислоти, що утворилися, містяться у відкладеннях, руйнують вироби з каменю, скла, металів.

Пилові й аерозольні забруднення атмосфери впливають на здоров'я людини, стан флори й фауни. Зниження потоку сонячного випромінювання зменшує утворення (дією УФ-променів) вітаміну D<sub>3</sub>, недолік якого негативно позначається на формуванні кісткових тканин, обумовлюючи захворювання рахітом [47]. УФ-промені знищують деякі мікроорганізми, виконуючи стерилізуючу дію.

Недостатність УФ-променів підвищує ризик інфекційних бактеріальних захворювань у рослин і тварин.

У зонах інтенсивних пилових забруднень 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 у крові токсичних продуктів біохімічних реакцій [47, 48]. Особливо розповсюдженими захворюваннями є токсичні отруєння свинцем, кадмієм, алюмінієм, берилієм та їхніми з'єднаннями, а також спалах інфекційних захворювань у людей, що мали тривалий контакт із пилом вольфраму, ванадія, титану й ряду шлаків металургійних виробництв. Багато видів пилу антропогенного походження є причинами алергічних захворювань. При цьому алергенами може бути пил як мінерального, так і органічного походження [49]. Гігроскопічний пил може зневоднювати поверхні листя рослин, утворюючи на них кірку, що порушує природні процеси обміну. Відкладення ряду пилу перешкоджає процесу фотосинтезу, відбиваючи частину променистої енергії в області довжин хвиль 400-750 нм. Пил, типовий для міст, поглинає інфрачервоне випромінювання, сприяючи цим перегріву листя рослин. Усе це порушує нормальний водний і температурний режим і в остаточному підсумку знижує активність ферментів фотосинтезу [50].

Таким чином пилове забруднення сьогодні є серйозною проблемою, причому не тільки гігієнічною, а й соціально-економічною.

### **1.3 Порівняльний аналіз існуючого пиловловлюючого обладнання**

У зв'язку з недосконалістю технологічних процесів і обладнання на підприємствах хімічної промисловості в атмосферу надходять гази, що містять різні по токсичності сполуки, тонкодисперсні краплі рідини, тверді частки (пил) вихідної сировини й продукції та ін. Одним із основних чинників, що впливають на санітарний стан атмосфери є пилові викиди основних виробничих цехів.

Складність організації очищення газів на підприємствах хімічної промисловості полягає в необхідності одночасного видалення з газу газоподібних і дисперсних (твердих або рідких) компонентів [51, 52].

Зниження викидів до гранично допустимих норм (ГДК) можна здійснити шляхом впровадження нових і інтенсифікації існуючих технологічних процесів очищення.

Досвід експлуатації пилоочисних апаратів показує, що вони повинні задовольняти наступним вимогам [53-59]:

- 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.

Більшість існуючих пилоочисних апаратів не може ефективно працювати з забрудненими газовими і рідинними потоками [60, 61].

Традиційні схеми пилоочищення підприємств хімічної промисловості представлені апаратами сухого та мокрого типу.

В якості апаратів сухого пиловловлення в основному використовують циклони та рукавні фільтри. Апарати не спроможні працювати з потоками газу, що містять легкозлипливі та смолисті речовини, а також різний за дисперсністю пил, особливо дрібнодисперсний.

Апарати мокрого пилоочищення представлені в основному розпилюючими та тарілчастими скруберами, апаратами вихрового типу, та іншими конструкціями. Мокре очищення не вимагає додаткової підготовки газів, дозволяє одночасно проводити очищення як від газових викидів так і дисперсних часток. Мокре пилоочищення має високу ефективність при вловленні дрібнодисперсного пилу, але проблема очистки газів від легкозлипливих та смолистих речовин виключає можливість ефективного використання апаратів мокрого типу. Це приводить до застосування багатоступеневих систем газоочищення, які складні в

виготовленні та експлуатації. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування газоочисного обладнання високої пропускної здатності, яке може здійснювати комплексне очищення газів від пилу та газоподібних домішок [62 - 64].

Санітарна очистка газів передбачає великі обсяги газів, тому одним з перспективних шляхів інтенсифікації процесу очищення забруднених газів є розробка нових конструкцій апаратів, які працюють в режимі розвинутої турбулентності [60-67]. Підвищення швидкості газу приводить до збільшення одиничної потужності апарату, знижує матеріаломісткість, сприяє підвищенню ефективності пилоочиснення. До апаратів, які працюють у вказаному режимі відносяться зокрема і апарати з провальними тарілками великих отворів (ПТВО).

Використання провальних тарілок з великим діаметром отворів дозволяє значно продовжити термін експлуатації пилоочисного обладнання та полегшує їх очистку. Ці тарілки добре зарекомендували себе при обробці забруднених газів і рідин, з яких випадають інкрустації [61]. Апарати з провальними тарілками великих отворів використовуються в процесах абсорбції та десорбції в содовій промисловості та в процесах мокрому пиловловлення [68-73].

Порівняльна характеристика апаратів з ПТВО, існуючого та деяких видів високоінтенсивного пиловловлюючого обладнання наведена в табл. 1.4 [61, 74].

Як видно з табл. 1.4, за ефективністю роботи апарат з ПТВО (діаметр отворів  $d_0 = 0,06$  м) не поступається іншим конструкціям високоінтенсивного пиловловлюючого обладнання. Досвід експлуатації апаратів з ПТВО свідчить про незначні матеріальні витрати, тривалий термін роботи, а також можливість переобладнання існуючого пиловловлюючого обладнання шляхом монтажу контактної пристрою (тарілки з великими отворами) під час планових зупинок на чистку апарату.

Пилогазоочисне обладнання з ПТВО має наступні переваги: простота й надійність конструкції, розвита поверхня контакту фаз, високий гідродинамічний ККД; велика одинична потужність; тарілки не забиваються при наявності в оброблюваному середовищі твердих часток, що мають високі адгезійні

властивості та здатних утворювати агломерації, тому, відповідно, тривалий термін експлуатації; широкий діапазон стійкої роботи при високій ефективності [75, 76].

Таблиця 1.4 – Основні показники високоінтенсивних схем пилоочистки

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

#### 1.4 Аналіз гідродинамічних характеристик апаратів з провальними тарілками великих отворів

Гідродинаміка тарілок провального типу малого вільного перетину вивчена досить добре. Основні особливості взаємодії газу і рідини на провальних тарілках великих отворів: високий, сильнотурбулізований газорідний шар; однорідна



структура шару і відсутність великих коливань рідини; одночасне витікання газу і протікання рідини через одні й ті ж самі отвори.

Гідродинамічний режим і структура газорідинного шару на дірчастих тарілках зі збільшеними та крупними отворами вивчений ще не зовсім достатньо, але для цих тарілок можна відмітити появу ще одного режиму – вторинного піноутворення [60, 77]. Підвищення швидкості газу призводить до розвинутої вихрової взаємодії фаз. Газорідинна суміш виглядає як „бурхлива піна”, але одночасно спостерігається помітна стабілізація шару (зниження пульсацій). При даному режимі можна досягти значної висоти газорідинного шару і як наслідок розвинутої поверхні контакту фаз та великий гідродинамічний ККД. Окрім того, пилогазоочисні апарати з провальними тарілками великих отворів мають переваги перед іншими контактними пристроями через те, що менше забиваються речовинами, які випадають у осад, прості за монтажем, матеріало та енергоємністю [60, 61].

Як показали проведені дослідження [77], гідродинаміка роботи тарілок провального типу з вільним перетином  $\tau < 0,25$  різко відрізняється від гідродинаміки роботи тарілок провального типу з вільним перетином  $\tau > 0,3$ .

Однак відомості про вплив діаметра отворів на гідродинамічні режими роботи тарілок провального типу, що опубліковані в літературі, мають несистемний і доволі суперечливий характер. Тому це питання вимагає додаткового розгляду.

В роботі [79] відзначається, що зміна діаметра отворів від  $d_o=0,004$  до  $d_o=0,012$  м майже не впливає на гідродинаміку тарілок провального типу. Зазначається, що збільшення діаметра отворів вище  $d_o > 0,012$  м призводить до зниження продуктивності таких тарілок.

В роботі [75] встановлено, що збільшення діаметра отворів до  $d_o = 0,016 - 0,025$  м призводить до підвищення продуктивності таких тарілок провального типу і можливості роботи на них до швидкостей  $w_2 = 4,1$  м/с при великому значенні коефіцієнта ефективності за Мерфі (до 0,92). Результати досліджень

протиточних тарілок з отворами великого діаметра ( $d_o = 0,02 - 0,03$  м), свідчать про їх високу продуктивність і ефективність [75].

Для апаратів з ПТВО робочим режимом є режим вторинного піноутворення, що можливий тільки після досягнення певної швидкості газу [60], при якому на поверхні тарілки підтримується стійкий пінний шар.

У літературі опубліковано багато робіт, у яких розглядався розрахунок нижньої і верхньої робочих меж тарілок провального типу [81-86].

Припустивши, що рідина стікає через перфорацію у вигляді окремих плівок і граничні режими, що розвиваються в цих плівках, характеризуються наявністю дотичних напруг на межі розділу рідина – газ, що викликають спрямований потік рідини, автори роботи [81] запропонували розраховувати нижню і верхню робочу межу тарілок провального типу за рівнянням

$$w_z = A \cdot (1 - f) \cdot \tau \cdot \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_z}{\rho_z}}, \quad (1.4)$$

де  $A = 0,416$  для максимально допустимої, а  $A = 0,185$  для мінімально допустимої швидкості газу.

Величину  $f$  розраховують за наведеним в роботі [87] рівнянням

$$f = \frac{\sqrt[3]{\left(\frac{L_o}{G_o}\right)^2 \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_p \cdot \xi \cdot \mu_o^2}\right)}}{1 + \sqrt[3]{\left(\frac{L_o}{G_o}\right)^2 \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_p \cdot \xi \cdot \mu_o^2}\right)}}. \quad (1.5)$$

Слід відмітити, що запропоновані більшістю авторів рівняння визначення граничних меж швидкостей газу істотно відрізняються одне від одного. Збільшення діаметра отворів від 0,01 до 0,09 м, не призводить до помітних змін в характері виникнення на тарілці газорідинного шару, механізм котрого описаний в роботі [88]. Значення  $w_{min}$  згідно [89] визначається за рівнянням

$$w_{\min} = 0,185 \cdot (1 - f) \cdot \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_z}{\rho_z}}. \quad (1.6)$$

Автори роботи [85] запропонували розраховувати верхню й нижню межі стійкої роботи тарілок за аналогією з розрахунком режиму підвисяння в колонах з насадкою. У запропонованих рівняннях граничні швидкості залежать від еквівалентного діаметра отвору  $d_e$ , що не підтверджується дослідями [83, 84, 86].

Однак, для проектування і розрахунку ПТВО необхідним є визначення нижньої межі режиму вторинного піноутворення, виникнення котрого характерно для тарілок з отворами більшими за  $d_{o,кр} = 0,03$  м. Проведені досліди [60] показують, що величина критичних швидкостей газу  $w_{кр}$ , що відповідають початку цього режиму, вагомо залежить від діаметра отворів. Так збільшення  $d_o$  від 0,03 до 0,06 м призводить до зниження  $w_{кр}$ , пропорційного збільшенню діаметра отворів, а подальша зміна  $d_o$  до 0,9 м викликає їх підвищення, причому ця залежність в даному випадку має експоненційний характер. Слід відзначити, що вплив щільності зрошення на виникнення режиму вторинного піноутворення більш вагомий, ніж її вплив на  $w_{min}$ . Ця обставина призводить до того, що при великих швидкостях зрошення режим утворення на тарілці газорідного шару безпосередньо переходить в режим вторинного піноутворення. Вплив вільного перетину і гідродинамічних параметрів роботи тарілки відповідає за характером впливу, який описується рівнянням, запропонованим в роботі [83]. На основі вказаного рівняння, і враховуючи більш складний характер впливу  $d_o$ , було отримано [60] залежність в дещо зміненому вигляді

$$\frac{w_{кр}^2}{S_o \cdot g \cdot d_o} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} = B \cdot \exp \left[ -4 \left( \frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{\rho_z}{\rho_p} \right)^{0,125} \right], \quad (1.7)$$

де  $w_{кр}$  – критична швидкість газу, що відповідають виникненню режиму вторинного піноутворення, м/с.

При обробці дослідних даних отримали для розрахунку коефіцієнта  $B$  залежності для тарілок з  $d_{o,кр} \leq d_o \leq 0,6$  м

$$B = 5,08 \cdot \left( \frac{d_{o,кр}}{d_o} \right)^3, \quad (1.8)$$

для тарілок з  $d_o > 0,6$  м

$$B = \frac{d_{o,кр}}{d_o} \cdot \exp \cdot \left( 0,23 \cdot \frac{d_o - d_{o,кр}}{d_o} \right). \quad (1.9)$$

Дані лабораторних і промислових досліджень [60] вказують на те, що в більшості випадків верхня межа роботи провальних тарілок великих отворів визначається надмірним виносом рідини. Аналіз, проведений автором, показав, що верхня межа роботи ПТВО становить, в залежності від конструкційних і режимних параметрів, 3,5 – 4,7 м/с.

На теперішній час у літературі запропоновано багато рівнянь для розрахунку гідравлічного опору тарілок провального типу. З них одну групу становлять рівняння, в основу яких закладена певна фізична модель [90-94]. До іншої групи можна віднести рівняння, що були отримані емпіричним шляхом [95-98].

Автори робіт [85-87] одержали рівняння, ґрунтуючись на адитивності опору сухої тарілки  $\Delta P_{сyx}$ , опору статичного стовпа рідини  $\Delta P_p$  і опору сил поверхневого натягу рідини  $\Delta P_\sigma$

$$\Delta P_m = \Delta P_{сyx} + \Delta P_p + \Delta P_\sigma. \quad (1.10)$$

У роботі [99] запропоновано кілька моделей роботи тарілок провального типу. Основна їхня відмінність від моделі, використаної в роботах [90, 92],

полягає в припущенні, що перехід від точки з мінімальним статичним тиском до точки з максимальним тиском відбувається не стрибкоподібно, а більш плавно - білінійний профіль статичних тисків [100, 101]. Передбачалося, що зміна статичного тиску відбувається за законом прямої лінії, але нахил прямих різний у зоні барботажу газу й у зоні вспінення рідини.

Ґрунтуючись на цій моделі, автори одержали рівняння для розрахунку величини  $\Delta P_m$ , у якому величину  $f$  запропонували розраховувати за рівнянням

$$f = 0,073 \cdot L^{0,23} \cdot w_z^{-1,1}. \quad (1.11)$$

На моделі, що наведена в роботі [93], ґрунтується рівняння, за яким розраховується гідравлічний опір тарілок провального типу, запропонований в роботі [94]. Величину  $f$  пропонувалося розраховувати також за емпіричним рівнянням

$$f = 18,4 \cdot \tau^{0,41} \cdot \left( \frac{L}{w_z} \right)^{2/3}. \quad (1.12)$$

З аналізу розглянутих рівнянь, за якими розраховується величина  $f$ , видно, що більшість рівнянь є емпіричними [102], а остаточний вид рівнянь залежить від початкового уявлення про роботу тарілок провального типу. У наш час немає надійних методик виміру величини  $f$ , що не дозволяє визначити, яке ж з розглянутих рівнянь найбільш точно відповідає дійсній величині  $f$ .

Ефективність пиловловлення в апараті з провальними тарілками може бути розрахована за рівнянням [18]

$$\eta = \eta_o \left( \frac{w_z}{2} \right)^{0,036} \cdot \left( \frac{H_n}{0,09} \right)^{0,032} \quad (1.13)$$

де  $\eta_o$  – ефективність при швидкості газу  $w_2 = 2$  м/с та висоті шару піни  $H_n = 0,09$  м.

Автори [60, 61] в своїх роботах підтверджують високу ефективність пиловловлення в апаратах з ПТВО, але аналіз літературних джерел дозволяє стверджувати про відсутність залежностей для розрахунку ефективності роботи апаратів з ПТВО, що також становить науковий інтерес.

### 1.5 Мета і задачі дослідження

Проведений аналіз окремих виробництв хімічної промисловості показав [9, 103], що ступінь очищення газових викидів в атмосферу не відповідає теоретично можливій ефективності роботи газоочисного обладнання. Застаріле обладнання, без урахування фізико-хімічних властивостей домішок, призводить до збільшення викидів в навколишнє середовище [104]. Проблема ускладнюється зносом морально застарілого обладнання.

Проведений літературний огляд дозволяє зробити висновок, що одним із перспективних видів пиловловлюючого обладнання, що відповідає поставленим вимогам комплексного очищення забруднених пилом газів хімічних виробництв є апарати з провальними тарілками великих отворів.

Метою дисертаційної роботи є вирішення наукової проблеми, що призводить до зниження техногенного навантаження від пилових викидів шляхом удосконалення системи пилоочищення з застосуванням апаратів із ПТВО.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- дослідити вплив пилових викидів на довкілля;
- дослідити характеристики пилу як чинника формування екологічної безпеки в умовах конкретного підприємства хімічної промисловості;
- розробити математичну модель процесу розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері;
- на підставі вивчення умов утворення, складу і властивостей пилу провести вибір найбільш ефективного обладнання для пиловловлення;

- дослідити вплив конструктивних та режимних параметрів апарата з ПТВО на ефективність пиловловлення;
- розробити маловідхідну технологію очищення газів від пилу;
- розробити рекомендації з експлуатації пилоочисного апарата.

## РОЗДІЛ 2

### ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є екологічна небезпека, що формується забрудненням атмосфери пиловими викидами хімічних виробництв. Тому в роботі розглянуто основні характеристики пилу як фактора екологічної небезпеки та складової об'єкта дослідження, проведено паспортизацію пилу [12]. Проведення паспортизації пилу є необхідним кроком на шляху вдосконалення системи очистки газу [105-107].

#### 2.1 Проведення паспортизації пилу

Для розроблення заходів щодо запобігання забрудненню навколишнього середовища пиловими викидами нами був складений паспорт пилу двоокису титану та ільменіту.

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

Стандартна методика перевірки ефективності мокрих пиловловлювачів ґрунтується на вловленні часток тальку, розміром 2-10 мкм [107]. Ефективність очистки газових викидів залежить від обґрунтовано обраного пиловловлюючого обладнання. Різні фізико-хімічні властивості пилу впливають на роботу газоочисних систем. Тому, з метою підвищення ефективності очистки повітря, а також попередження втрат продукту та сировини на ПАТ «Сумихімпром», замість еталонного пилу проводимо дослідження на реальному пилу хімічного виробництва.

##### 2.1.1 Паспортизація пилу ільменіту

Для паспортизації пилу ільменіту було виконано відбір проби газу після циклону Ц-15 на стадії розмелу ільменіту в кульовому млині. На цій стадії для



очистки повітря використовують циклон Ц-15 та рукавний фільтр (загальна ефективність очистки не перевищує 94%).

Характеристика газу – носія: температура – 30-35<sup>0</sup> С; запиленість – 30-38,2 г/м<sup>3</sup> [20].

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 темно-сірого кольору. Загальний вигляд пилу ільменіту за допомогою електронного мікроскопа „РЭМ-106-и” зображено на рис. 2.1.

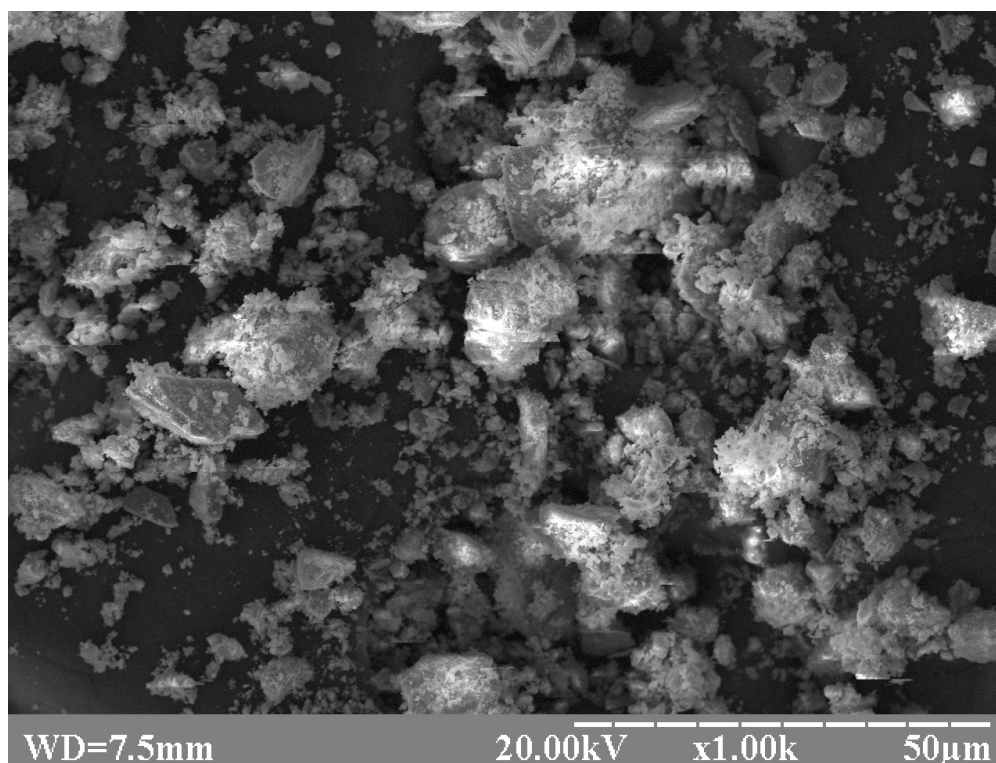


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд пилу ільменіту

Зразки досліджуваних проб пилу поміщали на двобічну провідну вуглецеву липку стрічку. Для надання об'єктам електропровідності проводили напилення вуглецем у ВУП-5 при вакуумі порядку 10<sup>-5</sup> мм рт. ст. Товщину шару вуглецю (близько 20 нм) контролювали за індикатором з білої кераміки, на який нанесено краплину вакуумної олії ВМ-1. Підготовлені зразки вміщували в електронний

мікроскоп „РЭМ-106-и” і досліджували при прискорюючій напрузі 20 кV у режимі вторинних електронів у діапазоні електронно-оптичного збільшення від 600 до 6000 крат.

Проведені лабораторні дослідження показали, що переважають частинки 4 – 8 мкм, тобто пил є дрібнодисперсним. Дисперсний склад пилу визначали за допомогою приладу X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78 (рис. 2.2) шляхом седиментації в гліцерині [108]. З рис. 2.2 можна визначити модальний діаметр часток пилу ільменіту –  $d_m = 6$  мкм. Вміст частинок розміром менше 4 мкм складає 15%, частинок розміром 4 – 8 мкм – 45%, розміром 8 - 12 мкм – 28%, частинок розміром більше 12 мкм – 12% (табл. 2.1).

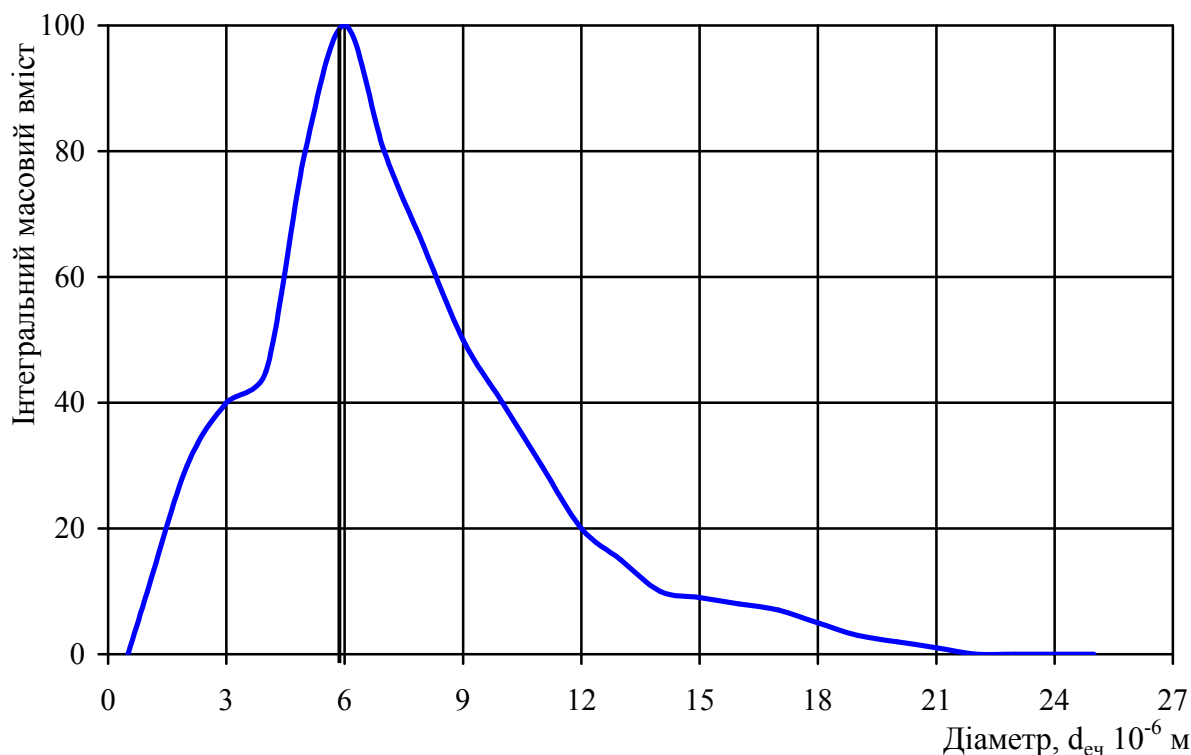


Рисунок 2.2 – Дисперсний склад пилу ільменіту (X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78)

Таблиця 2.1 – Дисперсний склад пилу ільменіту (седиментація в гліцерині)

$d_{сч}$ , 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. 2.3) дозволила визначити середній розмір частинок пилу  $d_{50} = 7,2$  мкм та середньоквадратичне відхилення розподілу частинок пилу  $\sigma = 0,32$ .

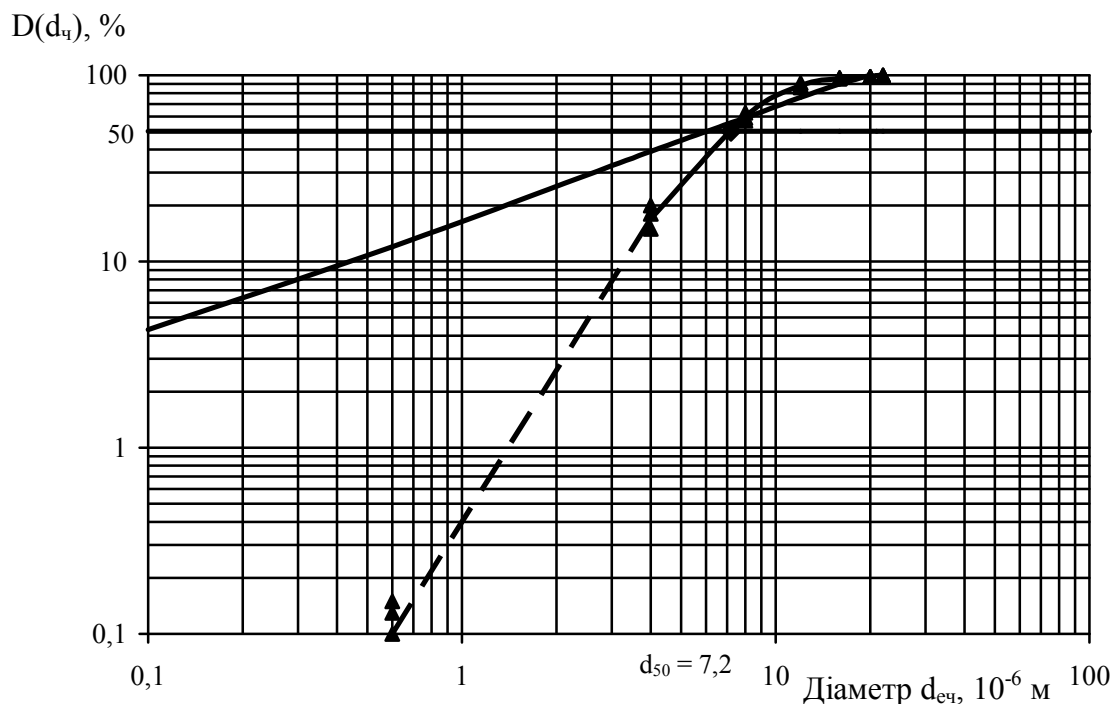


Рисунок 2.3 – Інтегральний розподіл часток пилу ільменіту:  $D(d_p)$  – відносний вміст часток менше даного розміру  $d_{сч}, \%$ .

З метою апроксимації результатів розподілу частинок пилу за дисперсністю побудовано графіки розподілу в Microsoft Excel (рис.2.4).

Аналіз рис. 2.4 дозволив отримати залежність розподілу часток за дисперсністю

$$y = -0,2494x^2 + 16,047x - 28,42 \quad (2.1)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (2.1) складає  $R^2=0,943$ .

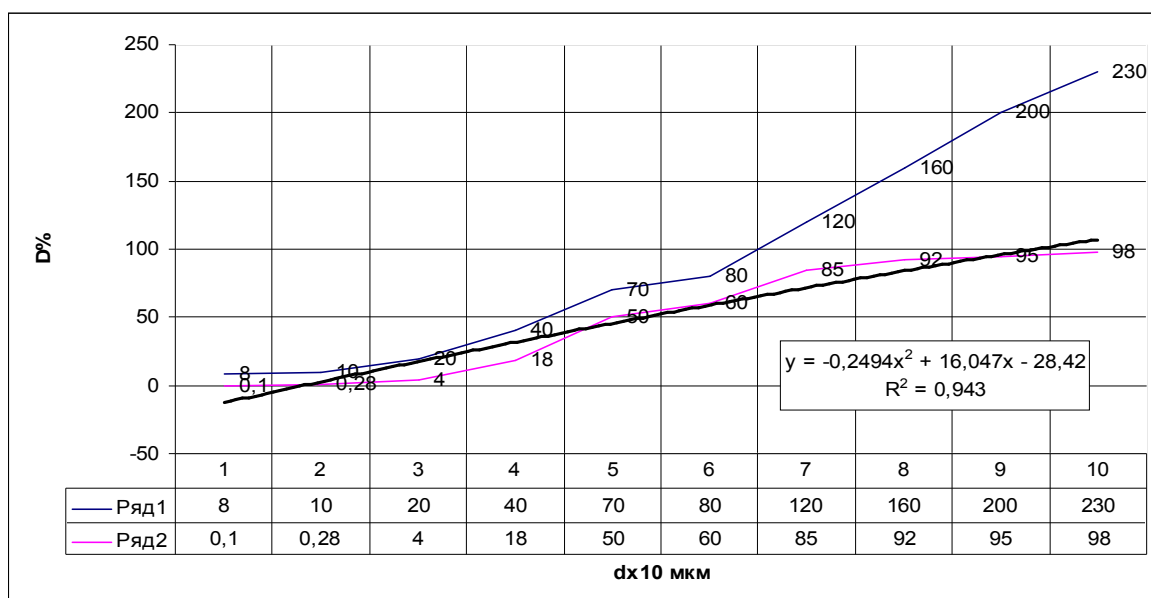


Рисунок 2.4 – Розподіл маси пилу ільменіту за розмірами

Для визначення решти механічних властивостей пилу використовувалися наступні методи [109]: 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, злипаємості (адгезійні властивості пилу); плівкової флотації – для визначення крайового кута змочування. Механічні властивості пилу ільменіту представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Механічні властивості пилу ільменіту

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Щільність	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	3550 – 3650
Насипна щільність (неуцільнений стан)	$\rho_n$	кг/м <sup>3</sup>	1370 – 1450
Насипна щільність (уцільнений стан)	$\rho_y$	кг/м <sup>3</sup>	1980 – 2090
Кут природнього відкосу статичний	$\alpha_{ст}$	град.	55 – 56
Кут природнього відкосу динамічний	$\alpha_d$	град.	49 – 50
Коефіцієнт уцільнення	$K_y$	-	1,44
Розривна міцність (злипність)	$T_p$	Па	310 – 330
Крайовий кут змочування	$\Theta$	град.	72

### 2.1.2 Паспортизація пилу двоокису титану

Для паспортизації пилу двоокису титану було виконано відбір проби газу після пилової камери на стадії прокалки гідратованого двоокису титану. На цій стадії використовують порожнисті аміачні скрубери, недоліком яких є значні витрати аміачної води та невисокий ступінь очищення. Застосування інших видів пилоочисного обладнання є проблематичним через забивання контактних пристроїв часками кальцинату двоокису титану, внаслідок адгезійних властивостей, які в більшості залежать від дисперсного складу пилу.

Характеристика газу – носія: температура – 30-70<sup>0</sup> С; запиленість – 2,5-10 г/м<sup>3</sup> [20].

Пил двоокису титану належить до групи неорганічного пилу, являє собою порошок білого кольору. Частинки мають як кристалічну так і округлу форму. У загальній масі пил білого кольору. Загальний вигляд пилу двоокису титану за допомогою електронного мікроскопа „РЭМ-106-и” зображено на рис. 2.5.

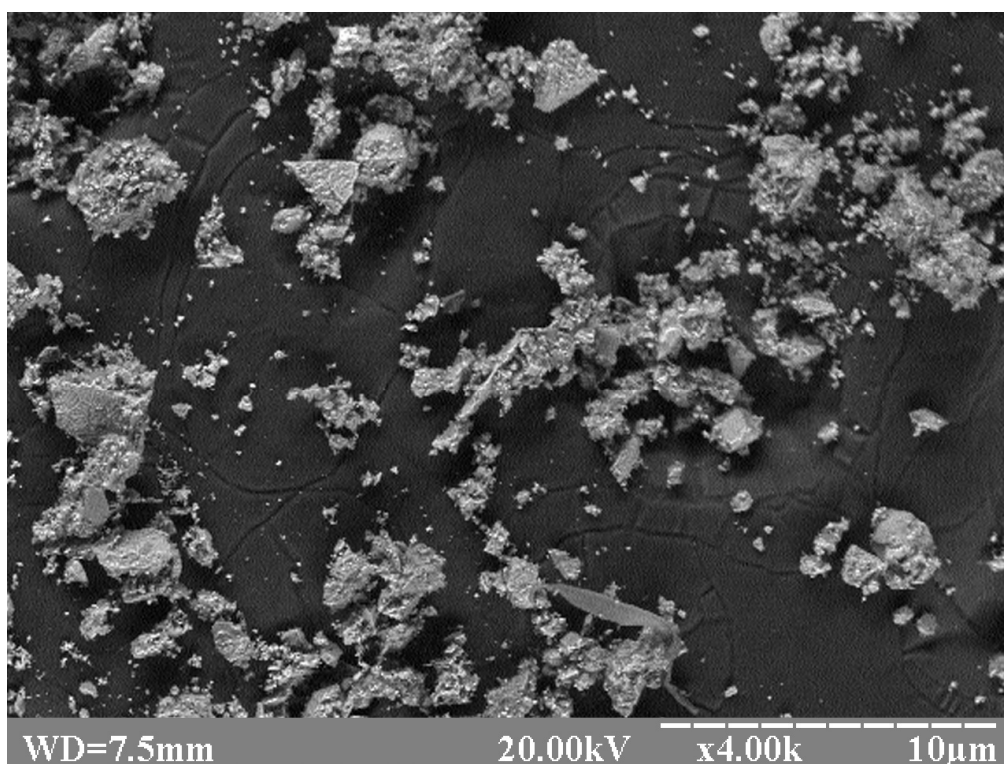


Рисунок 2.5 – Загальний вигляд пилу двоокису титану

Лабораторні дослідження показали [12], 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. 2.6) шляхом седиментації в гліцерині. З рис. 2.6 визначаємо модальний діаметр часток пилу –  $d_m = 0,28$  мкм. Вміст частинок розміром менше 0,2 мкм складає 10%, частинок діаметром 0,2 – 0,3 мкм – 37%, діаметром 0,3 – 0,4 мкм – 31%, діаметром 0,4 – 0,5 мкм – 13%, частинок діаметром більше 0,5 мкм – 9% (табл. 2.3).

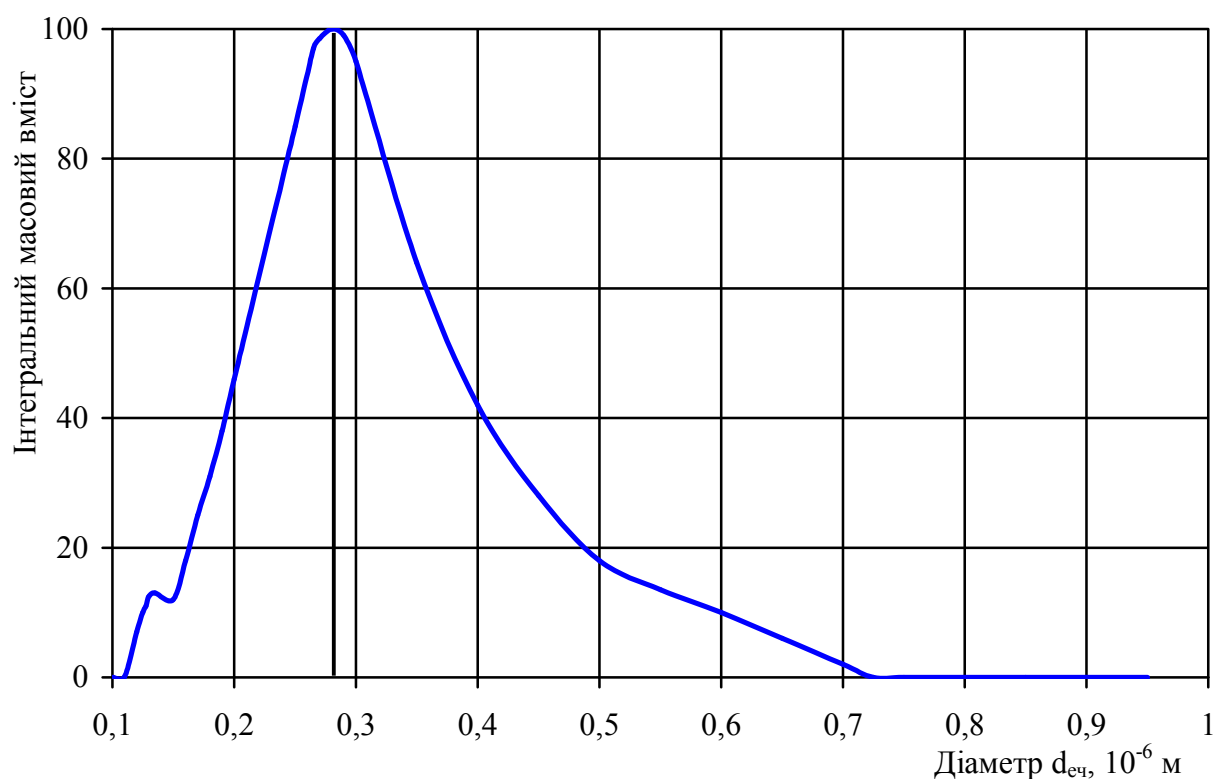


Рисунок 2.6 – Дисперсний склад пилу TiO<sub>2</sub> (X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78)

Таблиця 2.3 – Дисперсний склад пилу TiO<sub>2</sub> (седиментація в гліцерині)

$d_{сч}$ , 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. 2.7) дозволила визначити середній розмір частинок пилу  $d_{50} = 0,305$  мкм та середньоквадратичне відхилення розподілу частинок пилу  $\sigma = 0,29$ .

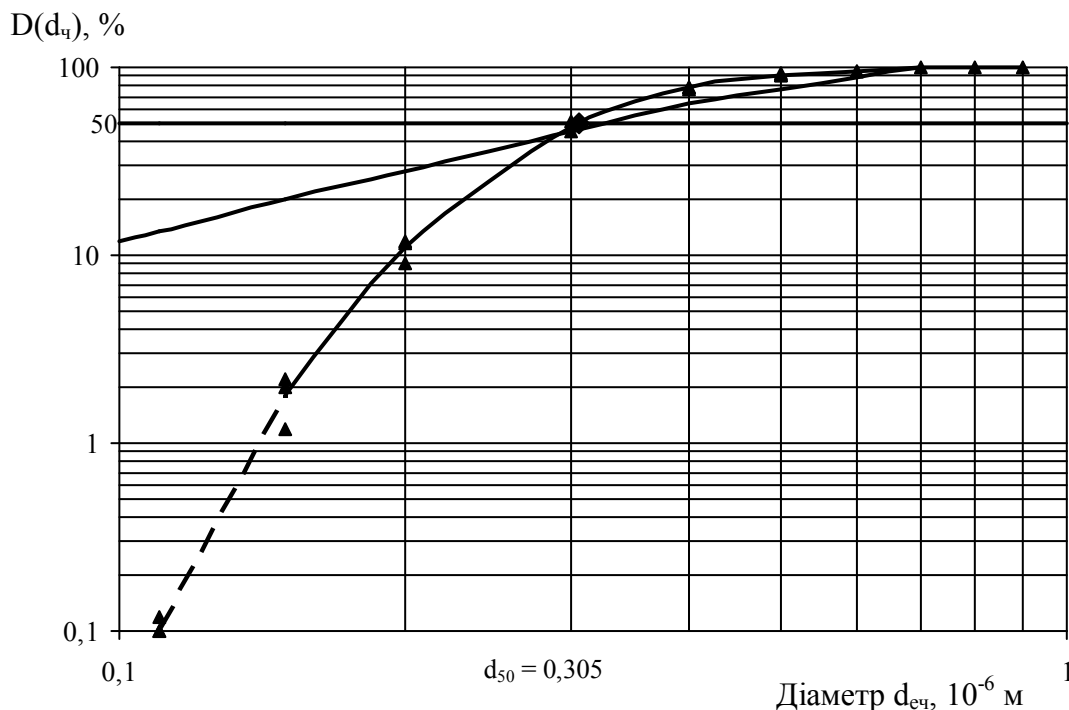


Рисунок 2.7 – Інтегральний розподіл часток пилу двоокису титану

З метою апроксимації результатів розподілу частинок пилу за дисперсністю побудовано графіки розподілу в Microsoft Excel (рис.2.8).

Аналіз рис. 2.8 дозволив отримати залежність розподілу часток за дисперсністю

$$y = 53,19 \ln(x) - 18,687 \quad (2.2)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (2.2) складає  $R^2=0,883$ .

Механічні властивості пилу двоокису титану представлені в табл. 2.4.

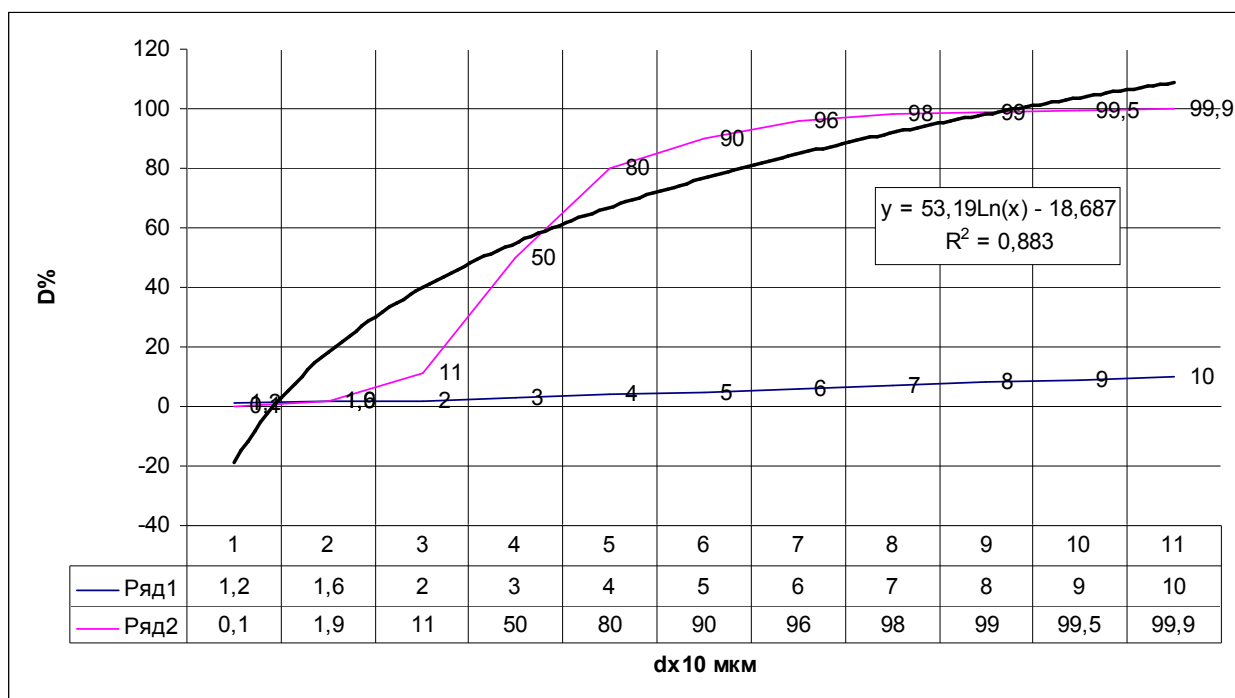


Рисунок 2.8 – Розподіл маси пилу двоокису титану за розмірами

Таблиця 2.4 – Механічні властивості пилу  $TiO_2$ 

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Щільність	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	2850 – 2920
Насипна щільність (неущільнений стан)	$\rho_n$	кг/м <sup>3</sup>	920 – 970
Насипна щільність (ущільнений стан)	$\rho_v$	кг/м <sup>3</sup>	1200 – 1240
Кут природного відкосу статичний	$\alpha_{ст}$	град.	57 – 58
Кут природного відкосу динамічний	$\alpha_d$	град.	52 – 53
Коефіцієнт ущільнення	$K_v$		1,52 – 1,58
Розривна міцність (злипність)	$T_p$	Па	758 – 802
Крайовий кут змочування	$\Theta$	град.	36

## 2.2 Експериментальна установка

При розробці процесів і апаратів хімічної технології необхідними стадіями проектування є побудова початкової моделі, розробка і перевірка прийнятих рішень на дослідницькій або напівпромисловій установці.



Однією з основних проблем при моделюванні і проектуванні масообмінних апаратів є проблема масштабного переходу, яка полягає в зниженні ефективності масообмінного устаткування зі збільшенням його розмірів. Масштабний ефект має складну природу й обумовлений, головним чином, збільшенням нерівномірності розподілу фаз на промисловому контактному пристрої, у порівнянні з лабораторним макетом. З врахуванням вищесказаного, лабораторні дослідження проводилися на укрупненій моделі.

Експериментальні дослідження гідродинаміки та пиловловлення апарату з ПТВО проводилися на лабораторному стенді (рис. 2.1) [10, 11].

Стенд для дослідження гідродинаміки та пиловловлення являє собою колону розмірами: висотою 2 м, довжиною 0,3 м, шириною 0,25 м з 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 оргскла, що дозволило провести візуальне спостереження, фотографування та відеозйомку.

Експериментальна установка дозволила проводити дослідження гідродинамічних характеристик та пиловловлення в режимі протитоку. 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.

Вода на установку подавалась з водопровідної мережі в напірну ємність 6, далі подавалась вгору 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 зменшити краплини під час роботи апарата.

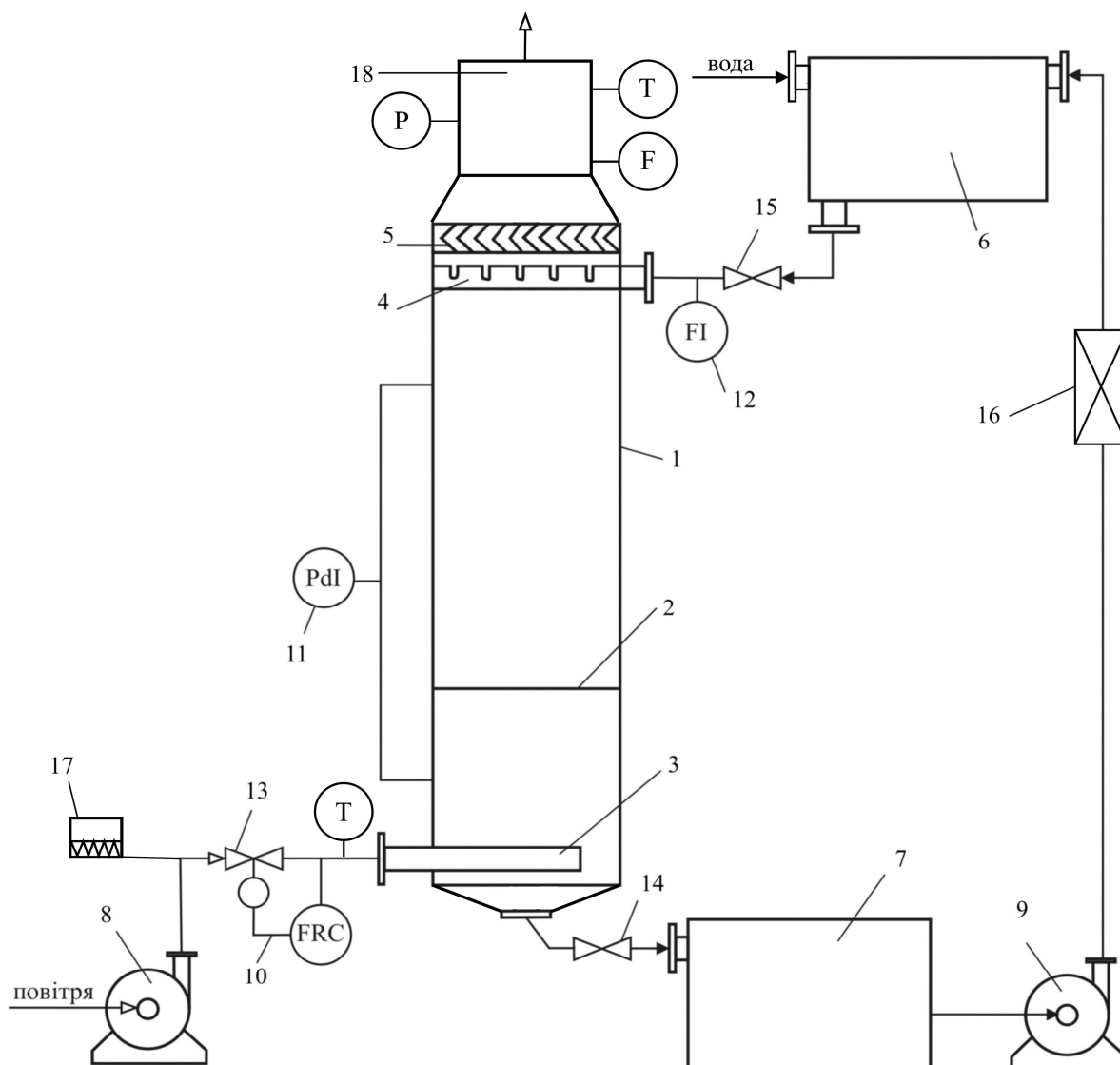


Рисунок 2.1 – Схема експериментальної установки:

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 – вентилі; 16 – фільтр; 17 – шнековий дозатор; 18 – точки відбору проб пилу

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.

Обладнаний у такий спосіб дослідний стенд дозволяє проводити дослідження гідродинаміки і пиловловлення апарату.

### **2.3 Загальна методика проведення досліджень**

Для виконання експериментальних досліджень проводилося планування експерименту [110-115]. Планування експериментальних досліджень спрямовано на отримання максимуму інформації за мінімальних витрат на експериментування.

Експериментальні дослідження як гідродинаміки так і пиловловлення проводилися в наступній послідовності: було зроблено вибір і обґрунтування факторів, що обумовлюють ефективність роботи апарату з провальними тарілками великих отворів, проведено серію експериментів, здійснено обробку та аналіз отриманих результатів. Визначення параметрів газу для вимірювання пиловловлення здійснювалася повіреними приладами (Додаток А).

Перед розробкою плану експерименту на основі апріорної інформації були виявлені фактори, які впливають на ефективність роботи пилоочисного апарата. До таких факторів належать:

$L_z$  - щільність зрошення,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ;

$\tau$  - вільний перетин тарілки, %;

$w_2$  - швидкість газу в апараті,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$H$  - висота шару піни (газорідинної суміші),  $\text{м}$ ;

$K$  - кількість утримуваної рідини (КУР) в апараті під час його роботи,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ .

Регресійний аналіз здійснювався на основі експериментальних даних, що отримані при вивченні гідродинаміки та пиловловлення в апараті (Додаток Б). Побудова регресійних рівнянь моделі та тривимірних графіків відбувалася за

допомогою наступних програмних продуктів: системи комп'ютерної алгебри з класу систем автоматизованого проектування Mathcad 14.0 [116]; системи статистичного аналізу даних Statistica 6.0 [117]; програми для побудови графіків та їх аналізу Advanced Grapher 2.2 [118].

В роботі було отримано математичну модель розсіювання дрібнодисперсного пилу на основі чисельного розв'язку рівняння дифузії та переносу методом кінцевих різниць, реалізовану в програмному середовищі MapleSoft 12.0 та компіляторі C++.

#### **2.4 Методика дослідження гідродинамічних характеристик апарату**

В дослідження гідродинамічних характеристик апарату входили візуальні спостереження, експерименти по визначенню гідравлічного опору і кількості утримуваної рідини, основною метою яких було визначення робочого режиму апарату з ПТВО.

Необхідність дослідження гідравлічного опору апарату зумовлена тим, що гідравлічний опір характеризує енергетичні втрати. Гідравлічний опір колони з досліджуваними тарілками вимірювали диференціальним манометром 11 (ДСЕН-МІ 0-5 мА), з вихідним електричним сигналом, підключеним до вторинного приладу з диференційно-трансформаторною вимірювальною схемою (рис. 2.1).

Висоту шару піни вимірювали за шкалою, нанесеною на стінці стенду, що виконана з органічного скла.

Кількість рідини, що утримувалась визначали методом відсічення. При цьому одночасно припиняли подачу рідини і газу в колону 1 при перекритті засувки 13 та вентилів 14 і 15 (рис. 2.1). За об'ємом зібраної рідини визначали КУР. Необхідність визначення КУР зумовлена тим, що при недостатній щільності зрошення і коливаннях газорідинного шару, полотно тарілки буде відкриватися, що зумовить нестабільність роботи тарілки та значний бризковиніс

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

## 2.5 Методика дослідження пилоочищення

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

Дисперсний склад вмісту пилу визначено за допомогою попереднього лабораторного дослідження в лабораторії ПАТ «Сумихімпром» за допомогою приладу X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78 [108]. Принцип виміру базується на різній швидкості седиментації частинок пилу в гліцерині під дією відцентрової сили, з подальшим комп'ютерним аналізом.

Дослідження ефективності пилоочищення проводилося шляхом розрахунків показника ефективності по Мерфі

$$\eta = (G_{\text{кін}}/G_{\text{поч}}) \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

де  $G_{\text{поч}}$  – масова витрата пилу на вході в апарат, г/с,  $G_{\text{кін}}$  – масова витрата пилу на виході з апарату, г/с.

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)» [119].

МВВ забезпечує виконання вимірювань масової концентрації пилу в організованих викидах промислових стаціонарних джерел у діапазоні від 1,0 до 10000 мг/м<sup>3</sup> включно із границями сумарної відносної похибки,  $\delta$ ,  $\pm 15\%$ , що відповідає вимогам РД 52.04.59.

Результатам визначення концентрації пилу на виході з апарату передували попередні заміри параметрів газопилового потоку (Додаток В)

На початку проводили вимірювання 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).

Для виміру швидкості та тиску у конструкції лабораторної установки наявні спеціальні місця доступу в які вводяться пневмометричні (напірні) трубки НДІОГаз, до яких трубками під'єднано цифровий мікроманометр ММЦ-200, що дає змогу визначити не лише динамічний тиск, а й швидкість газового потоку. Похибка вимірів становить не більше  $\pm 1\%$ .

Температуру і вологість визначаємо за допомогою контактного цифрового термометра ТК - 5.06.

Після визначення параметрів газового потоку використовуємо зонд для забору пилу методом зовнішньої фільтрації зі змінними наконечниками. У якості фільтрувального матеріалу, до температур  $+60^{\circ}\text{C}$ , використовують аерозольні фільтри АФА-ВП.

Зібраний зонд вводили в газохід, через спеціально підготовлені отвори в верхній частині газоходу, з'єднували полімерними трубками з аспіраційним пристроєм, на ротаметрі якого встановлювали об'ємну витрату повітря, та вимірювали температуру та розрідження газу перед ротаметром. Тривалість відбору однієї проби має становити 20 хв. По закінченні часу відбору проби дістали зонд із газоходу. Після очищення зонду виконали заміну фільтра для наступного відбору.

Використані фільтри згортали навпіл запиленою стороною всередину, обережно поклали кожний у пакет із кальки, який, в свою чергу, вклали у поліетиленовий пакет. Після висушування виміряли маси фільтруючих елементів із відібраними пробами пилу: фільтри з відібраними пробами та контрольні фільтри. Отримані результати дозволили визначити концентрацію і масову витрату пилу на виході з апарату.

Вимірювання масової концентрації пилу двоокису титану на вході в апарат проводили виходячи з об'ємної витрати повітря та пилу через спеціально розроблений пристрій-дозатор.

## **2.6 Методика відбору проб пилу в СЗЗ**

Для відбору проб повітря на вміст пилу використовували гравіметричний метод з застосуванням електроаспіратора і фільтрувального патрону. У якості аспіраційного приладу використовували аспіратор М 822, який відповідає параметрам вимірюваного середовища. Аспіратор працює від джерела живлення 220 вольт, тому для проведення відбору проб у польових умовах використовували автомобільний акумулятор з перетворювачем напруги 12/220 вольт. Тривалість відбору проб складала 20 хвилин. У якості фільтрувального матеріалу використовували фільтри АФА-ВП.

Так як передбачалася серія замірів, використовували декілька комплектів фільтрів. Кожен використаний фільтр окремо поміщали в поліетиленову тару для подальшого зважування в лабораторних умовах. За результатами вимірів приросту ваги фільтрів мали змогу розрахувати запиленість повітря в межах СЗЗ.

## **2.7 Методика проведення мікроскопічних досліджень пилу**

Для дослідження елементного складу пилу на межі СЗЗ також використовували електронний мікроскоп. Растрова електронна мікроскопія з рентгенівським мікроаналізом була реалізована на приладі РЕММА-102 (SELMІ, Україна). Прилад дозволяє візуалізувати поверхню зразка в широкому діапазоні збільшень із дозволом порядку 10 нм і одержувати дані про елементний склад з аналізу характеристичних рентгенівських спектрів, порушуваних електронним зондом.

Вторинні електрони забезпечують максимальну в порівнянні з іншими сигналами роздільну здатність порядку 5...10 нм. Тому вони є в РЕМ головним джерелом інформації для одержання зображення поверхні об'єкта. Кількість вторинних електронів, що утворюються слабо залежить від атомного номера елемента.

У режимі мікроаналізу з використанням енергодисперсійного спектрометра EDX (ЕДАР), аналітичний сигнал накопичувався в обраних крапках поверхні зразка; для калібрувань використовували штатні еталонні зразки. Обробка спектрометричної інформації, виконання необхідних каліброваних вимірів, розшифрування характеристичних рентгенівських спектрів, якісний і кількісний аналіз проводилися за допомогою програмного забезпечення системи мікроаналізу.

## **2.8 Методика обробки результатів експериментальних досліджень. Оцінка впливу похибок замірів на результати досліджень**

Планування експерименту, постановка завдання дослідження і отримання результатів пов'язані безпосередньо зі зміною різних величин. В технологічних процесах під час проведення дослідження спостерігається наявність похибок на різних стадіях його проведення.

Якість засобів і результатів вимірювань прийнято характеризувати зазначенням їх похибки. Висока точність використовуваних приладів для вимірювання – одна з основних вимог проведення достовірного експерименту [120].

Визначення похибки вимірів та результатів розрахунку основних гідродинамічних та пилотуючих характеристик експериментального стенду з провальною тарілкою великого отвору базується на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях [121, 122] 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 [113, 121].

У ході проведення експерименту можливе виникнення двох родів помилок – випадкової та систематичної.



Випадкова помилка зменшує точність результатів експерименту. Аналіз такого роду помилки можливий за умов використання середньоквадратичного відхилення  $\sigma$ , що обчислюється за такою формулою [110]

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (2.2)$$

де  $\bar{x}$  – середнє арифметичне значення;  $x$  – значення одиничного параметра;  $n$  – число вимірів.

Найбільша можлива помилка окремого виміру визначається за правилом трьох сигм [120]

$$\Delta = 3\sigma. \quad (2.3)$$

Двосторонній довірчий інтервал середнього арифметичного значення  $\varepsilon$  визначали за залежністю [120] за умови ймовірності його потрапляння в довірчий інтервал 95%

$$\varepsilon = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad ..(2.4)$$

де  $t_p$  – критерій Стюдента.

Середньоквадратична похибка непрямих вимірів [120]

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \Delta \cdot x_i \right)^2}, \quad (2.5)$$

де  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Точність отриманих рівнянь регресії визначена за методикою найменших квадратів [120, 123].

Систематична помилка зміщає однаковою мірою всі показники величин, які контролюються в ході проведення експерименту. Для виключення помилки такого роду всі прилади, що використані в ході дослідження, пройшли тарування за допомогою зразкових приладів в умовах проходження експерименту. При цьому погрішність вимірів визначалася класом точності засобів виміру. Дані про точність вимірів робочих параметрів приведені в (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 - Точність виміру робочих параметрів

Вимірюваний параметр	Вимірювальні прилади	Клас точності засобів виміру, %.	Клас точності вимірів, %.
Гідравлічний опір	ДМ 3583М	0,5	1,5
	КСД 3	0,5	
	ДКС 0,6-100-Б;	0,5	
Витрата повітря	ДМ 3583М	0,5	1,0
	КСД 3	0,5	
Витрата рідини	РС-7	2,5	3,0
	КСД 3	0,5	

Максимальна відносна похибка вимірювання концентрації пилу в апараті та на межі СЗЗ складає 15%, що дозволяється відповідно методики [119], за умови ймовірності її потрапляння у довірчий інтервал 95%.

## Висновки

1. На підставі літературного огляду проведено паспортизацію пилу ільменіту та двоокису титану [12], як техногенних чинників формування екологічної безпеки підприємства. Встановлено, що пил є дрібнодисперсним та дуже дрібнодисперсний та має високі адгезійні властивості.

2. Розроблено конструкцію лабораторного стенду для вивчення гідродинамічних та пиловловлюючих характеристик апарату з ПТВО.

3. Проведено вибір і обґрунтування факторів, що обумовлюють ефективність роботи апарату з провальними тарілками великих отворів.

4. Описані методи дослідження гідродинаміки, пиловловлення та відбору проб на межі СЗЗ.

### РОЗДІЛ 3

## МОДЕЛЮВАННЯ РОЗСІЮВАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ В АТМОСФЕРІ ВІД СТАЦІОНАРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗАБРУДНЕННЯ

Аналіз антропогенного впливу на природні екосистеми свідчить, що швидкість деградації довкілля України набула таких масштабів, що вийшла за межі швидкості біологічного пристосування живих організмів до середовища існування, тобто втрачена стійкість екосистем. Якщо за акумулюючий показник антропогенного "тиску" на навколишнє середовище взяти здоров'я населення, то статистичні медичні дані свідчать про все зростаючий вплив екологічних чинників на фізичний потенціал нашого суспільства [7, 124]. Це ставить задачу прогнозування впливу забруднюючих речовин на довкілля від діючих виробництв. Результати такого прогнозу є підґрунтям для розробки захисних заходів.

### 3.1 Фізична модель розсіювання пилу в атмосфері

Розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері відбувається під дією вітрових потоків повітря з врахуванням їх дрібномасштабних флуктуацій. Середній потік забруднюючих часток, що переносяться повітряними масами, як правило має адвективну і конвективну складову. Середні флуктуаційні рухи часток можна інтерпретувати як дифузію на фоні основного середнього руху, пов'язаного з ним. Якщо спостерігати за факелом димової труби, то, по-перше, спостерігається захоплення димового факела потоком повітря і, по-друге, поступове розширення цього факела при віддаленні від джерела в наслідок дрібномасштабної турбулентності. В результаті факел має форму витягнутого конусу, що розширюється в напрямку руху повітряних мас. Збільшуючись під впливом крупно масштабних турбулентних флуктуацій, факел розпадається на ізольовані вихрові утворення, що захоплюються повітряними масами на велику відстань від джерела розсіювання.

Пилові домішки, що викидаються в атмосферне повітря, як правило, мають полідисперсний склад. Великі частинки пилу під дією сил інерції починають знижуватися і осідають на поверхні землі здебільшого поблизу джерела викиду або в межах санітарно-захисної зони (СЗЗ). Гравітаційний потік для важких часток виявляється набагато більшим дифузійного, тоді як для легких домішок він практично невідчутний. Дрібнодисперсний пил захоплюється повітряними масами та переноситься на велику відстань від джерела розсіювання внаслідок дифузійного перенесення.

### 3.2 Математична модель розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері

Проведена паспортизація пилу двоокису титану та ільменіту дозволила класифікувати його як дуже дрібнодисперсний та дрібнодисперсний. Частка пилу, що осаджується під дією гравітаційних сил, зважаючи на дисперсний склад, буде невелика. Тому, в основі математичного моделювання процесу розповсюдження дрібнодисперсного пилу лежить дифузійна постановка задачі [31].

В своїй основі усі математичні моделі процесу розповсюдження домішок спираються на диференційне рівняння переносу

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} + w \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \sigma^* \varphi = \frac{\partial}{\partial z} \gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \mu^* \nabla^2 \varphi + k, \quad (3.1)$$

де  $\varphi$  – концентрація забруднюючої речовини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $t$  – час,  $\text{с}$ ;  $u, v, w$  – компоненти швидкості вітру за віссю декартової системи координат,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\mu^*$  – коефіцієнт горизонтальної дифузії в площині  $(x, 0, y)$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\gamma$  – коефіцієнт вертикальної дифузії в  $z$  – напрямку,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}$ ;  $k$  – параметр джерела, що залежить від координат і часу, тобто  $k = f(x, y, z, t)$ ;  $\sigma^*$  – величина, що пов'язана з трансформацією субстанції,  $\text{с}^{-1}$ .

Так як досліджуваний пил класифікували як дуже дрібнодисперсний та дрібнодисперсний, можна говорити про високу інерційність пилу, що буде повністю захоплюватись повітряним потоком при виході з отвору труби, а також незначну дію сили тяжіння. В зв'язку з цим було прийнято до розгляду одновимірну задачу [40] і у спрощеному вигляді рівняння 3.1 в умовах штилю з врахуванням переносу набуває вигляду

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \sigma^* \varphi = \mu^* \frac{d^2 \varphi}{dx^2} + Q \delta(x - x_o) \quad (3.2)$$

в нескінченному середовищі  $-\infty < x < \infty$ , де  $Q$  – потужність джерела, що викидає в атмосферу пил, кг/с;  $\delta(x - x_o)$  - дельта-функція Дірака, що враховує інтегральний вміст частинок пилу, що дифундують в об'ємі повітря за висотою, а також кількість частинок, що осідають на поверхні землі,  $1/\text{м}^3$

$$\delta = \sigma^* + \alpha \gamma / H, \quad (3.3)$$

де  $\alpha$  - функція, що характеризує взаємодію домішок з підстилаючою поверхнею;  $H$  – висота джерела викиду, м.

Рівняння (3.2) можна використовувати коли швидкість повітряних мас дорівнює нулю. При наявності вітру, а також з врахуванням постійної величини викиду (стаціонарний процес), воно набуває вигляду

$$u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma^* \varphi = \mu^* \frac{d^2 \varphi}{dx^2} + Q \delta(x - x_o). \quad (3.4)$$

Таким чином в рівнянні (3.4) ми також не враховуємо швидкість осадження часток, прийнявши їх такою що дорівнює нулю. Внаслідок високої інерційності часток дрібнодисперсного пилу він буде повністю захоплюватись потоком вітру.

Постановка граничних умов для рівняння (3.4) переносу домішок розглянуто в роботах [30, 40]. Приймаємо такі граничні умови: межею розсіювання пилу від стаціонарного джерела є розміри СЗЗ підприємства; джерело знаходиться в центрі координат; потужність викиду джерела є постійною величиною.

Наведене рівняння (3.4) належить до диференціальних рівнянь другого порядку, що мають аналітичне рішення лише у простих випадках. Для широкого спектру природних і технологічних процесів задачу можна розв'язати чисельно в тому випадку, коли похідні, що є у рівнянні, замінити на кінцеві різниці, створені на малих просторових інтервалах. У випадку моделювання реального процесу розповсюдження шкідливих домішок в атмосферному повітрі виконаємо дискретизацію простору, розбивши геометрію процесу на розрахункові інтервали (від джерела до відстані СЗЗ підприємства)

$$h = \frac{(b-a)}{n}, \quad (3.5)$$

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

Значення функції  $\varphi = \varphi(x)$  і її похідних  $\varphi' = \varphi'(x), \varphi'' = \varphi''(x)$  позначимо відповідно через  $\varphi_i = \varphi_i(x_i), \varphi_i' = \varphi_i'(x_i), \varphi_i'' = \varphi_i''(x_i)$ .

Вводимо позначення

$$\mu_i^* = \mu(x_i), u_i = u_i(x_i), \sigma_i^* = \sigma_i(x_i). \quad (3.6)$$

Замінімо похідні на односторонні скінченнорізницеві співвідношення

$$\varphi_i' \approx \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1}}{2h}, \quad (3.7)$$

$$\varphi_i'' \approx \frac{\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1}}{h^2}. \quad (3.8)$$

Формули (3.7) та (3.8) приблизно виражають значення похідних у внутрішніх межах інтервалу  $[a, b]$ .

Для граничних значень припустимо

$$\varphi_0' \approx \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{h}, \quad \varphi_n' \approx \frac{\varphi_{n-1} - \varphi_n}{h}. \quad (3.9)$$

Використовуючи формули (3.7) та (3.8), диференційне рівняння (3.4) при  $x = x_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ) наближено можна замінити лінійним рівнянням

$$\mu_i \frac{\varphi_{i+2} - 2\varphi_{i+1} + \varphi_i}{h^2} + u_i \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1}}{2h} + \sigma_i \varphi_i = Q\delta(x - x_0). \quad (3.10)$$

Перетворюючи рівняння (3.10) відносно  $\varphi_{i-1}$ ,  $\varphi_i$  та  $\varphi_{i+1}$  отримуємо скінченнорізницеву формулу для вирішення поставленої задачі

$$\left( \frac{\mu_i}{h^2} - \frac{u_i}{2h} \right) \varphi_{i-1} + \left( \frac{-2\mu_i}{h^2} + \sigma_i \right) \varphi_i + \left( \frac{\mu_i}{h^2} + \frac{u_i}{2h} \right) \varphi_{i+1} = Q\delta(x - x_0). \quad (3.11)$$

Алгоритм розрахунку концентрації дрібнодисперсного пилу на відстані від джерела забрудження реалізований на алгоритмічній мові C++ та наведено на рис. 3.1. Він складається з декількох основних етапів: 1 - 5 – визначення параметрів моделі; 6 - 9 – зазначення параметрів алгоритму розв'язку; 10 - 12 – цикл чисельного інтегрування; 13 – виведення результатів. Величина кроку у розрахунках становила 0,01 м, відповідно сітка мала  $10^4$  значень, результати яких підраховуються в середньому 5 секунд і зберігаються у вигляді файлу даних на комп'ютері.

Отримане в результаті перетворень рівняння (3.11), дозволяє розраховувати концентрацію дрібнодисперсного пилу на заданій відстані від джерела



розсіювання при певній швидкості вітру та заданій потужності джерела (у програмі приймається за одиницю) та отриманням результату у вигляді відсоткових значень від концентрації при виході з джерела викиду.

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.  $C[N] \Rightarrow$

Рисунок 3.1 - Схема реалізації чисельного розв'язку диференційного рівняння розповсюдження домішок в атмосфері методом кінцевих різниць

Графічну модель на основі рівняння (3.12) було побудовано в програмному продукті Maplesoft 12.0. Для коригування значень концентрації пилу в межах СЗЗ вводимо безрозмірний коефіцієнт  $C_k$ , фізичний сенс якого полягає у тому, що ми розглядаємо розсіювання пилу в вертикальній площині, а фактично вихід газопилової суміші відбувається по всьому периметру отвору джерела і лише потім захоплюється потоком повітря. Приймаємо його значення  $C_k = 1 \cdot 10^{-3}$ . Результат моделювання приведено на рис. 3.2. Вихідними умовами були: потужність джерела викиду  $10,4 \cdot 10^{-3}$  кг/с (приймаємо в розрахунках за одиницю); швидкість вітру 4,5 м/с, відстань від джерела 1000 м, коефіцієнт горизонтальної дифузії приймаємо згідно [30] як для аерозолію 1,5 м<sup>2</sup>/с. Для розрахунку розсіювання пилу в атмосфері нами, на основі експериментальних досліджень запиленості повітря, було прийнято наступні значення  $\sigma$ : для дуже дрібнодисперсного пилу 0,06 с<sup>-1</sup>, для дрібнодисперсного 0,1 с<sup>-1</sup> [37, 40].

З рис. 3.2 видно, що профіль зміни концентрацій від джерела розсіювання рівномірний. Даний рисунок характеризує круговий напрямок вітру, а модель може враховувати лише один його напрямок. Найбільша кількість дрібнодисперсного пилу осідає одразу біля джерела розсіювання, але спостерігається також значне перенесення домішок. Так, на відстані 1 км – межі СЗЗ ПАТ «Сумихімпром» за заданих умов концентрація пилу може скласти близько 1,2 ГДК (насел. пункта). Це можна пояснити високою інерційністю пилу, який захоплений потоком вітру, переміщується на значну відстань.

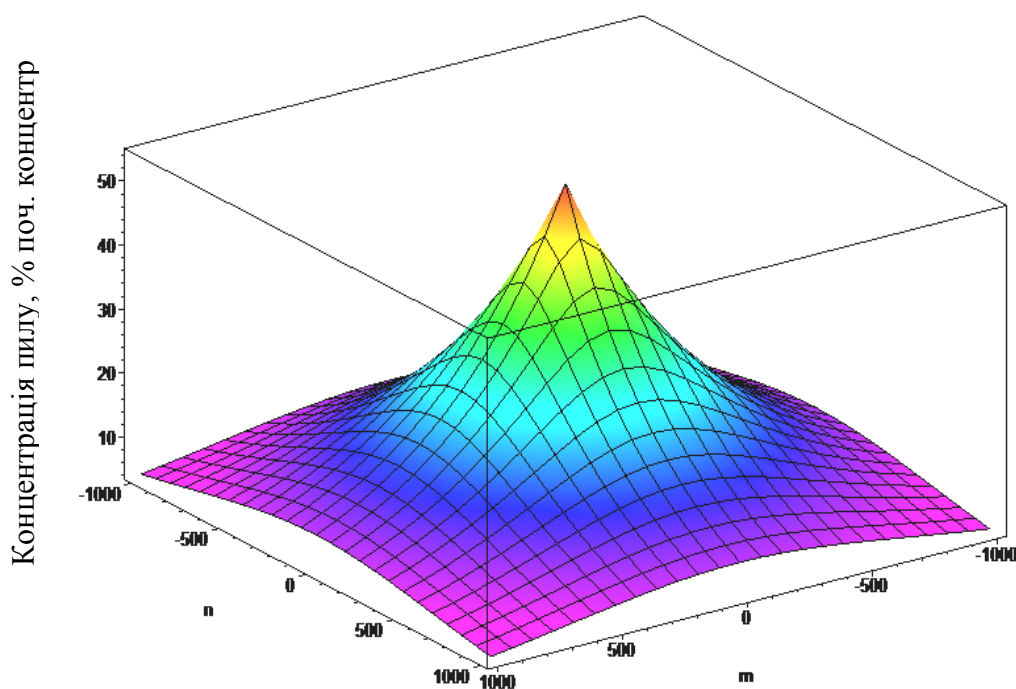


Рисунок 3.2 - Модель розподілу концентрацій дрібнодисперсного пилу від джерела викиду:  $n$ ,  $m$  – вісі координатної сітки, м.

Для визначення адекватності математичної моделі проведемо порівняння з експериментальними дослідженнями.

### 3.3 Перевірка адекватності математичної моделі

З метою перевірки адекватності математичної моделі було виконано заміри запиленості повітря на межі санітарно-захисної зони ПАТ «Сумихімпром» та за

територією підприємства, результати яких наведено в Додатку Г та табл. 3.1. Всі заміри запиленості повітря припадали на період роботи лише виробництва двоокису титану на підприємстві. В результаті обробки експериментальних даних встановлено, що викиди підприємства наближаються до значень гранично-допустимих концентрацій і суттєво впливають на прилеглі райони (для відібраних проб пилу ГДК в робочій зоні становить  $10 \text{ мг/м}^3$ , а ГДК для населених пунктів складає  $0,5 \text{ мг/м}^3$ ). Особливо цей вплив може бути відчутний при залпових викидах та можливих неполадках очисного обладнання. Так, на території за межею СЗЗ на листях дерев протягом вегетаційного періоду постійно спостерігається наявність шару пилу, хоча вона розташована за межею СЗЗ.

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

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

Для перевірки дисперсного складу та елементного вмісту пилу було відібрано проби пилу на межі СЗЗ підприємства, враховуючи переважний напрямок вітру, за допомогою електроаспіратора на поверхню фільтрувального матеріалу. Проведені мікроскопічні дослідження пилу на базі Інституту прикладної фізики (ІПФ, м.Суми), дозволяють стверджувати те, що він є дрібнодисперсним. Загальний вигляд пилу зображено на рис. 3.3.

Результати растрової електронної мікроскопії з рентгенівським мікроаналізом (на базі ІПФ) відібраних проб пилу, реалізовані на приладі РЕММА-102 (SELMI) з використанням енергодисперсійного спектрометра EDX

(ЕДАР), підтверджують втрати як титановмісної сировини так і готового продукту (рис.3.4). Так, згідно з комп'ютерним розрахунком аналітичного сигналу та отриманих спектрів вміст елементного титану у відібраному зразку пилу становить близько 15% (масовий).

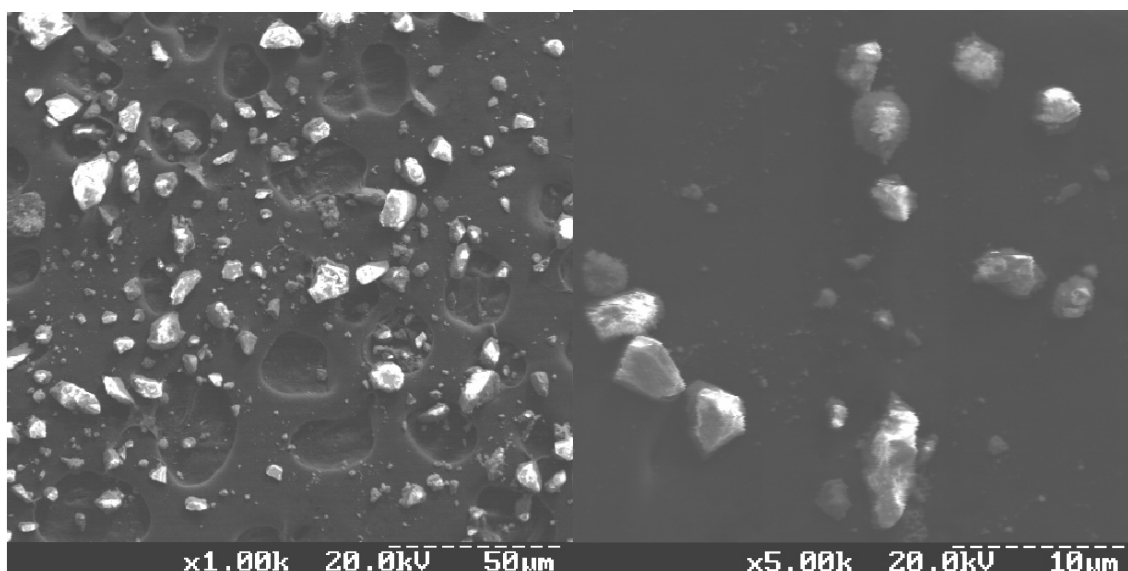


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд пилу

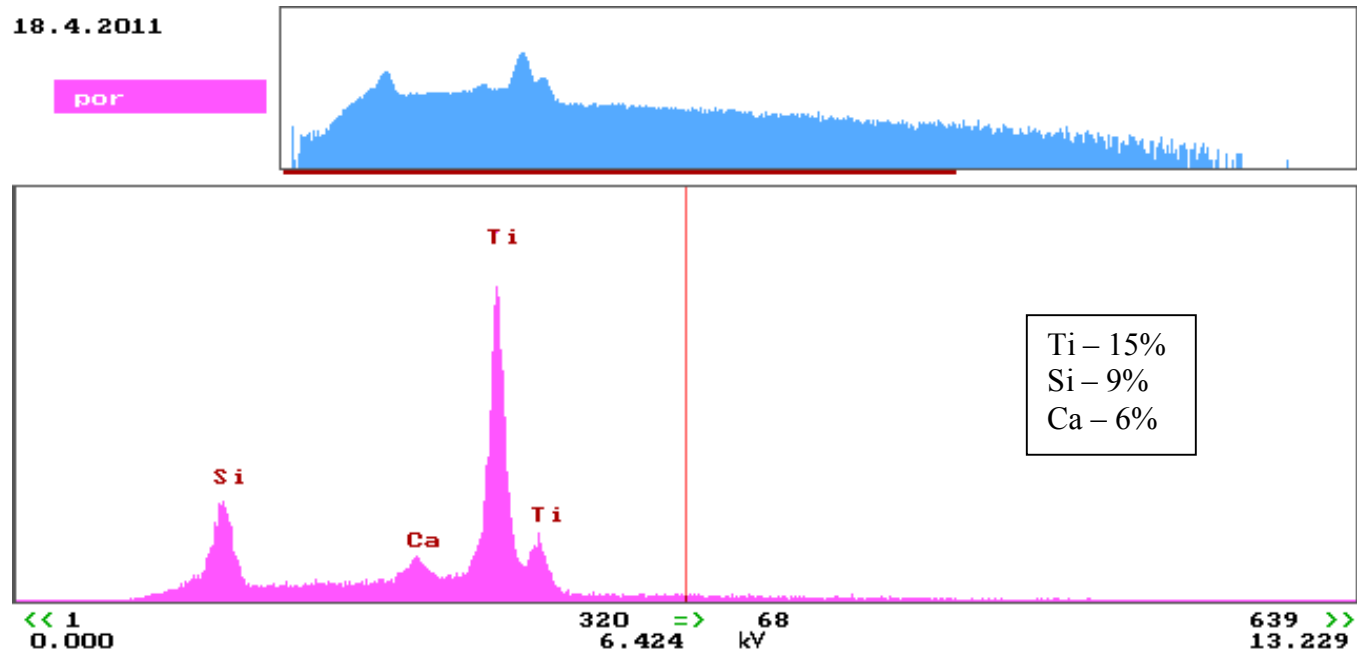


Рисунок 3.4 – Результати рентгенівського мікроаналізу пилу

Порівняльний аналіз математичної моделі та експериментальних даних наведено на рис. 3.5.

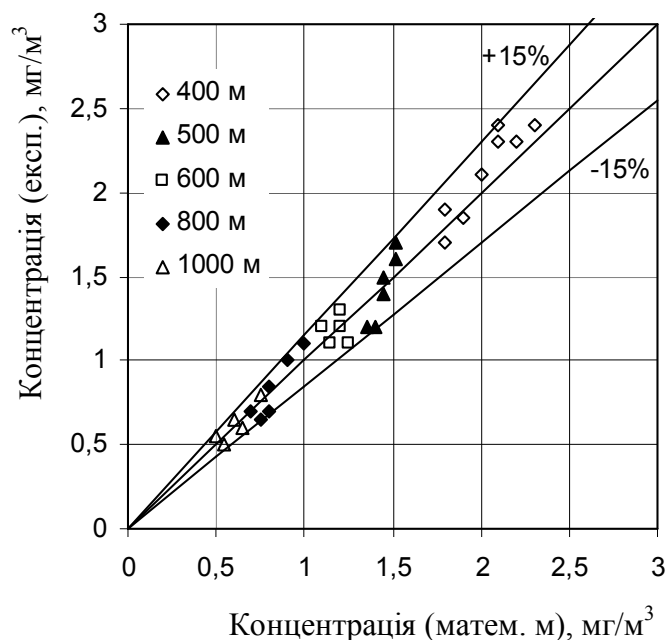


Рисунок 3.5 - Зіставлення результатів розсіювання дрібнодисперсного пилу за математичною моделлю та експериментальними даними

Аналіз отриманого графіку розподілу концентрацій на відстані від джерела викиду дозволяє встановити, що результат математичного моделювання схожий до результатів експериментальних досліджень. Як бачимо з рис. 3.5, відхилення розрахункових значень математичної моделі від результатів експерименту в основному не перевищує 15% у всьому дослідженому діапазоні відстаней. Найбільша відповідність математичної моделі експериментальним значенням відбору проб пилу спостерігається на відстані до 500 м від джерела розсіювання. Відхилення значень концентрацій математичної моделі відносно експериментальних даних (Додаток Г) замірів концентрації пилу, обумовлені тим, що в математичній моделі не враховується фонове значення концентрацій пилу, а також при збільшенні відстані від джерела забруднення зростає вплив сторонніх факторів. Отже, можна говорити про те, що математична модель розсіювання достатньо точно описує процес розповсюдження пилу в атмосфері.

## Висновки

1. Розроблено математичну модель розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері.
2. Розроблена математична модель може бути використана для розрахунку концентрації дрібнодисперсного пилу на заданій відстані від джерела при певній швидкості вітру та заданій потужності джерела (Додаток Г).
3. Результати мікроаналізу пилу класифікували його як дрібнодисперсний та виявили вміст елементного Ті на рівні 15% (мас.).
4. Аналіз адекватності математичної моделі відносно експериментальних даних свідчить про адекватність розробленої математичної моделі, значення відхилень математичної моделі та експерименту не перевищують похибки 15%.

## **РОЗДІЛ 4**

### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ І ПИЛОВЛОВЛЮЮЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ АПАРАТУ**

Одним з напрямків вирішення проблем екологічної безпеки є вдосконалення традиційних методів очистки газоповітряних сумішей, шляхом впровадження на промислових підприємствах нових високоефективних технологічних рішень [106]. Складність та багатостадійність технологічних процесів на хімічних підприємствах є причиною утворення великої кількості різних за компонентним складом та фізико-хімічними властивостями пилогазових викидів [107]. Різні за дисперсним складом, здатні до налипання і забивання обладнання, вони не дозволяють використовувати більшість видів традиційного пилоочисного обладнання, як сухого так і мокрого типу. При контакті з рідкою фазою в апаратах мокрого типу пилогазовий потік утворює відкладення на стінках і контактних пристроях апарату, що призводить до низької ефективності роботи та частого припинення роботи обладнання з метою чистки.

З метою покращення рівня екологічної безпеки та для виконання вимог високоефективного пилоочищення газів необхідно забезпечити високу ефективність пиловловлення, стійкість устаткування до забивання твердими відкладеннями, низькі капітальні й експлуатаційні витрати [8, 125].

#### **4.1 Фізична модель гідродинаміки та пиловловлення в пилоочисному апараті**

Для опису фізичної моделі взаємодії фаз, більш доступним є розгляд елементарного акту процесу – вхід газу в рідину через одинарний або обмежену кількість отворів великого діаметру. В роботі [126] показано, що інтенсивність очищення газу визначається роботою одного отвору і залежить від маси газу, що виходить з нього. Це свідчить про можливість використання одинарного отвору для узагальнення закономірностей роботи ПТВО.

В апараті відбувається протитечійний рух газу і рідини. Газова фаза містить тверді частинки пилу, тобто розглядаємо трьохфазну систему. Для вибору розміру отворів контактної пристрою проводилися візуальні спостереження за роботою тарілок з отворами діаметром від 0,09, 0,12, 0,15 та 0,18 м [10].

Візуальні спостереження за гідродинамікою тарілок з різними отворами за однаковими режимами роботи (рис. 4.1), показують, що при отворі 0,15 м практично немає застійних зон та створено розвинуту поверхню контакту фаз, що свідчить про можливість ефективної роботи з забрудненими потоками, а на тарілках з отворами 0,09 та 0,12 м спостерігаються застійні зони. Використання тарілки з діаметром отвору 0,18 м взагалі не дозволило створити пінного шару через суцільний провал рідини. Тому надалі будемо розглядати тарілку з отворами 0,15 м.



а

б

в

Рисунок 4.1 – Шар піни на тарілках з різними отворами в режимі вторинного піноутворення: а – 0,09 м; б – 0,12 м; в – 0,15 м.

При підвищенні швидкості газу в апараті від 0 до 1,8 м/с спостерігається суцільний провал рідини через отвір тарілки. Зважаючи на розміри отвору контактної пристрою режим первинного піноутворення в апараті існує в вузьких межах при швидкості газу 1,8 – 2,1 м/с. При режимі первинного піноутворення практично не утворюється стабільний пінний шар, спостерігаються прориви газового потоку через центральну частину отвору у вигляді фонтануючих



струменів, при цьому бризковиніс практично відсутній. З подальшим підвищенням швидкості газу до 2,5 м/с на обраній тарілці спостерігається нестабільний турбулізований шар піни і злив рідини з тарілки, що носить неупорядкований характер (переважно це периферійна зона перетину отворів), збільшується кількість фонтануючих проривів та бризковиніс. Шар піни при цьому не має постійної висоти через значні його коливання і не перевищує 0,3 м. Зі збільшенням швидкості газу в апараті (2,5-3,5 м/с) відбувається помітна стабілізація пінного шару, виділяємо появу на поверхні тарілки високо інтенсивного пінного режиму – вторинного піноутворення. Поява режиму вторинного піноутворення означає, що апарат вийшов на робочий режим.

У режимі вторинного піноутворення спостерігається розвинута вихрова взаємодія фаз внаслідок утворення тороїдального вихору при розпаді пухиря в зоні пінного шару над отворами тарілки. Газорідинний потік являє собою вируючу піну, але одночасно спостерігається і помітна стабілізація шару та рівномірний розподіл локального газовмісту шару і рідини по всьому поперечному перерізу апарата, а злив рідини відбувається переважно через центральну частину отворів тарілки (рис. 4.2). Шар піни в режимі вторинного піноутворення досягає висоти 0,6 м.

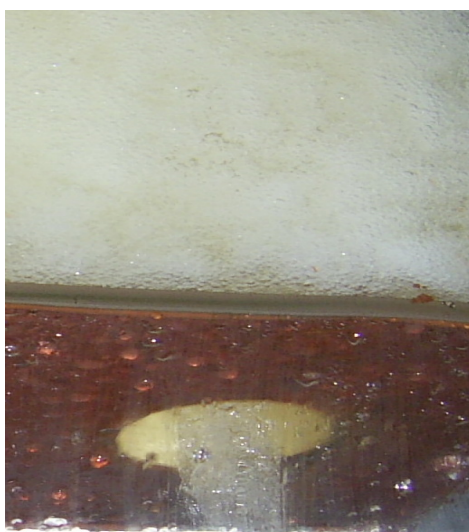


Рисунок 4.2 – Злив рідини через центральну частину отворів тарілки

Основні стадії формування пухиря на ПТВО в режимі вторинного піноутворення представлені на рис. 4.3.

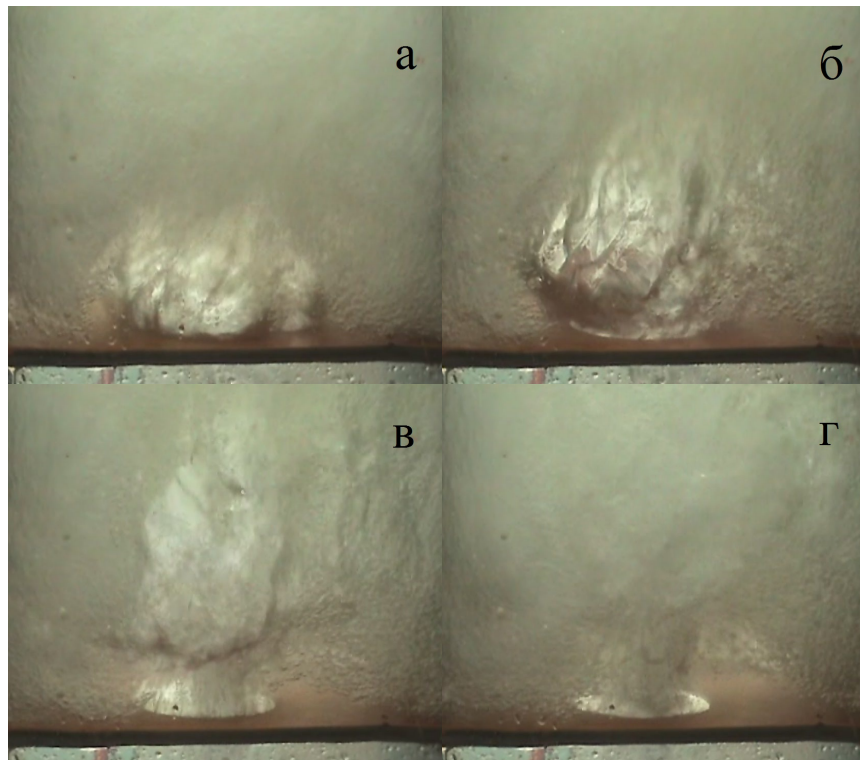


Рисунок 4.3 – Утворення пухиря на ПТВО:

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

Під час проходження газу через отвір тарілки на її поверхні утворюється пухир (рис. 4.3, а), поверхня якого за рахунок діаметра отворів тарілки має значні коливання. При швидкостях газу 2,5-3,5 м/с спостерігається швидке зростання об'єму та відповідно поверхні пухиря і його відрив від краю отвору тарілки (рис.4.3, б).

Під час відриву від краю отвору (рис. 4.3, в) такий вихор розпадається внаслідок нестійкості форми та зменшення сил поверхневого натягу і утворює менші вихрові потоки та ряд дрібних, стійких пухирів (рис. 4.3, г). Саме в процесі подрібнення пухиря і утворення системи пухирів та вихрових потоків

відбувається передача коливального імпульсу на отвір тарілки, що призводить до пульсаційної зміни тиску в просторі під тарілкою. Пульсаційне коливання полотна тарілки дозволяє апарату ефективно працювати з пилогазовим потоком, частинки якого характеризуються високою адгезійною здатністю і схильні до налипання на полотні тарілки.

Осадження твердих часток у шарі піни ПТВО відбувається під дією турбулентно-інерційного і турбулентно-дифузійного механізмів - залежно від густини і розміру частинок. Для дослідження пиловловлення в апараті з ПТВО було обрано пил двоокису титану, який окрім того що є дрібнодисперсним, характеризується високим кутом змочування та адгезійними властивостями, що при контакті з рідиною призводить до налипання на стінках та контактних пристроях пилоочисних апаратів.

Частинки твердої фази мають розмір значно менший розміру турбулентних пульсацій потоку і тому утягуються у пульсаційний вихровий рух газового потоку. Великі частинки пилу, які мають велику інерційність, осаджуються переважно на змоченому полотні тарілки та на стікаючі струмені рідини з отворів тарілки під впливом турбулентно-інерційного механізму («механізм удару»). Значна частина пилу переходить у рідку фазу, а решта внаслідок своїх адгезійних властивостей налипає на нижній поверхні тарілки. Внаслідок експериментальних спостережень візуально можна було спостерігати налипання частинок пилу знизу тарілки ближче до пристінного простору, знизу по периметру отвору налипання майже відсутнє протягом тривалого часу експлуатації (більше доби). Відсутність забивання полотна з тарілками великих отворів пояснюється як наслідок пульсацій полотна тарілки за рахунок енергії розпаду пухиря, що створюється на поверхні тарілки.

Дрібні частинки, які характеризуються високим ступенем захоплення [127], осаджуються на поверхню рідини (осадження на поверхню пухиря та змочене полотно тарілки) під впливом турбулентно-інерційного механізму, а після розпаду пухиря на дрібні струмені і пухирці – турбулентно-дифузійного (осадження в шарі піни). При роботі апарату з ПТВО пиловловлення відбувається в основному

за турбулентно-дифузійним механізмом, зумовленим високотурбулізованим шаром піни.

При утворенні газового пухиря частинки пилю, що за інерцією потрапили разом з газовим потоком в середину нього, знаходяться в середовищі з відотною вологістю 100%. Тим самим, внаслідок високого кута змочування та хаотичного руху часток в середині пухиря утворюються агломерації, які внаслідок збільшення своєї маси осідають на поверхні пухиря. Після досягнення критичного розміру пухиря відбувається його руйнування і сили поверхневого натягу, що підтримували тиск в середині нього зникають. Внаслідок цього утворюється розрідження, що збільшує ймовірність зіткнення і агломерації пилових часток. Решта пилю, що не осіла на поверхні пухиря потрапляє в газорідні струмені і дрібні пухирці після його руйнування, де далі продовжує вловлюватись під дією турбулентно-дифузійного механізму в шарі піни.

Отже, можна говорити про можливість застосування ПТВО в якості пристрою з мінімальною схильністю до заростання отворів контактного пристрою для очистки газового потоку як від легкозлипливих так і смолистих часток.

## 4.2 Гідродинаміка апарату з ПТВО

Для виявлення робочого режиму апарату з ПТВО проводились дослідження гідродинамічних характеристик проводилися в наступному діапазоні режимних параметрів [128]:

- швидкість повітря ( $w_2$ ) в колоні при проведенні дослідів змінювали в межах 0,5 – 3,5 м/с;

- щільність зрошення ( $L_3$ ) складала 10 – 20 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·год.

У колоні відбувається протитечійний рух газу і рідини, який призводить до утворення високотурбулізованого газорідного шару на полотні тарілки.

Проведені дослідження гідродинаміки апарату на тарілці з отворами 0,15 м дозволили виявити чотири режими роботи колони (рис. 4.4) [10].

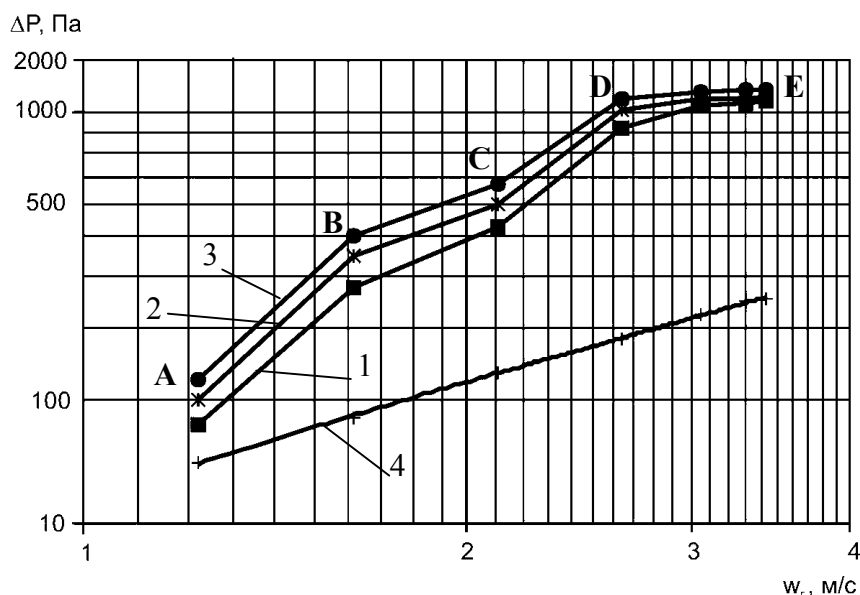


Рисунок 4.4 – Залежність гідравлічного опору від швидкості газу в апараті з тарілкою 0,15 м ( $\tau = 23,5\%$ ) при різних значеннях щільності зрошення  $L_3$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ : 1 – 12; 2 – 15; 3 – 20; 4 – суха тарілка

Аналіз графічних залежностей на рис. 4.4 дозволив отримати залежність гідравлічного опору від швидкості газу в апараті, результатом є рівняння

$$y = -31,16x^2 + 743,82x - 893,71. \quad (4.1)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (4.1) складає  $R^2=0,951$ .

Традиційний для пінних апаратів режим – барботажний (нерівномірний), зважаючи на розмір отвору, не спостерігається (рис. 4.4, 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. 4.4, АВ), інтенсивність провалу рідини зменшується.

II режим – пінний (рис. 4.4, ВС), на тарілці утворюється газорідина дисперсна система – піна. Пінний режим в апараті з провальною тарілкою великого отвору існує вузький діапазон за швидкості газу 1,6 - 2,1 м/с, тобто

практично відсутній. В даному режимі газорідинний шар має яскраво виражені поздовжні коливання з великою амплітудою. При цьому практично відсутнє бризковинесення.

III режим - інверсія фаз (рис. 4.4, CD), коли збільшення швидкості газу приводить до різкого росту гідравлічного опору, кількості утримуваної рідини, висоти газорідинного шару та, відповідно, поверхні контакту фаз. При цьому інтенсивність провалу рідини різко падає. За даного режиму газорідинний шар схильний до поздовжніх коливань із великою амплітудою і спостерігається інтенсивне бризковинесення. Межа існування даного режиму для ПТВО до швидкості газу в апараті 2,1 - 2,5 м/с.

IV режим – вторинного піноутворення (рис. 4.4, DE). Підвищення швидкості газу понад 2,5 м/с призводить до розвиненої вихрової взаємодії фаз. Газорідинна суміш виглядає як „бурхлива піна”, але одночасно спостерігається помітна стабілізація шару (зниження пульсацій). Також спостерігається рівномірний розподіл газовмісту шару й рідини по всьому поперечному перерізу апарата. При даному режимі досягається значна висота газорідинного шару і, як наслідок, розвинута поверхня контакту фаз та великий гідродинамічний ККД. Цей режим має стабільний і широкий діапазон по швидкості газу [58]. Варто зазначити, що чим вища щільність зрошення, тим стабільніше працює тарілка. Внаслідок такої однорідної структури й незначних поперечних коливань шару, а, отже, і локального градієнта статичного тиску рідини на тарілку (гідравлічний опір тарілки становить 1300 Па), відбувається одночасне витікання газу й рідини через отвір.

Проведена фото- та відеозйомка дозволяє візуально оцінити структуру газорідинного шару в залежності від швидкості газу при різних гідродинамічних режимах роботи апарата з ПТВО (рис.4.5).

Переваги режиму вторинного піноутворення чітко виявляються при порівнянні графічних залежностей гідравлічного опору (рис. 4.4), висоти шару в апараті (за результатами фото- та відеозйомки) та кількості утримуваної на тарілці рідини (рис. 4.6), від лінійної швидкості газу в колоні.

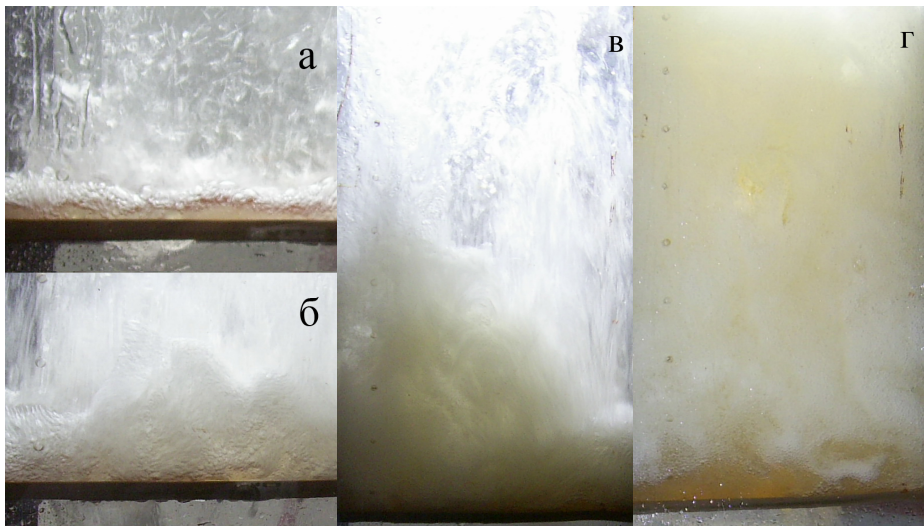


Рисунок 4.5 – Структура газорідинного шару апарата з тарілкою 0,15 м в різних гідродинамічних режимах: а – режим провалу рідини ( $w_2 = 1,0 - 1,2$  м/с); б – піний режим ( $w_2 = 1,6 - 2,1$  м/с); в – режим інверсії фаз ( $w_2 = 2,1 - 2,5$  м/с); в – режим вторинного піноутворення ( $w_2 = 2,5 - 3,5$  м/с)

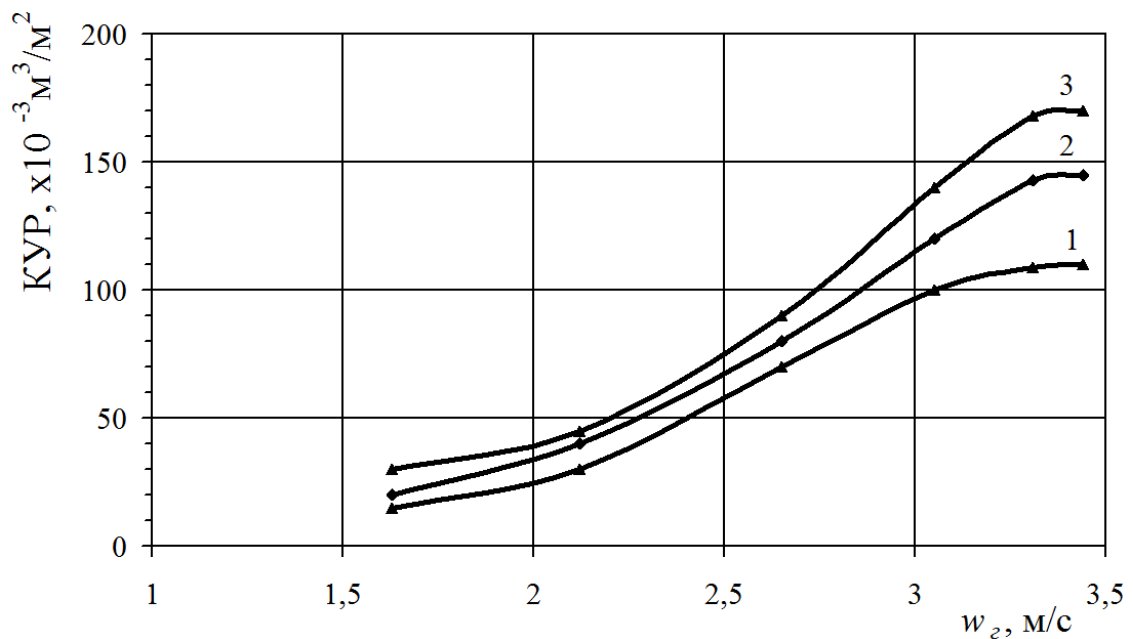


Рисунок 4.6 – Залежність кількості утримуваної рідини від швидкості газу в апараті з тарілкою 0,15 м ( $\tau=23,5\%$ ) при різних значеннях щільності зрошення  $L_3$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ : 1 – 12; 2 – 15; 3 – 20

З підвищенням  $w_2$  від 2,2 до 3,0 м/с висота газорідинного шару зростає в 4 рази (до 0,6 м), що дозволяє створити розвинену поверхню контакту фаз та значно підвищити ефективність пилоочищення у порівнянні з типовими тарілчастими

пінними апаратами. Час виходу на даний режим в усіх випадках з різною щільністю зрошення випадках становив не більше 3 хвилин.

При недостатній щільності зрошення та, відповідно, висоті шару рідини на полотні тарілки, можливе часткове або повне оголення полотна тарілки внаслідок коливань пінного шару. Це супроводжується провалом рідини та не дає апарату вийти на робочий режим. Як видно з рис. 4.6, підвищення швидкості газу в апараті призводить до підтримки стабільного об'єму рідини на полотні тарілки, що забезпечує ефективну роботу апарату.

Аналіз графічних залежностей на рис. 4.6 дозволив отримати залежність кількості утримуваної рідини від швидкості газу в апараті, результатом є рівняння

$$y = 12,26^2 + 8,23x - 27,49 \quad (4.2)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (4.2) складає  $R^2=0,98$ .

Узагальнені дані експериментальних досліджень гідродинаміки апарату наведені на рис. 4.7 – 4.9.

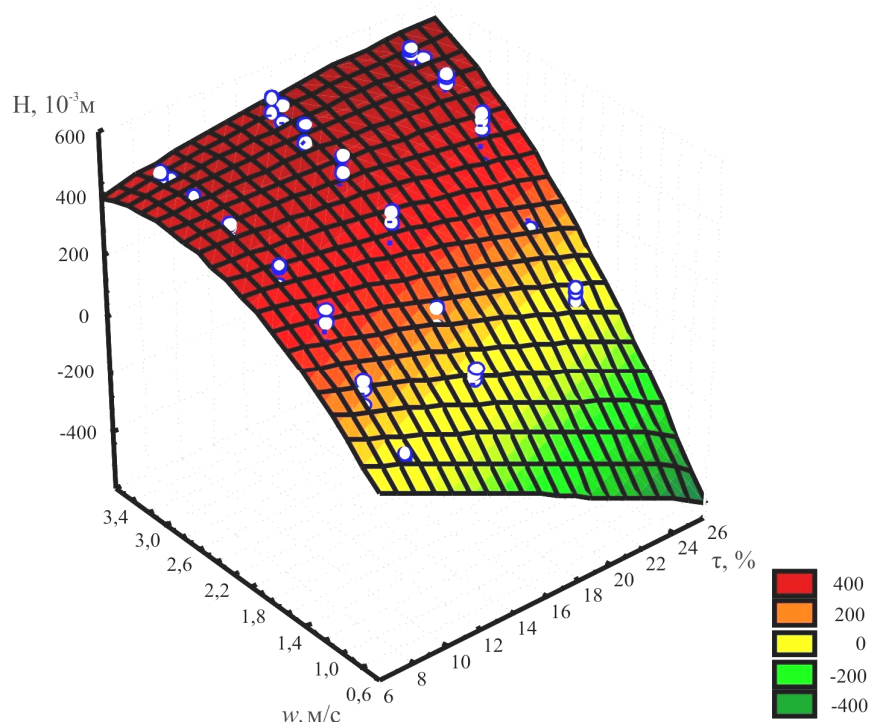


Рисунок 4.7 – Залежність висоти газорідинного шару від вільного перетину й швидкості газу в апараті



Аналізуючи рис 4.7, стверджуємо, що висота пінного шару залежить від швидкості газу в апараті. Для швидкості газу до 1,5 м/с пінний шар 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.

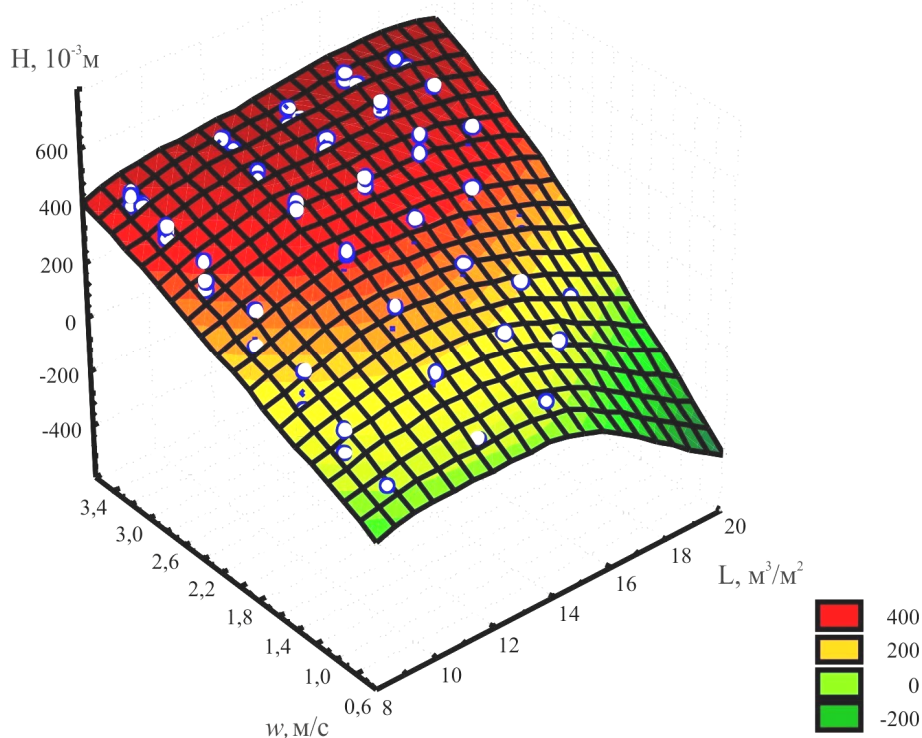


Рисунок 4.8 – Залежність висоти газорідинного шару від щільності зрошення й швидкості газу в апараті

Аналізуючи рис. 4.8 робимо висновок, що окрім швидкості газу, необхідною умовою створення високого пінного шару є достатня щільність зрошення рідиною полотна тарілки. Пінний шар в апараті з ПТВО може існувати і при незначній щільності зрошення ( $8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ) для швидкості газу понад 3 м/с, але його висота буде незначною (до 0,38 м) і ймовірність проскоку часток пилу під час пилоочищення зростає. Збільшення швидкості газу і щільності зрошення до  $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$  дозволяє досягти високого (до 0,6 м), стабільного пінного шару на полотні тарілки. В результаті експериментальних досліджень обираємо щільність зрошення, яка забезпечує максимально високий шар піни, вона складає діапазон  $15\text{-}20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ .

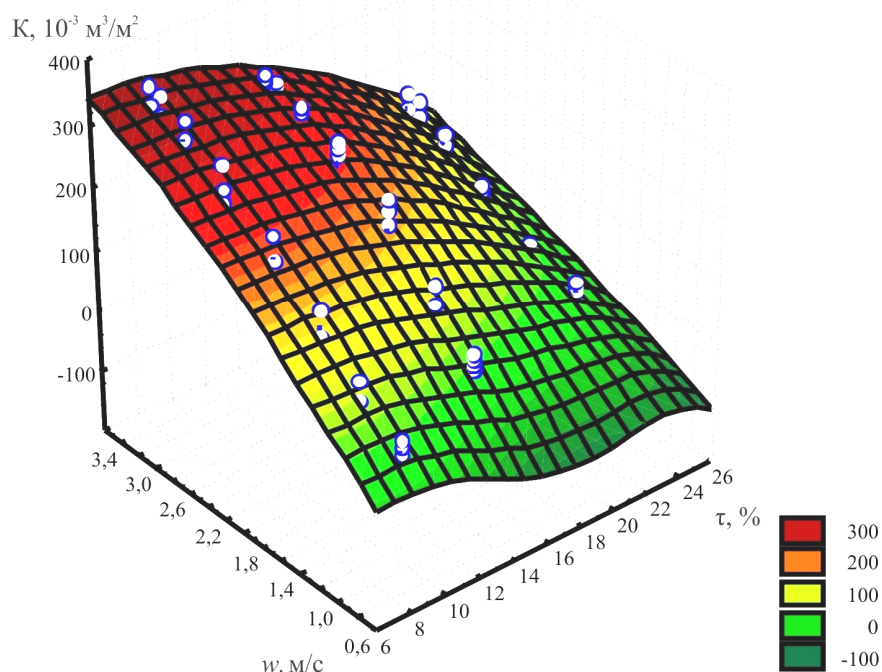


Рисунок 4.9 – Залежність кількості утримуваної рідини від вільного перетину й швидкості газу в апараті

Аналіз рис. 4.9 свідчить про те, що при великому вільному перетині полотна тарілки важко досягти високого значення КУР, необхідної для ефективної роботи пилоочисного апарату. Достатня величина КУР забезпечує рівномірність укриття тарілки шаром рідини, виключаючи оголення полотна тарілки внаслідок коливань пінного шару, і додатково збільшує ймовірність захвату частинок пилу рідиною. На тарілці з отворами 0,15 м, максимальне значення КУР може становити до  $180 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2$  при швидкості газу в апараті 3,5 м/с.

В результаті проведених досліджень гідродинаміки обираємо робочий режим апарату з ПТВО, який за швидкістю газу відповідає діапазону існування режиму вторинного піноутворення і становить 2,5 – 3,5 м/с. Необхідна щільність зрошення для досягнення високого шару піни в апараті складає діапазон  $15\text{-}20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ , адже у промислових умовах важко забезпечити одне стабільне значення даного показника.

### 4.3 Пиловловлення в апараті з ПТВО

Механізм очищення забруднених твердими домішками газів в провальних тарілках з розміром отвору 0,002-0,01 м, так і в тарілках з отворами розміром 0,15 м має велику подібність. Однак, частина «внеску», який вносить кожна стадія очищення газів, для апаратів зі звичайними отворами і з отворами великого діаметру, різна. В апаратах з ПТВО збільшення ступеню очищення відбувається за рахунок динамічної висоти газорідного шару [129 - 132].

Пиловловлення відбувається за рахунок інерційного і дифузійного механізмів пилоосадження.

Зростання ефективності пиловловлення, обумовленого інерційним механізмом пилосадження, з ростом швидкості газу пов'язане зі зростанням сил інерції, які виникають при контакті газопилового потоку з плівкою рідини на тарілці колони. Пил, захоплений газовим потоком, підходить до поверхні змоченої тарілки, потім у залежності від величини сил, що діють на частинку і визначаються фізико-хімічними властивостями частинки, спостерігається або адгезійне захоплення, або пружне відштовхування від плівки рідини. Якщо ж відбулося захоплення, то в результаті змочування частинки має місце третя стадія – проникнення в шар рідини.

Величина коефіцієнта захоплення при осажденні частинок на перешкоду (полотно тарілки) залежить від гідродинамічного режиму обтікання і критерію Стокса [59]

$$K_3 = f\left(\text{Re}, \text{Stk}, \frac{d_c}{d}\right). \quad (4.1)$$

Основна частина пилу, зважаючи на його дрібнодисперсність [12], вловлюється завдяки турбулентно-дифузійному механізму. При малих швидкостях газу перенос високодисперсних часток пилу на поверхню плівки рідини здійснюється дифузією. Виникнення тороїдального вихору та дрібних

пухирців і, відповідно, розвинутої поверхні контакту фаз під час розпаду пухиря на полотні тарілки, сприяє збільшенню пилоочищення за турбулентно-дифузійним механізмом.

Рівняння для опису дифузійного механізму осадження частинок у зоні розпаду тороїдального вихра має вигляд [129]

$$\frac{dz}{dt} = w_z \frac{dz}{dx} - K_V z, \quad (4.2)$$

де  $K_V = K_F a$  - коефіцієнт швидкості пиловловлення (аналог коефіцієнта масопередачі),  $\text{с}^{-1}$ ;

$a$  - питома поверхня осадження,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;

$x, z$  – вісі координат;

$t$  – час.

Збільшення швидкості газу призводить до зростання високотурбулізованого газорідинного шару на полотні тарілки, що відповідно супроводжується ростом інтенсивності турбулентної дифузії в робочій зоні апарату.

Для підтвердження ефективності використання апарату з ПТВО були проведені експериментальні дослідження на лабораторному стенді на базі лабораторії кафедри прикладної екології Сумського державного університету.

З метою збору даних для накопичення матеріалу для побудови регресійної математичної моделі процесу пиловловлення в апараті з ПТВО було проведено багатофакторний експеримент з врахуванням гідродинамічних (швидкість газу в апараті, щільність зрошення, гідравлічний опір, КУР) та конструктивних особливостей апарату (вільний перетин полотна тарілки) (Додаток Б).

Для забору проби запиленого повітря на виході з апарату необхідно було визначити швидкість виходу пилогазового потоку. Результати визначення параметрів газопилового потоку для відбору проб пилу на виході з апарату наведено в Додатку В. Результати проведеного дослідження ефективності

пиловловлення на тарілці з отворами 0,15 м відображено на рис. 4.10, 4.11 та Додатку Г.

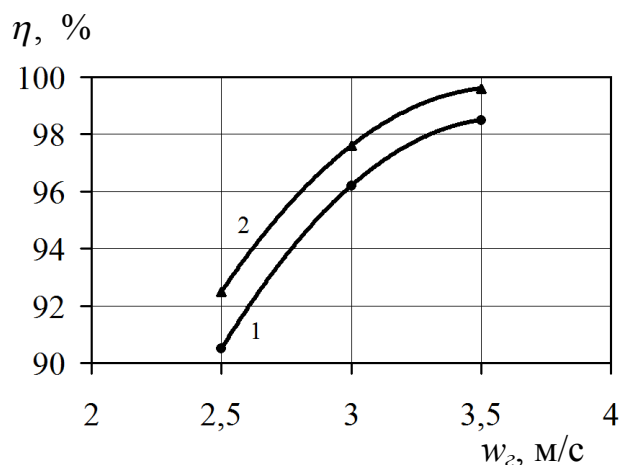


Рисунок 4.10 - Залежність ефективності пиловловлення в апараті з тарілкою 0,15 м ( $\tau = 23,5\%$ ) від швидкості газу при різних значеннях щільності зрошення  $L_3$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ : 1 – 15; 2 – 20

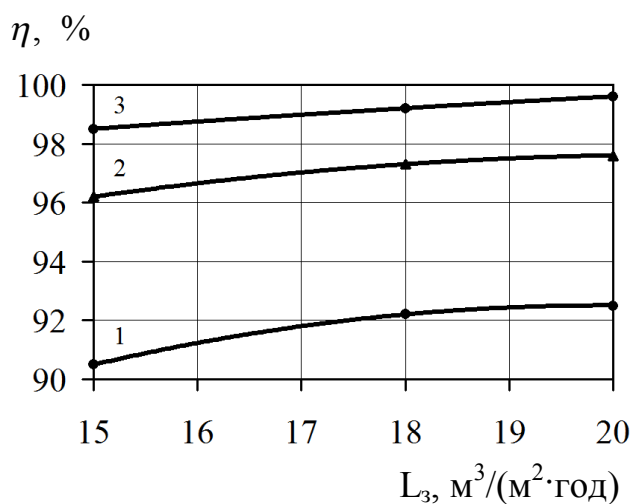


Рисунок 4.11 – Залежність ефективності пиловловлення від щільності зрошення в апараті з ПТВО: 1 –  $w_2 = 2,5$  м/с; 2 –  $w_2 = 3$  м/с; 3 –  $w_2 = 3,5$  м/с

Аналіз рис. 4.10 та 4.11 дозволяє стверджувати, що збільшення ефективності роботи апарата при щільностях зрошення понад  $15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ , обумовлено високим та стабільним сильнотурбулізованим шаром піни. Максимальна ефективність пиловловлення в досліджуваному апараті становить 99,6% при швидкостях газу 3,5 м/с та щільності зрошення 18 -  $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ .

#### **4.4 Регресійна модель розрахунку ефективності пилоочищення в апараті з провальними тарілками великих отворів**

При роботі апаратів із ПТВО на полотні тарілки виникають високі газорідні шари, що сприяє підвищенню ефективності пиловловлення. На висоту шару впливають наступні фактори - щільність зрошення рідини, швидкість газу в апараті й вільний перетин полотна тарілки. Велика кількість факторів, що впливають на висоту шару, приводить до необхідності математичного моделювання з метою вибору оптимальних конструктивних і режимних параметрів процесу.

Побудова детермінованої математичної моделі процесів, які приводять до виникнення газорідного шару, натикається на значні труднощі, що пов'язані з необхідністю обліку великої кількості різних факторів (основні з них - навантаження апарату по газовій і рідкій фазі, параметри контактного пристрою), але побудова такої моделі необхідна як для конструювання апарата, так і для розрахунків оптимальних режимів роботи, при яких досягається висока ефективність очищення газових викидів. Тому для розрахунків шуканих величин скористаємося спеціалізованими програмними продуктами такими як Mathcad 14.0, Statistica 6.0 та Advanced Grapher 2.2 [117-119].

При обробці експериментальних даних оперуємо випадковими величинами, які мають нормальний (Гаусівський) розподіл. При цьому різні випадкові величини, які розглядаються в експерименті, мають кінцеві дисперсії й дисперсії випадкових величин не є занадто великими в порівнянні один з одним, що дає право вважати слушною центральну граничну теорему математичної статистики.

Для того, щоб при побудові емпіричних залежностей з найбільшою ефективністю використовувати статистичні методи й коректно аналізувати отримані результати необхідно провести попередню обробку результатів вимірів і спостережень [121, 122]. Її зміст полягає у відсіванні грубих погрешностей і оцінці вірогідності результатів вимірів. Важливим моментом у попередній обробці даних є перевірка відповідності результатів вимірів нормальному закону розподілу.

Для проведення експериментів було відібрано 5 факторів (1 конструктивний та 4 режимних), що ймовірно впливають на якість процесу пилоочищення (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Фактори, що впливають на процес пилоочищення 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, $\tau$ , %	3	9	18	27
<i>Режимні фактори</i>					
$X_2$	Щільність зрошення полотна тарілки, $L_3$ , $m^3/(m^2 \cdot год)$	1	10	15	20
$X_3$	Швидкість газу в апараті, $w_2$ , $m/c$	0,1	0,5	2	3,5
$X_4$	Кількість утримуваної рідини в апараті під час його роботи, $K$ , $m^3/m^2$ .	5	0	85	170
$X_5$	Висота шару піни, $H$ , $m$	0,05	0	0,3	0,6

При плануванні експерименту до факторів висували наступні вимоги:

1. Фактори мають бути керованими;
2. Фактори мають безпосередньо впливати на об'єкт досліджень;
3. Всі комбінації факторів мають бути сумісними між собою;
4. Фактори мають бути незалежними.

Вибір рівнів варіювання факторів приймали у відповідності до літературних даних [88, 90] та виходячи з того, що розроблена модель апарату з ПТВО має ефективно здійснювати очистку газів від пилу, відповідати вимогам до створення

замкнених систем водообігу, максимально використовувати корисний об'єм апарату (з метою мінімізації виробничих площ, зайнятих під очисне обладнання), бути енергоощадною та економічно доцільною.

Пошук залежності між факторами проводимо з використанням методів і процедур регресійного аналізу [124]. При цьому відзначимо, що основне завдання полягає в тому, щоб за спостереженнями вхідних ( $L$ ,  $w_2$ ,  $\tau$ ) і вихідних ( $H$ ,  $K$ ) параметрів виконати:

- побудову регресійної моделі (рівняння регресії);
- побудувати довірчі інтервали для коефіцієнтів моделі;
- перевірити гіпотезу про значимість регресії;
- оцінити ступінь адекватності моделі.

Оскільки при проведенні експерименту в кожному конкретному досліді була можливість задавати будь-яке значення для факторів  $L_3$ ,  $w_2$  і  $\tau$ , 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 було неможливо.

Величини  $H$  и  $K$  є відгуками, тобто спостережуваними випадковими змінними, по припущенню залежних від контрольованих керованих факторів  $L_3$ ,  $w_2$  і  $\tau$ .

Таким чином, розділимо змінні на дві групи: незалежні, керовані змінні (предиктори) і залежні (відгуки) (рис. 4.12).

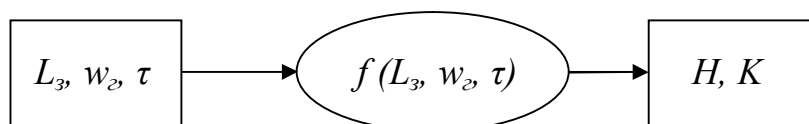


Рисунок 4.12 - Схема зв'язку незалежних і залежних змінних

У результаті натурального експерименту необхідно було знайти залежності між відгуками й предикторами – функцію відгуку. Оскільки рівні факторів у



кожному досліді задаються довільним чином, то мав місце активний експеримент, метою якого є визначення функції відгуку у вигляді [124]

$$M_y = f(x_i) + \varepsilon_{\delta}, \quad (4.3)$$

де  $M_y$  – математичне очікування відгуку;

$x_i$  – контрольовані, керовані фактори;

$\varepsilon_{\delta}$  – помилка експерименту, що враховує вплив неконтрольованих факторів.

Положення факторів ( $L_3$ ,  $w_2$ ,  $\tau$ ) і відгуків ( $H$ ,  $K$ ) при проведенні експерименту презентовано на рис. 4.13.

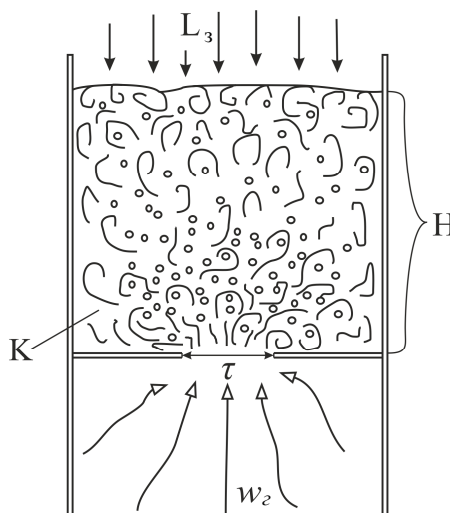


Рисунок 4.13 - Положення предикторів і відгуків при проведенні експерименту

Виходячи з того, що критерієм ефективності роботи газоочисного апарата є насамперед його пиловловлюючі характеристики, то досліджуємо залежність ступеня очищення від щільності зрошення й швидкості газу в перетині апарата ( $w_2$ ). Виходячи з отриманих експериментальних даних, установлюємо пропорційну залежність між ефективністю пилоочистки й щільністю зрошення, для різних швидкостей подачі газу при робочому режимі апарата.

Спираючись на експериментальні дані роботи газоочисного апарата (Додаток Б, Д), можна простежити залежність між ступенем очищення для кожного режиму роботи апарата й значенням висоти стовпа газорідинної суміші в процесі роботи. Чим більша висота шару піни в апараті для пізніх параметрів експерименту, тим вища ефективність очищення газу від пилу. При цьому, слід зазначити, що кількість утримуваної рідини  $K$  в процесі роботи, що встановився, апарата повинна бути оптимальною, виходячи із принципів ресурсозбереження.

Тому, подальше дослідження ефективності роботи пилоочисного апарата більшою мірою зв'язуємо з величиною висоти стовпа газорідинної суміші на тарілці, пошук функції відгуку для якої й будемо проводити.

Враховуючи той факт, що лінійна модель залежності змінних не відповідає досліджуваним процесам (діаграми розсіювання  $H(\tau, w_2)$ ,  $H(L_3, w_2)$  і  $K(\tau, w_2)$  також пояснюють нелінійність зв'язку (рисунки 4.7 – 4.9)), то пошук регресійної залежності будемо здійснювати з використанням припущення про поліноміальну залежність між відгуками й предикторами [122]. Крапки на побудованих поверхнях позначають значення шуканих величин отримані експериментальним шляхом.

Тому представимо гіпотетичну залежність між  $H$  и  $L, w_2, \tau$  у вигляді

$$H = f(L_3^2, \tau^2, w_2^2, L_3 \cdot \tau, L_3 \cdot w_2, \tau \cdot w_2, L_3, \tau, w_2) \quad (4.4)$$

Таким чином, будується нелінійна регресійна модель. Для її побудови виконуємо лінеаризуючі перетворення (табл. 4.3):

Таблиця 4.3 – Лінеаризуючі перетворення

$H$	$L_3^2$	$\tau^2$	$w_2^2$	$L_3 \cdot \tau$	$L_3 \cdot w_2$	$\tau \cdot w_2$	$L_3$	$\tau$	$w_2$
$H$	$L_k$	$\tau_k$	$w_k$	$L_\tau$	$L_w$	$\tau_w$	$L$	$\tau$	$w$

Після чого будується лінійна регресійна модель відносно вже нових перетворених змінних.

Якість побудованої регресії будемо вимірювати спираючись на значення коефіцієнта детермінації  $R^2$ , як ступеня відповідності регресійної моделі до фактичних даних [123].

Побудована модель нелінійної регресії має вигляд

$$H = -293,98 - 0,95L^2 + 33,07L - 76,19w^2 + 342,9w - 0,38\tau^2 - 25,72\tau + 2,21L \cdot w - 0,06L \cdot \tau + 12,24w \cdot \tau. \quad (4.5)$$

Коефіцієнт детермінації  $R^2=0,965$ . Регресія побудована для рівня значимості  $\alpha=0,95$ . Стандартні помилки коефіцієнтів регресії і їх рівень значимості показано в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Стандартні помилки коефіцієнтів регресії і їх рівень значимості

Змінна	Стандартна помилка	Рівень значимості
L	15,46	0,0366
$\tau$	6,09	0,0001
w	40,46	0,0000
$L_k$	0,65	0,1517
$w_k$	8,42	0,0000
$\tau_k$	0,17	0,0269
$L_w$	1,88	0,2441
$L_\tau$	0,28	0,8406
$w_\tau$	1,02	0,0000

Так як, виділений рівень значимості для коефіцієнтів регресії становить  $p=0,05$ , то ті предиктори, для яких їх рівень значимості перевищує виділений, є

незначущими. Такими є предиктори  $L_k$ ,  $L_w$ ,  $L_\tau$ . Тому їх можна виключити з розгляду й будувати регресію тільки для тих змінних, які є значимими, для забезпечення оптимальної аналітичної залежності маємо нову регресію для розрахунку висоти шару піни на ПТВО [13]

$$H = -189,72 + 13,54L - 0,399\tau^2 - 27,37\tau - 76,22w^2 + 365,53w + 12,61w \cdot \tau. \quad (4.6)$$

У даній регресії всі коефіцієнти є значимими.

Підсумкові статистики регресійного аналізу: коефіцієнт детермінації  $R^2=0,962$  означає, що побудована регресія високо значима [117].

Про те, що регресія високо значима, говорить значення критерію Фішера  $F=263,82$  при рівні значимості  $p<0,0000$ .

Рівень значимості для коефіцієнтів моделі при відповідних змінних наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Рівень значимості коефіцієнтів моделі

Змінна	Рівень значимості	Змінна	Рівень значимості
$L_3$	0,0000	$w_k$	0,0000
$\tau$	0,0001	$\tau_k$	0,0186
$w_2$	0,0000	$w_\tau$	0,0000

Усі коефіцієнти значимі, для кожного з них рівень значимості  $p<0,05$ .

Важливим елементом є оцінка адекватності моделі. Аналіз адекватності ґрунтується на аналізі залишків. Для цього скористаємося візуальним методом [115] (рис. 4.14).

З рис. 4.14 видно, що залишки хаотично розкидані на площині й у їхній поведінці закономірності немає. Немає підстави говорити, що залишки корельовано між собою, отже, можна зробити висновок, що регресійна модель досить адекватно описує дані.

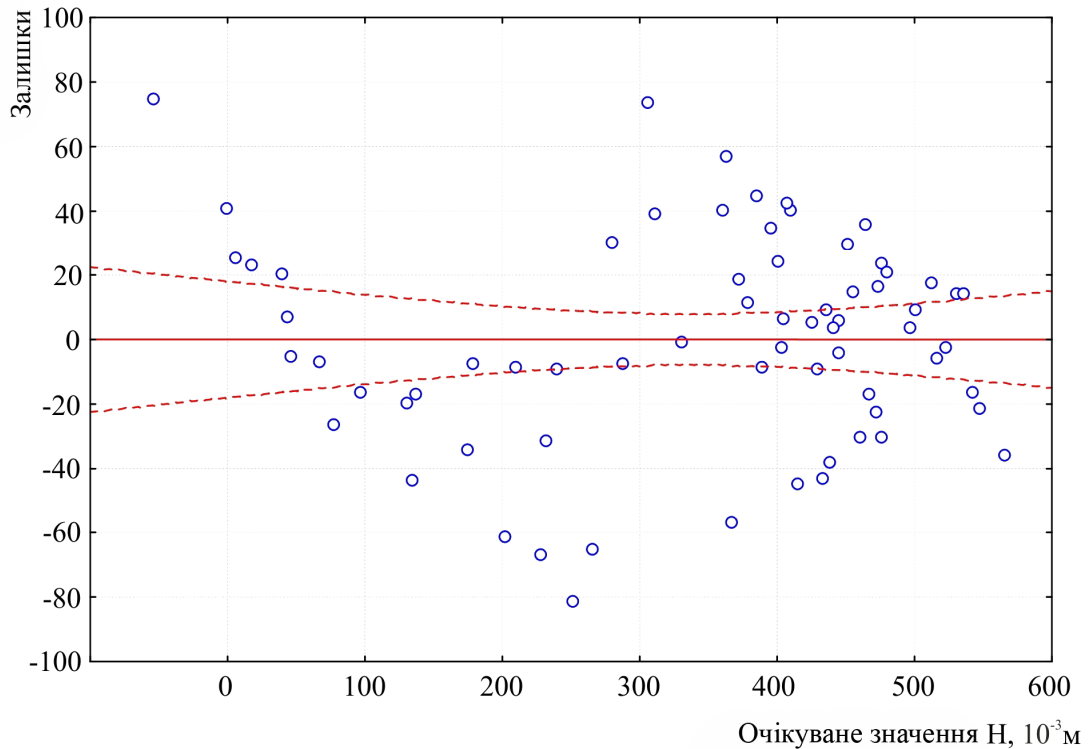


Рисунок 4.14 – Графік розподілу залишків

Подальше математичне моделювання проводимо за результатами експериментальних досліджень, що враховують залежність ефективності пиловловлення в апараті від гідродинаміки апарату [133].

Результати залежності ефективності пиловловлення від швидкості газу та щільності зрошення в апараті з ПТВО в робочому режимі наведено на рис. 4.15 та рис. 4.16.

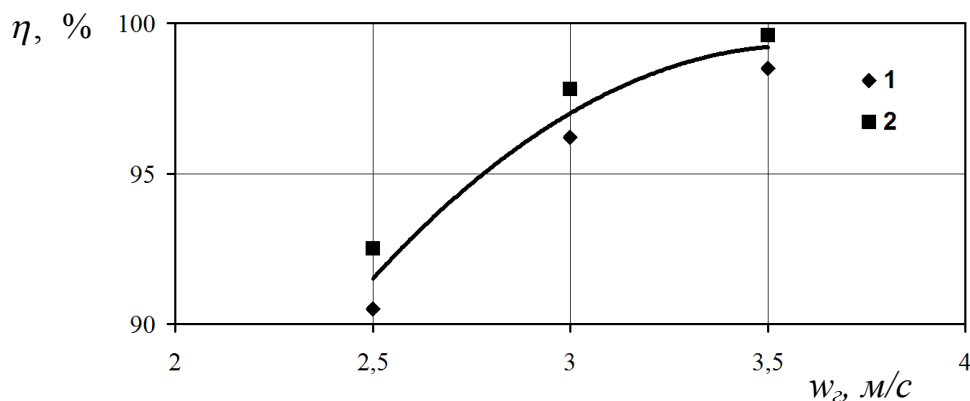


Рисунок 4.15 – Залежність ефективності пиловловлення від швидкості газу в апараті з ПТВО: 1 –  $L_3 = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ГОД})$ ; 2 –  $L_3 = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ГОД})$

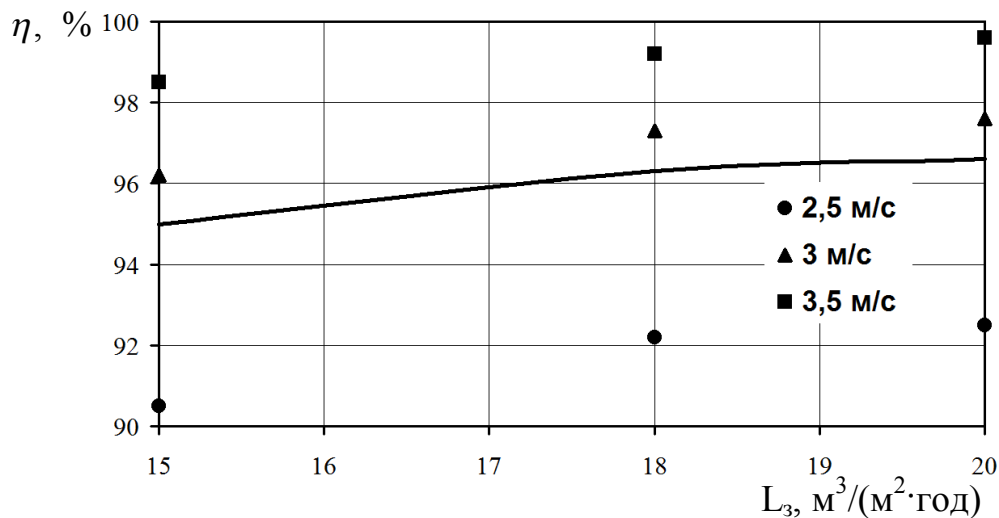


Рисунок 4.16 – Залежність ефективності піловловлення від щільності зрошення в апараті з ПТВО: 1 –  $w_2 = 2,5$  м/с; 2 –  $w_2 = 3$  м/с; 3 –  $w_2 = 3,5$  м/с

В процесі аналізу побудованих графічних залежностей (рис. 4.15, 4.16) щодо ефективності піловловлення (лінії – теоретичний розрахунок, крапки – експериментальні дані) в програмному продукті Advanced Grapher 2.2 було отримано наступне рівняння регресії для розрахунку ефективності піловловлення, %, в залежності від швидкості газу та щільності зрошення в апараті  $15 - 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$  для робочого діапазону швидкостей апарату (тарілки з отворами 0,15 м):

$$\eta = -6,5w_2^2 + 48,8w_2 + 14,5; \quad (4.7)$$

Отримане рівняння (4.7) має коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,94$ . При цьому максимальне значення стандартних відхилень рівнянь регресії від експериментальних даних становить менше 6%.

## Висновки

1. Вдосконалено фізичну модель пилоочищення в апараті з ПТВО.
2. Досліджено основні гідродинамічні характеристики апарату з ПТВО.

3. Отримано регресійні рівняння для розрахунку залежності гідравлічного опору та кількості утримуваної рідини від швидкості газу в апараті.

4. Встановлено робочий режим апарату з ПТВО – режим вторинного піноутворення, який відповідає інтервалу швидкості по газу 2 – 3,5 м/с. Робочий інтервал щільності зрошення складає 15 – 20 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год). За наявності даного режиму роботи маємо шар газорідинної суміші висотою до 0,6 м [10].

5. Експериментальні дослідження пиловловлення показали, що апарат має високу ефективність очищення (до 99,6%), низьку енергомісткість і стабільну роботоздатність за умов тривалої експлуатації [11].

6. Отримано рівняння регресії для розрахунку ефективності пилоочищення та висоти газорідинного шару в апараті з ПТВО [13].

## РОЗДІЛ 5

### ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТУ

У відповідності з планом науково-дослідних робіт кафедри Прикладної екології Сумського державного університету для проведення досліджень у промислових умовах був розроблений пилогазоочисний апарат для мокрого очищення газу. Дослідження ефективності пилоочищення проводилось на реальних пилогазових сумішах, які містили пил двоокису титану та ільменіту. Розроблені рекомендації по модернізації існуючої системи пилоочищення цеху виробництва пігментного двоокису титану та схожих виробництв.

В існуючих виробництвах передбачена очистка викидів в атмосферу твердих і газоподібних компонентів в газоочисному обладнанні, що наведено в табл. 5.1. Відповідно до [20] гранично-допустимі значення в повітрі робочої зони становлять  $10 \text{ мг/м}^3$  для пилу ільменіту та двоокису титану. Санітарно захисна зона підприємства, як виробництва I класу небезпеки, становить 1000 м. За межею СЗЗ розміщені адміністративні об'єкти та селитебна зона м.Суми, де концентрація в атмосферному повітрі пилу двоокису титану та ільменіту повинна складати менше  $0,5 \text{ мг/м}^3$ . В існуючій схемі виробництва двоокису титану застосовуються апарати як сухого, так і мокрого пилоочищення.

В 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. Сумарна ефективність пилоочищення даної комбінації очисного обладнання не перевищує 92%, що зумовлено як дисперсним складом так і фізико-хімічними властивостями пилу ільменіту. При цьому концентрація пилу повинна становити менш ніж  $1 \text{ г/м}^3$  (гранично допустимий викид), відповідно 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



Таблиця 5.1 – Параметри газоочисного обладнання цеху двоокису титану

Стадія виробництва	Найменування джерела утворення ЗР	Найменування ГОУ	Найменування ЗР	Параметри ГПП на вході у ГОУ				Ступінь очищення, %
				Об'ємна витрата, м <sup>3</sup> /с	t, °C	Масова концентрація ЗР, 10 <sup>-3</sup> г/м <sup>3</sup>	Масова витрата ЗР, 10 <sup>-3</sup> кг/с	
Прокалка	Прожарювальна піч	Вод.скруббер	SO <sub>2</sub>	2,5	375	14,68	36,7	78
		Вентури,	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,5	375	1,2	3	78
		аміач.скруббер	Тв.частки	2,5	375	2,5	6,25	92
Розмол ільменіту	Кульовий млин	Циклон	Тв.частки	1,25	80	38,16	47,7	72
		Рук.фільтр		1,36	70	9,98	13,57	84
Сушка ільменіту	Сушильна піч	Скрubber	Тв.частки	1,6	100	32,4	51,84	79
		Рук.фільтр	Тв.частки	0,39	30	10,1	3,94	95

менше  $1 \text{ г/м}^3$ . Загальна ефективність очистки газу від пилу становить не вище 84% та додатково з'являється джерело вторинного пилоутворення у якості апаратів сухого пилоочищення, що негативно відбивається на рівні екологічної безпеки підприємства.

В процесі прокалки гідратованого двоокису титану в прожарювальних печах газу, що утворюються в результаті згорання природного газу, випаровування води і розкладення сульфатів, з температурою  $375 - 400 \text{ }^\circ\text{C}$ , потрапляють у газоочисну установку. Газоочисна установка (мокрого типу) складається із сатуратора, скрубера Вентурі, аміачного скрубера та димових насосів. Разом з газовими викидами втрачається і пил двоокису титану, що розсіюється в повітрі. Сумарна ефективність обраної схеми пилоочищення не перевищує 92%, що зумовлено дрібнодисперсним складом пилу двоокису титану та високими адгезійними властивостями. В процесі пилоочищення пил налипає на стінках порожнистого скрубера, а також даний процес характеризується великою витратою зрошувальної рідини, що у свою чергу негативно характеризує дане обладнання через високу ресурсоємність та велику кількістю утворюваного шламу.

Під час розмелу двоокису титану на роликово-маятниковому млину повітря з домішками двоокису титану очищується в рукавному фільтрі і з масовою концентрацією не більше ніж  $0,6 \text{ г/м}^3$  викидається в атмосферу. Ефективність очистки газу від пилу складає близько 95% та додатково з'являється джерело вторинного пилоутворення

Отже, основними компонентами газів, що забруднюють повітря при одержанні пігменту є пил ільменіту і власне двоокису титану та сірчисті гази. Це призводить до забруднення атмосферного повітря робочих місць, промислових площадок і прилягаючих до підприємства територій, що, у свою чергу, спричиняє нанесенню шкоди здоров'ю людини й навколишньому середовищу, а також приводить до втрати сировини та цільового продукту.

Існуюча система очищення газів, які відходять на стадії сушіння та розмелу ільменіту цеху двоокису титану передбачає очищення від пилу ільменіту

(табл. 5.2) в скруберах, циклоні Ц-15 та рукавних фільтрах. При цьому виникають значні втрати сировини.

Таблиця 5.2 - Характеристика пилогазових викидів виробництва двоокису титану [12]

Стадія виробництва	Кількість газу, що надходить у пилоочисну систему, тис. м <sup>3</sup> /год	Вміст пилу, г/м <sup>3</sup>
Сушіння ільменіту	11,5	32,4
Розмел ільменіту	18,9	20,5 – 40,2
Прожарювальна піч	18,4	2,3 – 2,4
Розмел TiO <sub>2</sub>	4,9	8,5 – 12,8

Пил двоокису титану утворюється на стадії прожарювання гідратованого двоокису титану та на стадії розмелу кінцевого продукту. Дані інвентаризації свідчать про те, що немає перевищень ГДК по пилу двоокису титану, однак зважаючи на фіброгенні властивості даного пилу, ми не можемо не враховувати його небезпечну дію, а також дозволити забруднювати навколишнє середовище додатковим поллютантом.

### 5.1 Опис дослідно-промислової установки

Нами був запропонований метод очищення газів, які відходять на вищеперелічених стадіях виробництва двоокису титану від пилу в пилоочисному апараті мокрого типу (рис. 5.1).

Досліджуваний апарат виконаний діаметром 2,4 м, висотою 5,0 м і містить дві провальні тарілки з отворами 0,15 м і вільним перетином 21,5%. Продуктивність апарата – 15 тис. м<sup>3</sup>/год.

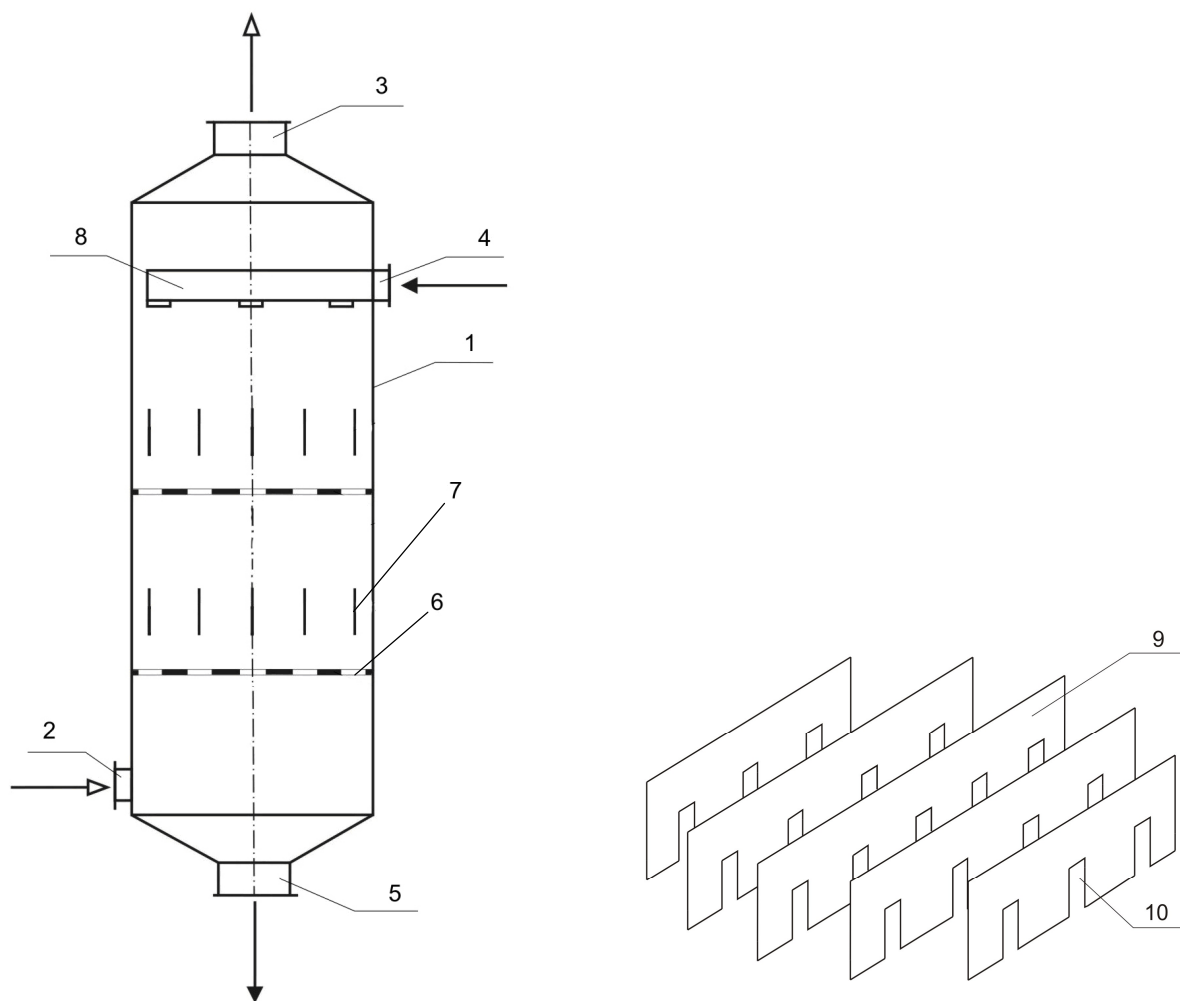


Рисунок 5.1 – Промислова установка з ПТВО:

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.

В середину корпусу 1 через вхідний патрубок 2 подається забруднений домішками газ. Одночасно у верхній частині апарата через зрошувальний пристрій 8 подають рідину. Під час проходженні газу через отвори тарілки 6, газ входить в контакт з рідиною, що супроводжується утворенням пухиря, який одразу ж розпадається на вихрові газорідинні потоки та призводить до турбулізації потоків і розвитку великої площі контакту фаз, де і відбувається

очищення газу від домішок. При цьому в апараті утворюється високо інтенсивний, турбулізований пінний шар. Додатково при розпаді пухиря на полотно тарілки передаються коливальні пульсації пінного шару, що виключає заростання отворів контактної пристрою. Очищений газ виводиться із апарату через патрубок 3, а рідина видаляється з апарату через патрубок 5.

Основне призначення стабілізатора 7, розташованого в пінному шарі – запобігти появі повздовжніх коливань газорідинного шару при високих лінійних значеннях швидкості газу у повному перерізі апарата [134]. Завдяки розміщенню стабілізатора в зоні пульсацій газорідинного шару, в апараті створюється рівномірно розташована по всій висоті високорозвинена поверхня контакту газової і рідинної фаз. У той же час спостерігається рівномірний розподіл локального газомісту шару і рідини по всьому поперечному перерізу колони (включаючи простір поблизу стінок і тарілки).

## **5.2 Результати дослідно-промислових досліджень**

Проведені експериментальні дослідження гідродинаміки та пиловловлення на лабораторному стенді дозволили визначити робочий режим апарату – режим вторинного піноутворення. Тому дослідження гідродинаміки апарату проводили за двох значень щільності зрошення 15 та 20 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> та швидкості газу 2,5 – 3,5 м/с, що були визначені як оптимальні умови для даного режиму роботи апарату.

Результати дослідження ефективності пиловловлення наведені в табл. 5.3 та на рис. 5.2 (Додаток Д).

Згідно рис. 5.2 за результатами промислових досліджень ефективність очистки газу від пилу двоокису титану становить 99,2 %, що відповідає попереднім дослідженням на лабораторному стенді Сумського державного університету. Очистка газу від пилу двоокису титану має більшу ефективність в порівнянні з пилом ільменіту, незважаючи на те, що пил двоокису титану є більш дрібнодисперсним ніж пил ільменіту. Це можна пояснити утворенням високого

шару піни в якому краще реалізується турбулентно-дифузійний механізм осадження дрібнодисперсних часток.

Таблиця 5.3 – 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 $\text{TiO}_2$ , $L = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	80	89	94,5	96
Пил $\text{TiO}_2$ , $L = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	83	93	98	99,2
Ільменіт, $L = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	85	92	96	98
Ільменіт, $L = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	88	94	98,5	99,5

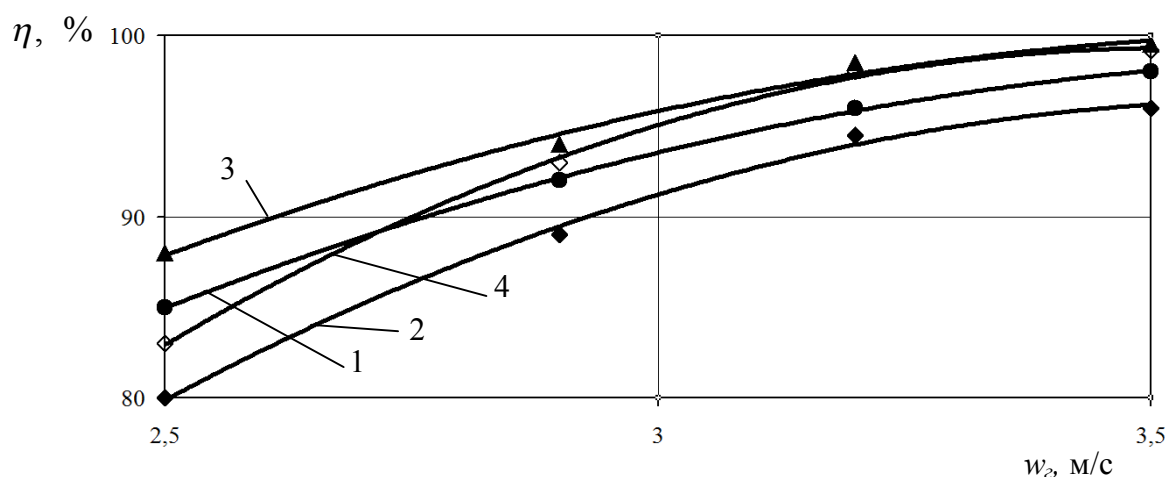


Рисунок 5.2 – Залежність ефективності пиловловлення від гідродинаміки апарату з ПТВО: 1 – пил ільменіту при  $L = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ; 3 - пил ільменіту при  $L = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ; 2 - пил титану при  $L = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ; 4 - пил титану при  $L = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ .

З метою підвищення ступеня очистки газів від пилу та підвищенні ресурсозбереження, а, отже і рівня екологічної безпеки підприємства, розроблений апарат пропонується включити в технологічну схему на перелічених стадіях виробництва двоокису титану замість існуючого пилоочисного обладнання (рис. 5.3 – 5.5).

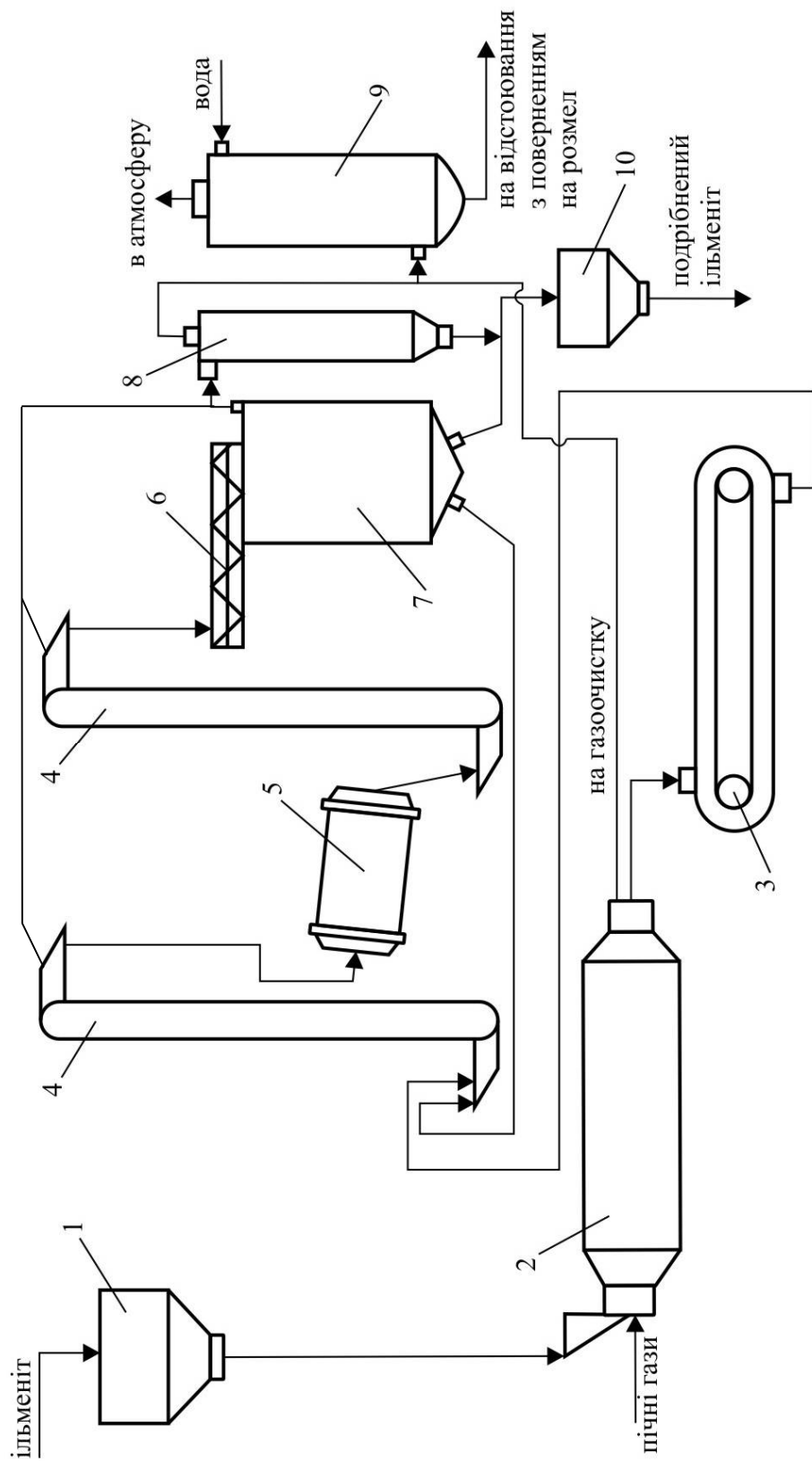


Рисунок 5.3 - Запропонована схема очищення газів на стадії сушки ільменітового концентрату:

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.

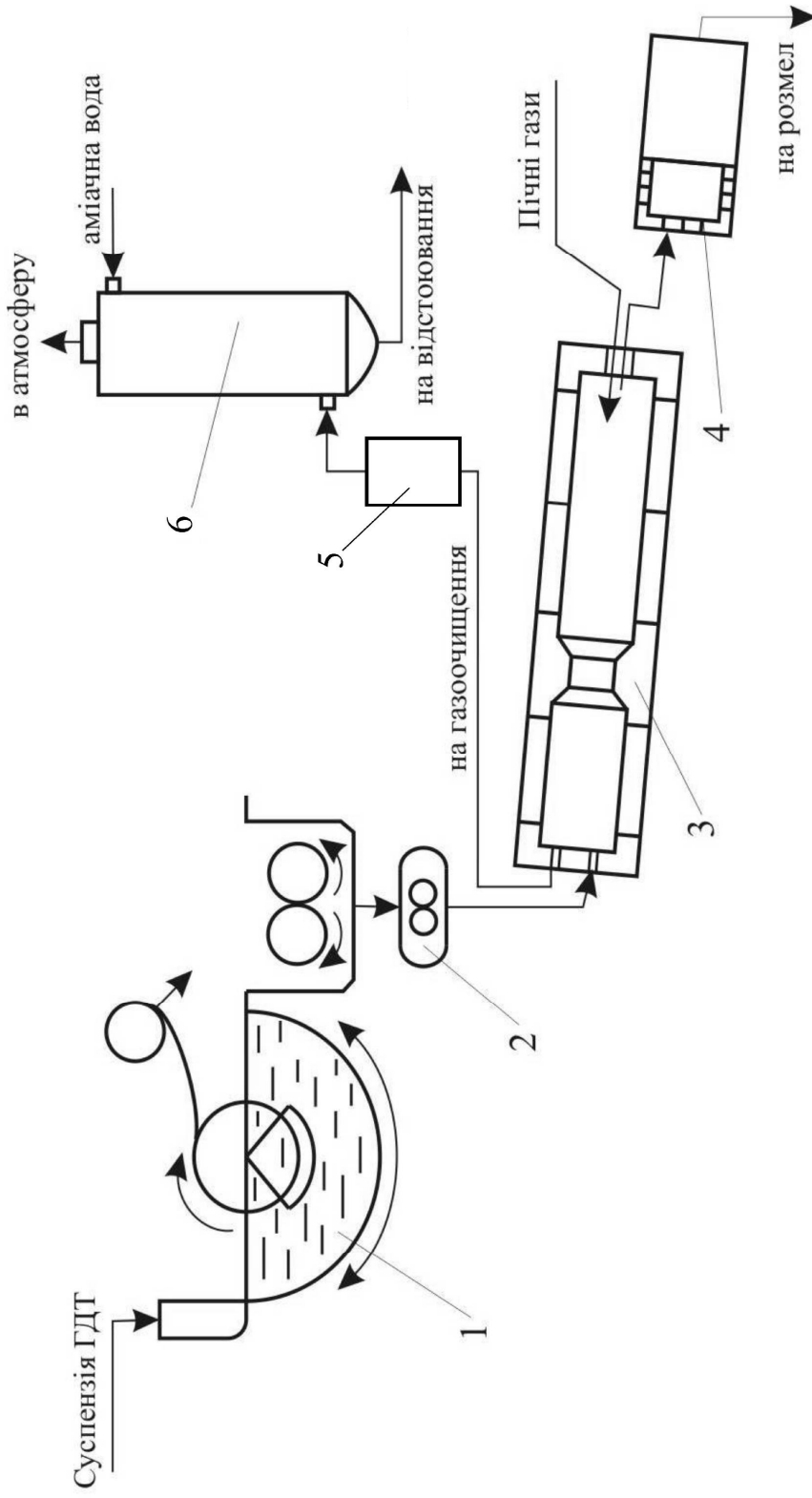


Рисунок 5.4 - Запропонована схема очищення газів на стадії фільтрації і прокалки двоокису титану: 1 – барабанний вакуум-фільтр (можна і прес-фільтр); 2 – шестеренчастий насос; 3 – прожарювальна піч; 4 – холодильний барабан; 5 – пилова камера; 6 – апарат з ПТВО.



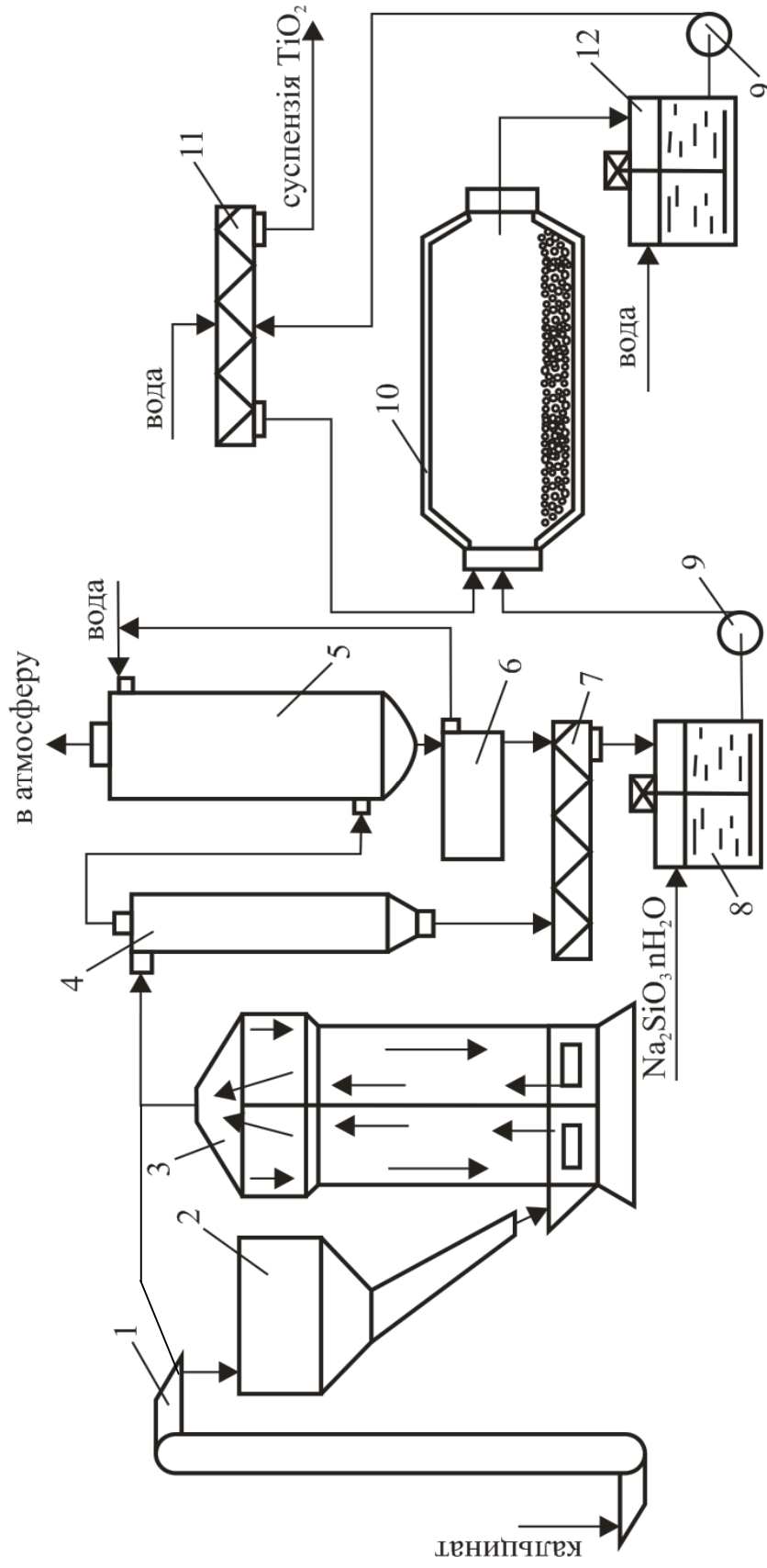


Рисунок 5.5 - Запропонована схема очищення газів на стадії сухого і мокрого розмелу двоокису титану:  
 1 – елеватор; 2 – бункер-накопичувач; 3 – млин Раймонда; 4 – циклон; 5 – апарат з ПТВО; 6 – відстійник;  
 7 – шнек; 8 – репульатор; 9 – насос; 10 – млин мокрого розмелу; 11 – відстійна центрифуга; 12 – збірна ємність

Висока стабільність роботи внаслідок стійкості обладнання до забивання частками пилу з високими адгезійними властивостями дозволяє використовувати частково у якості зрошувальної рідини відстоюний шлам процесу пилоочищення. Так, у випадку стадії сушіння та розмелу, вловлений пил ільменіту після відстоювання можна буде знову включити в технологічну схему перемішавши з вихідною сировиною. Щодо стадії прожарювання та розмелу двоокису титану, то після відстоювання частки продукту можна буде повернути на стадію «білої» фільтрації.

### **5.3 Заходи по утилізації шламу пилоочищення**

Одним із напрямків сталого розвитку суспільства та зниження рівня екологічної безпеки є раціональне використання сировини з мінімальним утворенням відходів виробництва.

Актуальність підвищення ресурсоефективності є загально визнаною як з боку органів державної влади, так і підприємств та організацій, а також громадськості. Вона диктується високим рівнем ресурсо- та енергоємності продукції національного виробництва, нагромадженням екологічних проблем, обумовлених неефективним природокористуванням. Водночас, незважаючи на актуальність ресурсозберігаючих заходів, їх реалізація відбувається вкрай повільно. Причин того багато, накладаючись одна на одну, вони спричиняють суттєве гальмування ресурсозберігаючих екоорієнтованих процесів.

Специфікою роботи апаратів мокрого пиловловлення є утворення великої кількості шламу в процесі експлуатації. Часто шлам потрапляє до шламонакопичувачів і практично не використовується на виробництвах. У вигляді шламу підприємства втрачають як частинки сировини так і готову продукцію, що не відповідає сучасним вимогам ресурсозбереження.

З метою підвищення ресурсозбереження та зменшення втрат готового продукту на базі ДНДІ «МІНДІП» було проведено дослідження з пошуку шляхів повернення в процес продукту з шламонакопичувача [12].

Для цього з ЦДТ №2 була відібрана пульпа із збірника-репульпатора (продукту із шламонакопичувача).

Концентрація пульпи становила 324 г/л  $\text{TiO}_2$ .

Пульпу відфільтрували, висушили при температурі  $105^\circ\text{C}$ . В отриманому продукті визначили:

Вміст  $\text{SiO}_2$  – 0,16%.

Водневий показник (рН) – 2,8.

Масляне число – 56 мл/100 г пігменту.

Насипна маса – 290 кг/м<sup>3</sup>.

Білизна – 93,0 ум.од.

Жовтизна (b) – 4,4 ум.од.

Вміст рутильної форми – 22,7%.

Зважаючи на значення рН можна зробити висновок, що продукт дослідження не пройшов прожарювання, і тому має велику кількість іонів  $\text{SO}_3^{2-}$ . Видалення іонів  $\text{SO}_3^{2-}$  відбувається при температурі  $500\text{-}600^\circ\text{C}$ . Тому було прийнято рішення про прожарювання даного продукту.

Висушений продукт прожарювали при температурі  $920^\circ\text{C}$  протягом 40 хвилин. В прожареному продукті визначили:

Вміст  $\text{TiO}_2$  – 97,6%.

Вміст  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,43%.

Білизна – 81,8 ум.од.

Жовтизна (b) – 15,5 ум.од.

Вміст рутильної форми – 99,7%.

Втрати під час прожарювання – 16,0%.

Таким чином, в досліджуваному продукті міститься багато домішок заліза, що істотно знизило білизну.

Наступним етапом пошукової роботи було дослідження можливості використання продукту із пилової камери в якості рутильних зародків. Для цього в лабораторних умовах було проведено солеобробку, фільтрацію і прожарювання

пасти п'ятої стадії при температурі 920°C протягом 40 хвилин. Було поставлено 2 досліді:

- контрольний за цеховою технологією,
- дослідний з введенням досліджуваного продукту в кількості 20% замість рутильних зародків.

Результати досліджень показали, що в контрольній пробі вміст рутильної форми складає 95,2%, а в дослідній – 30,5%, що говорить про неможливість використання продукту із пилової камери в якості рутильних зародків.

Оскільки в досліджуваному продукті міститься ~ 77,3% анатазу, було прийнято рішення про вивчення можливості введення пилу замість зародків анатазу на стадії гідролізу. Однак вихід на гідролізі при цьому склав всього 26%. Можна зробити висновок про неможливість використання продукту з пилової камери замість зародків анатазу.

За існуючою технологією репульпований продукт із пилової камери подається на четверту сталію «білої фільтрації». Внесення в суспензію метатинанової кислоти продукту з вмістом заліза на рівні 0,4% небажано, оскільки це призводить до зниження показника «білизна».

Таким чином внаслідок проведеної пошукової роботи можна рекомендувати проводити повернення продукту із пилової камери на другу стадію «білої фільтрації», для того щоб видалити залізо на стадії відбілювання. Проведена пошукова робота дозволяє зменшити втрати двоокису титану, як продукту виробництва, та зменшити об'єм шламу пиловловлення, раціонально повернувши його на потрібну стадію технологічного процесу. Впровадження запропонованих заходів дозволить підвищити рівень екологічної безпеки підприємства на шляху зменшення відходів виробництва.

#### **5.4 Рекомендації з експлуатації розробленого апарату**

Для апарату з провальними тарілками великих отворів нижня межа усталеної роботи відповідає швидкості газу, при якій на тарілці виникає

динамічно стійкий газорідинний шар. Однак для проектування і розрахунку апарату з ПТВО необхідним є визначення нижньої межі режиму вторинного піноутворення, виникнення якого характерно для великодірчастих провальних тарілок.

Нижню межу швидкості газу, при якій настає режим вторинного піноутворення необхідно визначати по залежності [60]

$$\frac{w_{кр}^2}{S_0 g d_0} \cdot \frac{f_z}{\rho_z} = B \cdot \exp \left[ -4 \left( \frac{L}{G} \right)^{0,25} \left( \frac{\rho_z}{\rho_p} \right)^{0,125} \right], \quad (5.1)$$

де  $w_{кр}$  - критична швидкість газу, яка відповідає виникненню режиму вторинного піноутворення, м/с;

$B$  - коефіцієнт, який залежить від діаметра отворів тарілки (для  $d_0=0,15$  м  $B = 0,635$ ).

Під час виходу на робочий режим у апараті з ПТВО також можуть спостерігатися коливальні явища. При витіканні рідини з отворів може спостерігатися виникненням гідравлічної нестійкості в шарі, що сприяє посиленню коливань. Крім того, у 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 приводить 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 – встановленні стабілізатора.

Верхня межа роботи апарату з ПТВО визначається виникненням надмірного бризковинусу і може бути визначена по залежності [102].

$$d_{кр} = \frac{3}{4} \xi_{\kappa} \frac{w_{\kappa}^2 \rho_z}{(\rho_p - \rho_z)g}, \quad (5.2)$$

де  $d_{кр}$  - діаметр витання краплі;

$\xi_{\kappa}$  - коефіцієнт опору рухомої краплі в потоці газу, розраховується за виразом [135, 136], який враховує форму, розмір частки і фізичні параметри системи

$$\xi_{\kappa} = \frac{13\Phi^2}{Re_{\kappa}^{0.5}}. \quad (5.3)$$

Проведений аналіз і експериментальні дослідження гідродинаміки показали, що верхня межа роботи апарату з ПТВО в залежності від конструктивних особливостей і режимних параметрів складає 3,5 – 4 м/с.

Таким чином, робочий діапазон навантажень за газом в апараті з ПТВО відповідає швидкості газу 2,5 – 3,5 м/с.

## **5.5 Прогнозна оцінка стану екологічної безпеки регіону від пилових викидів**

Прикладом програмного продукту, який згідно методики ОНД-86 розраховує концентрації забруднюючих речовин на відстані від джерела забруднень є спеціалізована програма «ЕОЛ 2000» (версія 4.0) [137].

Проведені випробовування апарату з ПТВО напилу ільменіту та двоокису титану підтвердили високу ефективність пилоочищення. З метою прогнозування оцінки стану екологічної безпеки регіону проведено аналіз розсіювання пилу ільменіту та двоокису титану до і після можливої заміни пилоочисного апарату (частки ГДК для населених місць) та наведено порівняльні карти розсіювання на рис. 5.7 – 5.10.

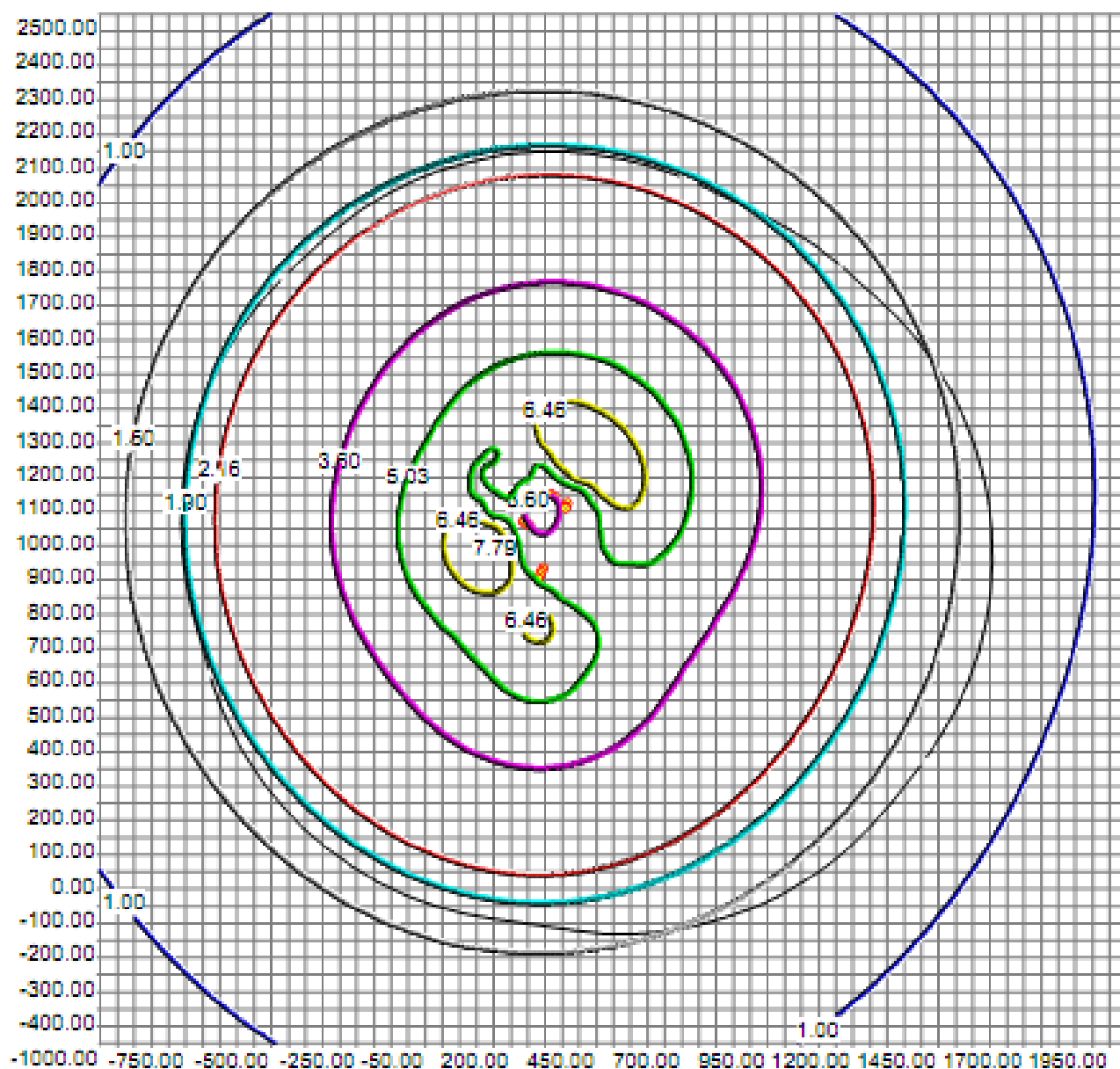


Рисунок 5.7 - Карта розсіювання пилу ільменіту за існуючої системи пиловловлення

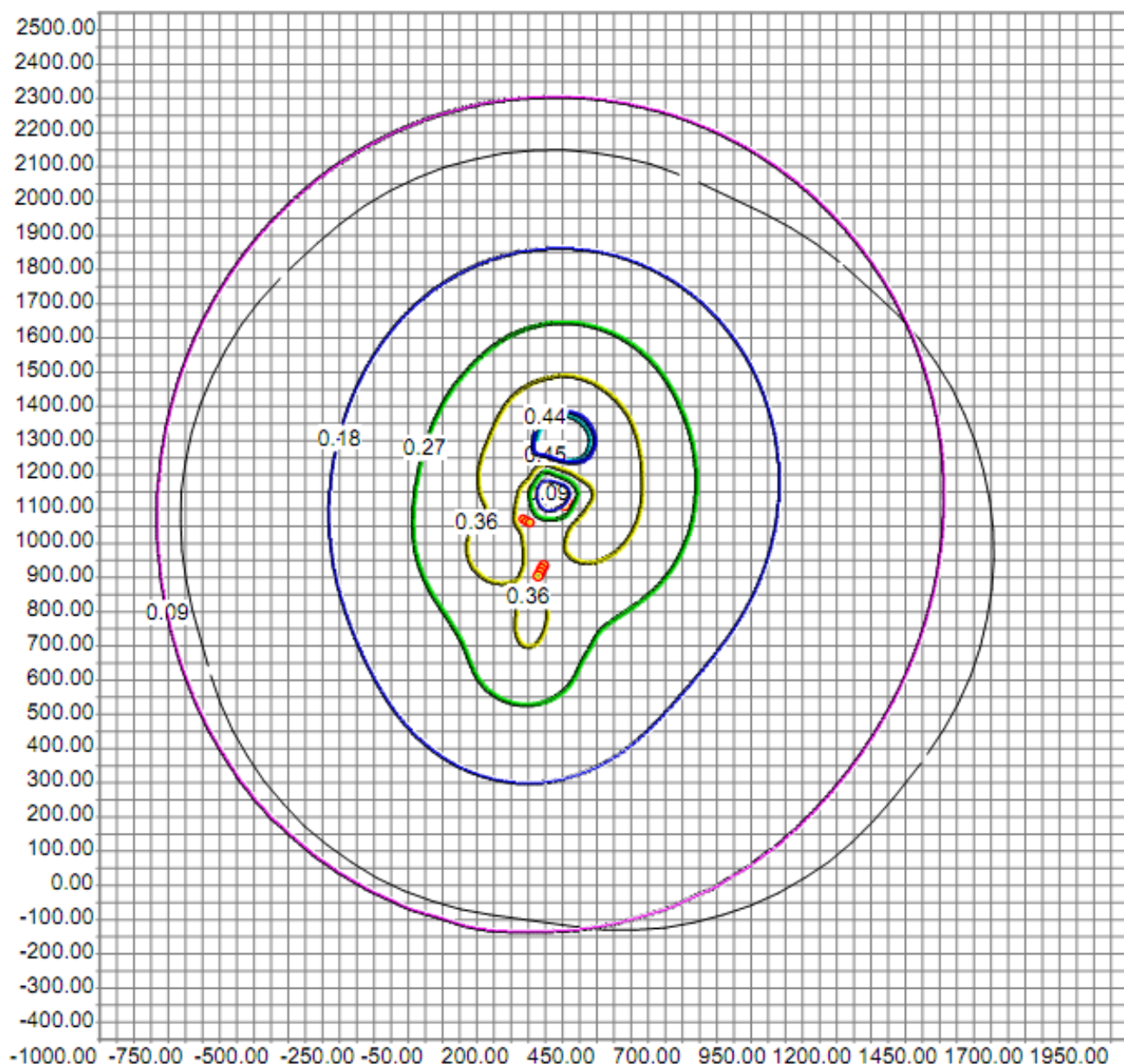


Рисунок 5.8 - Карта прогнозу розсіювання пилу ільменіту з впровадженням апарату з ПТВО

Кліматичні умови досліджуваної території (вітрові умови) взято із Додатку Е. Вихідні умови, що характеризують джерела викиду було взято з [16].

Як видно з карт (рис.5.7 - 5.8) на межі СЗЗ концентрація пилу ільменіту зменшилась майже в 15 разів (до 0,1 ГДК для населених пунктів), що також означає зменшення втрат сировини, в порівнянні з існуючою системою пилоочищення, на зниження рівня екологічної безпеки підприємства.



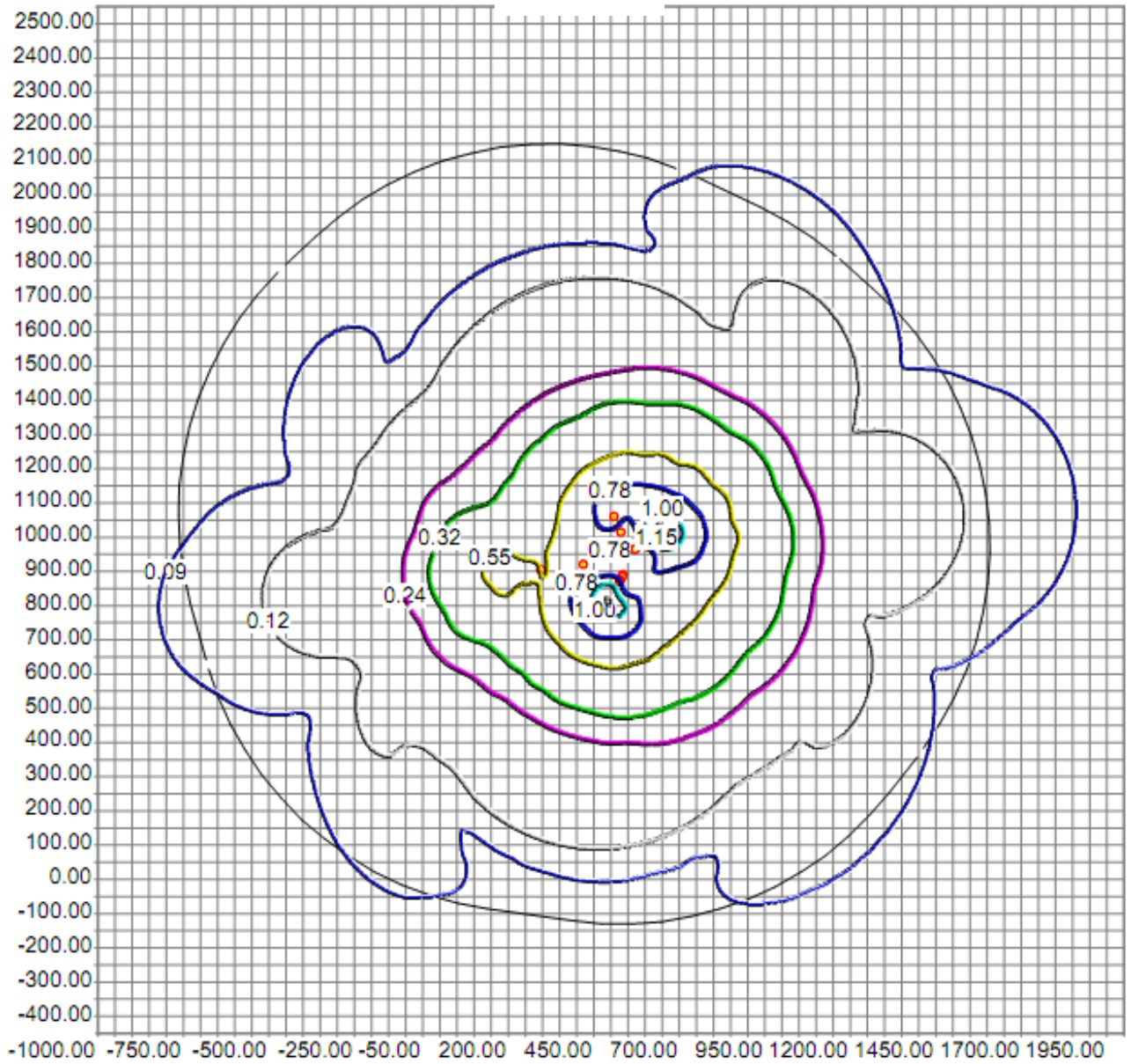


Рисунок 5.9 - Карта розсіювання пилу двоокису титану за існуючої системи ПИЛОВЛОВЛЕННЯ

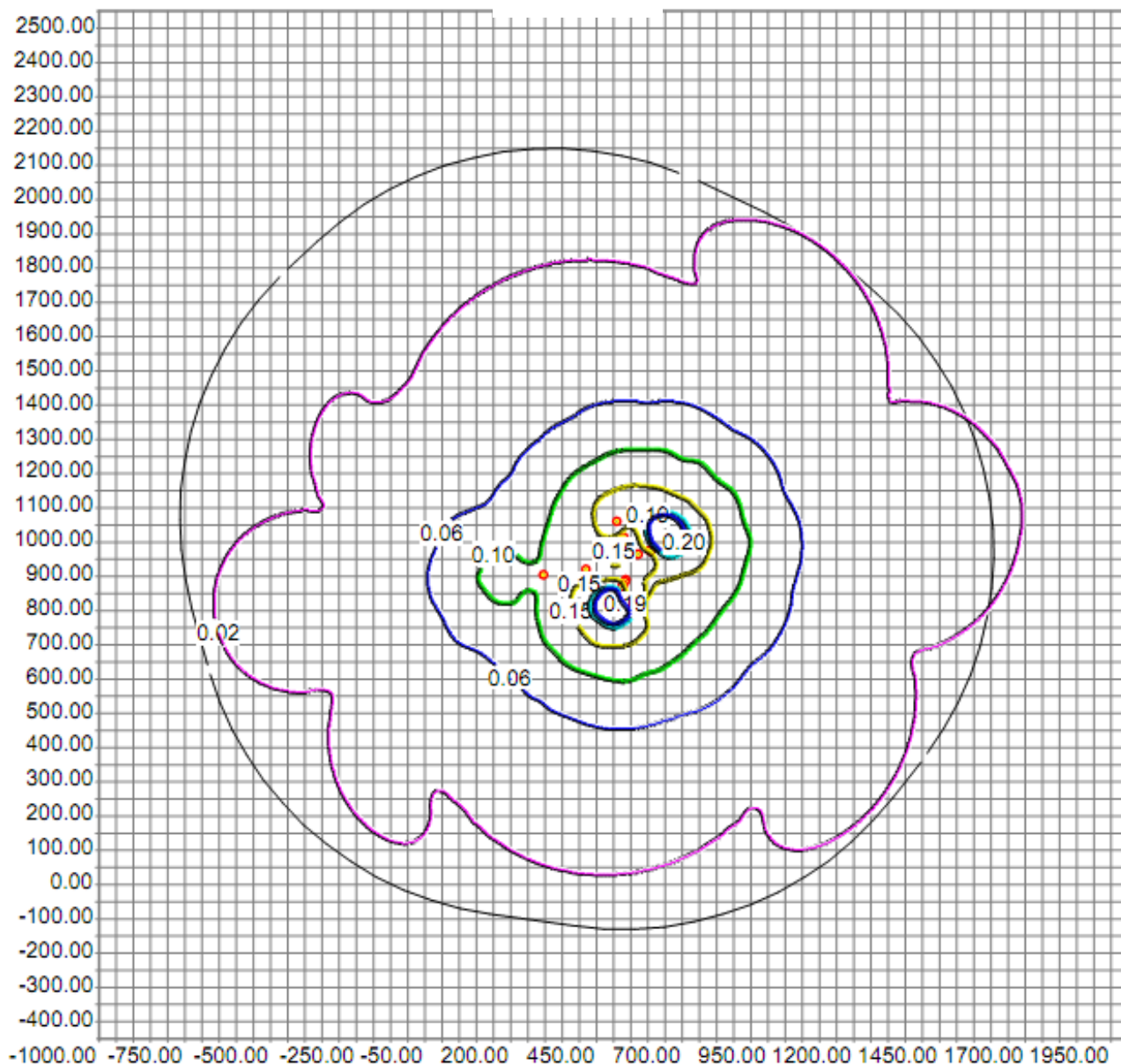


Рисунок 5.10 - Карта прогнозу розсіювання пилу двоокису титану з впровадженням апарату з ПТВО

Незважаючи на те, що перевищень ГДК (для населених пунктів) на межі СЗЗ при існуючій системі пилоловлення двоокису титану практично немає (рис.5.9), його потенціальний шкідливий вплив на здоров'я, зумовлений фіброгенними властивостями, також вимагає вживання природоохоронних заходів. Так, заміна пилоочисного обладнання на стадіях утворення  $TiO_2$  (рис.5.10) дозволяє зменшити концентрацію пилу на межі СЗЗ до рівня, що

менший за значення ГДК для населених пунктів майже в 4,5 рази і суттєво вплинути на екологічний стан довкілля в районі підприємства.

## **Висновки**

1. Розглянуто основні стадії утворення пилу на існуючих виробництвах двоокису титану, визначено основні втрати продукту та сировини на різних етапах виробництва.

2. Промислові дослідження апарату з ПТВО дозволили встановити ефективність очищення газу від пилу двоокису титану на рівні 99,2% та пилу ільменіту на 99,5%.

3. Розглянуто пропозиції щодо введення апарату з ПТВО замість існуючого пиловловлюючого обладнання на трьох стадіях процесу виробництва двоокису титану: розмел ільменіту, прокалка і розмел двоокису титану.

4. Зпрогнозовано зменшення втрат сировини та готового продукту на основі методики ОНД-86.

5. Проведено пошукову роботу з метою ресурсозбереження, щодо можливості зменшення втрат сировини та готового продукту шляхом повернення вловленого пилу на конкретні стадії виробничого процесу.

6. Запропоновано рекомендації з експлуатації газоочисного апарату з ПТВО (Додаток Є, Ж).

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-технічне завдання в напрямку підвищення рівня екологічної безпеки техногенного регіону. Проведений аналіз окремих виробництв хімічної промисловості показав, що ступінь очищення газових викидів не відповідає теоретично можливій ефективності роботи газоочисного обладнання. Використання морально застарілого обладнання, без урахування фізико-хімічних властивостей домішок, призводить до збільшення викидів у навколишнє середовище. Одержано такі наукові результати:

1. На основі дослідження техногенного впливу підприємств хімічної промисловості на атмосферу, на прикладі ПАТ «Суміхімпром», запропоновано шляхи зниження пилових викидів шляхом вдосконалення системи пилоочищення виробництва двоокису титану із застосуванням високоефективного обладнання.

2. Проведено паспортизацію пилу ільменіту та двоокису титану як техногенних чинників формування екологічної безпеки підприємства. Досліджуваний пил ільменіту класифіковано як дрібнодисперсний ( $d_{50} = 7,2$  мкм), двоокису титану – як дуже дрібнодисперсний ( $d_{50} = 0,305$  мкм). На підставі аналізу фізико-хімічних властивостей пилу ільменіту та двоокису титану встановлено, що досліджуваний пил має високі адгезійні властивості.

3. Розроблено математичну модель розсіювання дрібнодисперсного пилу в атмосфері та її розв'язок методом скінченних різниць, яка може бути використана для розрахунку концентрації дрібнодисперсного пилу на заданій відстані від джерела при певній швидкості вітру та заданій потужності джерела.

4. Перевірка адекватності математичної моделі експериментальним даним замірів запиленості повітря в межах санітарно захисної зони підприємства встановила збіжність на рівні 85%.

5. Удосконалено фізичну модель пилоочищення в апараті з провальними тарілками великих отворів (ПТВО) шляхом розгляду механізмів пилоосадження,

які діють на частинки пилу в апараті та опису картини пилоосадження в високотурбулізованому шарі піни.

6. Експериментальні дослідження гідродинаміки лабораторного стенду дозволили встановити робочий режим апарата з ПТВО – режим вторинного піноутворення, що відповідає інтервалу швидкості за газом 2 – 3,5 м/с. Робочий інтервал щільності зрошення становить 15 – 20 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год). Висота шару піни становить 0,6 м.

7. Дослідження процесу пилоочищення в апараті дозволили встановити залежність ефективності пилоочищення від режимних параметрів роботи. Апарат має високу ефективність очищення (до 99,6%) в режимі вторинного піноутворення, низьку енергоємність і стабільну роботоздатність за умов тривалої експлуатації.

8. Проведено вибір і обґрунтування факторів, що обумовлюють ефективність роботи апарата з провальними тарілками великих отворів. До них відносяться гідродинамічні (швидкість газу в апараті, щільність зрошення, гідравлічний опір, КУР) та конструктивні особливості апарата (вільний переріз полотна тарілки).

9. Отримано рівняння регресії для розрахунку ефективності пилоочищення та висоти газорідинного шару в апараті з ПТВО.

10. З метою поліпшення технологічних характеристик і зниження техногенного впливу на навколишнє середовище запропоновано схеми включення апарата з ПТВО в існуючу систему пилогазоочищення виробництва двоокису титану на ПАТ «Сумхімпром» (Додатки Е, Є).

11. З метою ресурсозбереження проведено дослідження з пошуку шляхів повернення в процес продукту зі шламонакопичувача, що свідчать про можливість зменшення втрат сировини та готового продукту виробництва двоокису титану на ПАТ «Сумхімпром» шляхом повернення вловленої пилу в технологічний процес.

12. Розроблено рекомендації з експлуатації пилоочисного апарата.

13. Порівняльний аналіз карт розсіювання пилу виробництва двоокису титану за існуючої системи пилоочищення та прогнозу після впровадження запропонованого апарата з ПТВО дозволяє стверджувати про можливість суттєвого зменшення концентрацій пилу (майже у 15 разів за пилом ільменіту та у 4,5 раза за двоокисом титану).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стан забруднення навколишнього природного середовища в Україні: за даними спостережень мережі гідрометслужби за 2007-2009 роки [Електронний ресурс] / матеріали з сайту Центральної геофізичної лабораторії. Режим доступу: <http://cgo.kiev.ua/index.php?fn=3&p=1&f=ukraine/data-zabrud>.
2. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні: за даними Міністерства охорони навколишнього природного середовища України за 2007 - 2010 рр. [Електронний ресурс] / матеріали з сайту Міністерства охорони навколишнього природного середовища України. Режим доступу: <http://www.menr.gov.ua/content/article/6004>.
3. Стан довкілля в Україні: за даними інформаційно-аналітичного огляду за 2007-2009 рр. [Електронний ресурс] / матеріали з сайту Міністерства охорони навколишнього природного середовища України. Режим доступу: <http://www.menr.gov.ua/content/article/6012>.
4. Стратегія державної екологічної політики України на період до 2020 року [Електронний ресурс] / матеріали з сайту Міністерства охорони навколишнього природного середовища України. Режим доступу: <http://www.menr.gov.ua/content/article/8328> - Назва з екрану.
5. Балабеков О.С. Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппараты / О.С. Балабеков, Л.Ш. Балтыев. – М. Химия, 1991. – 256 с.
6. Пищиков В.А. Профессиональная заболеваемость в Украине (динамика за последние 10 лет, причины формирования) и пути сохранения профессионального здоровья населения / В.А. Пищиков, И.П. Лубянова // Сб. Гигиена труда. – 1999. – Вып. 30. – С.13-23.
7. Гланц С. Медико-биологическая статистика [пер. с англ.] / С. Гланц. – М.: Практика, 1998. – 459 с.
8. Гурець Л.Л. Очистка промислових газів в апаратах із провальними тарілками великих отворів / Л.Л. Гурець, І.С. Козій // Вісник КДПУ ім. М.Остроградського – 2008. - №5(52). Частина 2. – С. 162 – 164.

9. Козій І.С. Вплив виробництва двоокису титану на атмосферу / І.С. Козій, Л.Л. Гурець // Вісник КДПУ ім. М.Остроградського – 2009. - №4(57). – С. 132-134.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Козий И.С. Расчет высоты газожидкостного слоя в аппарате с провальными тарелками больших отверстий/ Козий И.С., Гурец Л.Л., Чаплыгин А.А. // Вісник СумДУ. - 2010. - №3. – С. 61-67.
14. Екологічний паспорт Сумської області за 2005 – 2009 рр. [Електронний ресурс] / матеріали з сайту Міністерства охорони навколишнього природного середовища України. Режим доступу:  
<http://www.menr.gov.ua/content/article/5991>.
15. Перелік 100 об'єктів, які є найбільшими забруднювачами довкілля в Україні [Електронний ресурс] / матеріали з сайту Міністерства охорони навколишнього природного середовища України. Режим доступу:  
<http://www.menr.gov.ua/content/article/201>.
16. Інвентаризація викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря ВАТ «Сумхімпром». – Суми: УкрНТЕК, 2008. – 142 с.
17. Вальдберг А.Ю. Выбор пылеуловителей для очистки промышленных газов / А.Ю. Вальдберг // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1997. -№1. – С. 54-56.
18. Справочник по пыле- и золоулавливанию / [под общ.ред. А.А. Русанова]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.



19. Виробництво двоокису титану пігментного сульфатними способом / В.М. Скомороха, В.Г. Заречений, І.П. Воробйова, С.В. Вакал. – Суми: АТЗТ «Арсенал-Пресс», 2002. – 204 с.
20. Постійний технологічний регламент виробництва двоокису титану пігментного та двоокису титану спецмарок №67. – Суми: ВАТ «Сумихімпром», 2010. – 285 с.
21. Бахарев В.С. Екологічна безпека регіону в умовах техногенного пилового забруднення атмосферного повітря: дис... кандидата техн. наук: 21.06.01 / Володимир Сергійович Бахарев. -Кременчук, 2005. – 179 с.
22. 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.
23. 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. – 7с.
24. Шмандий В.М. Научно-методические принципы исследования состояний техногенной безопасности в регионе / В.М. Шмандий // Вісник КДПУ.– 2002.– Вип.5(16). – С. 19-24.
25. Шмандий В.М. Управління екологічною безпекою на регіональному рівні (теоретичні та практичні аспекти): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 21.06.01 «Екологічна безпека» / В.М. Шмандий. –Харків, 2003. – 36 с.
26. Полищук В.С. Связь годовых биоритмов человека и неблагоприятных метеорологических условий в экологии / В.С. Полищук, В.М. Шмандий, Д.В. Полищук // Оценка техногенного воздействия на природную среду. Новые технологии очистки промвыбросов, возвратных вод, переработки и утилизации отходов: Сб. научн. трудов.– Кременчуг: КФ ХГПУ.– 1996.– С. 22-23.
27. Вараксин А.Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами / Вараксин А.Ю. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 192 с.

28. 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.
29. Вараксин А.Ю. Модификация турбулентности потока твердыми частицами / А.Ю. Вараксин // *Научные основы технологий XXI века*. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – С. 98 – 104.
30. Згуровский М.З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / Згуровский М.З. – К.: Наук.думка, 1997. – 368 с.
31. 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.
32. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. / Берлянд М.Е. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. Бруязцкий Е.В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е.В. Бруязцкий. – К.: Изд-во ин-та гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
37. 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.
38. Яглом А.М. О турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы / А.М. Яглом. – *Изв. АН СССР. ФАиО*. – 1972. - №6. – С. 579-594.

39. Алоян А.Е., Йорданов Д.Л., Пененко В.В. 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.
40. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 320 с.
41. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД – 86. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 93 с.
42. Кундієв Ю.І. Професійне здоров'я в Україні / Ю.І. Кундієв, А.М. Нагорна. – К.: ВД «Авіцена», 2006. – 316 с.
43. Гичев Ю.П. Здоровье человека как индикатор экологического риска промышленных регионов / Ю.П. Гичев // Вестник Российской АМН. – 1995.– №8.– С.52-54.
44. Хайтов Р.М., Пинегин Б.В., Истамов Х.И. Экологическая иммунология / Р.М. Хайтов, Б.В. Пинегин, Х.И. Истамов – М.: ВНИРО, 1995. – 439 с.
45. Общая токсикология / под ред. Б.А. Курляндского, В.А. Филова. – М.: Медицина, 2002. – 607 с.
46. Зилов Е.А. Химия окружающей среды / Е.А. Зилов. – Иркутск: Иркут. ун-т., 2006. – 148 с.
47. 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.
48. Work-related lung diseases. Asbestos-related lung diseases. ELF Patient Factsheet / Breath. – 2008. - vol.4, №3. - P. 295–300.
49. Краснюк Е.П. Пылевые заболевания легких у рабочих промышленного производства Украины / Е.П. Краснюк // Український пульмонологічний журнал. - 1998. - № 4. - С. 13–16.
50. Мусієнко М.М. Фізіологія рослин / М.М. Мусієнко. – К.: Либідь, 2005. – 808 с.

51. Клименко А.П. Непрерывный контроль концентрации пыли / А.П. Клименко, В.И. Королёв, В.И. Шевцов. – К.: Техника, 1980. – 181с.
52. Владимиров А.М. Охрана окружающей среды / А.М. Владимиров. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 423 с.
53. Ладыгичев М.Г. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: Справочное издание / М.Г. Ладыгичев, Г.Я. Бернер. – М.: Теплотехник, 2004. – 696 с.
54. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха: [2-е изд., перераб. и доп.] / А.И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
55. Страус В. Промышленная очистка газов: [пер. с англ.] / В. Страус. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
56. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справочное изд. / Г.М. Алиев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
57. Рамм В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм. – М.: Химия, 1976. – 655 с.
58. Борисов Г.С. Основные процессы и аппараты химической технологии: [пособие по проектированию, 2-е изд., перераб. и дополн]; Под ред. Ю.И. Дытнерского / Г.С. Борисов, В.П. Бриков, Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 1991. – 496 с.
59. Циборовский Я. Процессы химической технологи. / Я. Циборовский. – Л.: Госхимиздат, 1958. – 932 с.
60. Молдабеков Ш.М. Очистка фосфор-, фтор- и серусодержащих газов производства фосфора и его соединений: дис. ... доктора техн. наук: 05.17.01 / Ш.М. Молдабеков. - М., 1984. - 529 с.
61. Шарыгин М.П. Разработка и расчет устройств для разрушения отложений и пылеулавливания с управляемым вихревым потоком: дис. ... доктора техн. наук: 05.17.08 / Шарыгин Михаил Павлович. - Шымкент, 1992. – 480с.
62. 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.

63. Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями. / Под общей редакцией проф. Э.Я. Тарата. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1975. – 239 с.
64. 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.
65. 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; заявлено 06.08.75; опубл. 30.11.78. Бюл. № 44.
66. 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; заявлено 18.05.79; опубл. 30.03.81. Бюл. № 12.
67. 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; заявлено 06.05.81; опубл. 15.12.88. Бюл. № 46.
68. Ткач А.Г. Исследование абсорбционно-десорбционных процессов содового производства с целью их интенсификации: автореф. дис. на соискание науч. степени докт. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» / А.Г.Ткач. – Харьков, 1977. – 41 с.
69. 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.
70. Цейтлин М.А. Массопередача в процессах очистки и охлаждения газов и жидкостей содового производства: дис. ... доктора техн. наук: 05.17.08 / Цейтлин Моисей Абрамович. – Харьков, 2003. – 305 с.
71. Крашенинников С.А. Технология соды / С.А. крашенинников. – Химия, 1988. - 304 с.

72. 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.
73. 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.
74. Пенный режим и пенные аппараты / Э.Я. Тарат, И.П. Мухленов, А.Ф. Туболкин [и др.] – Л.: Химия, 1977. – 304 с.
75. Почанова С.М. Исследование гидродинамики и массоотдачи в газовой фазе на крупноперфорированных провальных тарелках: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» / С.М. Почанова. – Ташкент, 1978. – 19 с.
76. Касаткин А.Г. Исследование гидродинамики дырчатых и решетчатых провальных тарелок. / А.Г. Касаткин, Ю.И. Дытнерский, Д.М. Попов // Химическая промышленность. – 1961. - №7. – С. 482 – 489.
77. Шарафиев А.Ш. Гидродинамика и массообмен на крупнодырчатых провальных тарелках со стабилизатором газожидкостного слоя активного типа: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» / А.Ш. Шарафиев. – Шымкент, 2000. – 27 с.
78. Тараненко Г.В. Гидродинамика и массопередача комбинированного контактного устройства: дис. к.т.н.: 05.17.08 / Г.В. Тараненко. - Северодонецк, 1984. - 300 с.
79. Александров И.А. Ректификационные абсорбционные аппараты. Методы расчета и конструирования / И.А. Александров. – 2-е изд. перераб. – М.: Химия, 1971. – 296 с.
80. Колтунова Л.Н. Интенсификация процессов ректификации. Промышленное применение решетчатых тарелок [темат.обзор: Нефтехимия и

сланцепереработка] / Л.Н. Колтунова, Л.С. Позин, Т.А. Быстрова. – М.: ЦНИИТЭнефтехим. – 1977. - 84 с.

81. Сум-Шик Л.Е. Определение верхнего и нижнего пределов работы колонн с беспереливными барботажными тарелками / Л.Е. Сум-Шик, Л.С. Позин, М.Э. Аэров // Хим. пром-сть. - 1968. - №2. - С.146-148.

82. Аксельрод Л.С. О расчете скорости начала устойчивой работы провальных дырчатых тарелок / Л.С. Аксельрод, Е.С. Шитиков // Журнал прикладной химии. – 1977. - т.І, №3. - С.689-691.

83. Кочергин Н.А. Определение минимальнодопустимой скорости пара на тарелках провального типа / Н.А. Кочергин, В.В. Дильман, С.Ф. Марусова // Химическая промышленность. – 1966. - №10. - С.782-783.

84. Гельперин Н.И. Некоторые гидродинамические закономерности работы абсорбционных аппаратов с псевдожиженной шаровой насадкой / Н.И. Гельперин, В.И. Савченко, В.В. Гришко // Теор.основы хим.технол. – 1968 - т. 2, № 1. - С.76-83.

85. Касаткин А.Г. К расчету колон с провальными тарелками / А.Г. Касаткин, Ю.И. Дытнерский, С.У. Умаров // Хим.пром-сть. – 1958. - №3. – С. 66-173.

86. Вальдберг А.Ю. К вопросу о предельных параметрах пенного режима в аппаратах с полным протеканием жидкости через отверстия / А.Ю. Вальдберг, Э.Я. Тарат // Журнал прикладной химии. – 1970. - т.43, № 8. - С.1712-1715.

87. Молоканов Ю.К. Экспериментальное исследование решетчатых тарелок провального типа / Ю.К. Молоканов, И.А. Александров, А.И. Скобло // Химия и технология топлив и масел. – 1961. - № 5. - С.34-38.

88. Sridharan K. New systems and methods for the measurement of effective interfacial area and mass transfer coefficients in gas-liquid contactors / K. Sridharan, M.M. Sharma // Chem. Eng. Science. – 1976. – Vol.11. – P.767-774.

89. Зенков В.В. Исследование межфазной поверхности и массопередачи в жидкой фазе в колонне с провальными тарелками: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» / В.В. Зенков – М., 1981. - 43 с.

90. Дильман В.В. О гидравлическом сопротивлении решетчатых и дырчатых тарелок / В.В. Дильман, Е.П. Даровских, М.Е. Аэров // Хим. пром-сть. – 1956. - №3. - С.156-161.
91. Молоканов Ю.К. О гидравлическом сопротивлении решетчатых и дырчатых тарелок провального типа / Ю.К. Молоканов // Хим. пром-сть. – 1962. - №4. - С.291-294
92. Сум-Шик Л.Е. О гидравлическом расчете колонн с беспереливными тарелками / Л.Е. Сум-Шик, М.Э. Аэров, Т.А. Быстрова // Хим. пром-сть. – 1962. - №7. - С.530-532.
93. Маяк В.И. Гидравлика и массообмен при абсорбции хорошо растворимых газов в тарельчатых аппаратах с подвижной орошаемой насадкой: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» / В.И. Маяк. – Москва, 1971. – 17 с.
94. Маяк В.И. Расчет гидравлического сопротивления провальных тарелок / В.И. Маяк, В.В. Дильман, Е.Н. Шестопапов // Теор.основы хим.технол. – 1979. - Т.13, №4. - С.614-616.
95. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – 2-е изд.перераб / В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1972. – 493 с.
96. Пенный режим и пенные аппараты / Под ред. И.П. Мухлёнова и Э.Я. Тарата. – Л.: Химия, Ленинградское отделение, 1977. – 303 с.
97. Касаткин А.Г. Расчет колонн с трубчатими провальными тарелками / А.Г. Касаткин, Ю.И. Дытнерский, Д.Г. Питерских // Хим. пром-сть. – 1963. - №4. - С.279-286.
98. Хоблер Т. Массопередача и абсорбция / Т. Хоблер [перев. с польского под ред. проф. П.Г. Романкова.] – Л.: Химия, Ленинградское отделение, 1964. – 479 с.
99. Сум-Шик Л.Б. Исследование уноса и гидродинамический расчет колонн с беспереливными тарелками / Л.Б. Сум-Шик, М.Э. Аэров, Т.А. Быстрова // Хим. пром-сть. – 1963. - №1. - С.63-68.



100. Колесниченко В.Т. Исследование гидродинамики и массообменных характеристик провальных тарелок с большим диаметром отверстий - дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Колесниченко В.Т. - Киев, 1980. – 210 с.
101. Шитиков Е.С. Исследование гидродинамики провальных тарелок и вопросы их гидравлического расчета: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» / Е.С. Шитиков – Москва, 1977. – 16 с.
102. Омаркулов П.К. Механизм взаимодействия потоков в газожидкостной системе / П.К. Омаркулов // Хімічна промисловість України. – 2003. - №2. – С. 31 – 32.
103. Козій І.С. Використання апаратів з дірчастими провальними тарілками для очистки промислових газів / І.С. Козій // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічні проблеми техногенно-навантажених регіонів», м. Дніпропетровськ, 12-14 травня 2008 р. – С. 168-169.
104. Козій І.С. Проблема очистки отходящих газов / І.С. Козій // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. – Суми : Вид-во СумДУ, 2007. – Ч.2. – С. 19.
105. Ужов Н.В. Подготовка промышленных газов к очистке. / Н.В. Ужов, А.Ю. Вальдберг. – М.: Химия, 1975. – 216 с.
106. Вальдберг А.Ю. Технология пылеулавливания / А.Ю. Вальдберг. – Л.: Машиностроение, 1985. – 192 с.
107. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. - М.: Химия, 1981. – 392с.
108. X-ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer Ver. 3.78 / Brookhaven Instruments Limited [Електронний ресурс]. - Режим доступу:  
<http://www.brookhaven.co.uk/products/particle-size-analysis>.
109. Коузов П. А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. / П. А. Коузов, Л. Я. Скрыбина. - Л.: Химия, 1983. - 143 с.

110. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
111. 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.
112. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк; [пер. с англ. Е.Г. Коваленко]. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
113. 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.
114. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – К.: Техніка, 1975. – 168 с.
115. Бондарь А.Г. Планирование эксперимента в химической технологи / А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха. – К.: Вища школа, 1976. – 184 с.
116. Mathcad 14.0 / Пакет программ для инженерных расчетов [Электронный ресурс]. – 2009. - Режим доступа:  
<http://www.mathcad.com.ua/>.
117. Statistica 6.0 / Система статистического анализа данных [Электронный ресурс]. – 2007. - Режим доступа:  
<http://www.statsoft.ru/>.
118. Advanced Grapher 2.2 / Alentum Software, Inc. [Электронный ресурс]. – 2009. - Режим доступа:  
<http://www.alentum.com/agrapher/>.
119. 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.
120. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоиздат, 1985. – 248 с.

121. Воеводин В. В. Математические модели и методы в параллельных процессах / В. В. Воеводин. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
122. Грешилов А.А. Математические методы построения прогнозов / А.А. Грешилов, В.А. Стакун, А.А. Стакун. – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.
123. Шашков В.Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: Учебное пособие / В.Б. Шашков — Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. - 363 с.
124. Українська база медико-статистичної інформації (до 2010 р.) / Матеріали з Центру медичної статистики МОЗ України [Електронний ресурс]. - Режим доступу:  
<http://medstat.gov.ua/ukr/statreports/access.html?id=13>.
125. Козій І.С. Використання апаратів мокрого пилоочищення при виробництві двоокису титану / І.С. Козій, Л.Л. Гурець // Матеріали V Міжнародної ювілейної науково- практичної конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження» м.Суми, 14-16 травня 2009 р. - С. 39.
126. Айтбаев Е. Взаимодействие фаз при истечении газа в жидкость через одно и группу отверстий и гидродинамика крупнодырчатых провальных тарелок. - дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Айтбаев Е. – М., 1983. – 183 с.
127. Сувак Е.В. Очистка газовых выбросов от высокодисперсных частиц в дисперсно-кольцевом потоке / Е.В. Сувак, Н.А. Войнов, Н.Ю. Житкова // Химия растительного сырья. – 2000. - № 4. – С. 85-101.
128. 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.
129. Молдабеков Ш.М. Исследование гидродинамики и массопередачи в газовой фазе на провальных тарелках крупной перфорацией / Ш.М. Молдабеков, С.М. Почанова, И.П. Левш, М.И. Ниязов // Весник АН Каз ССР. – 1976. - № 8. – С. 68-72.
130. Балабеков О.С. Структурно-поэлементный подход к описанию процессов массообмена в колонных аппаратах / О.С. Балабеков. - Чимкент, 1981, 24с.

Рукопись представлена Каз. ХТИ. Деп. ОНИИТЭХИМ, Черкассы, № 102-хп – Д82.

131. 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.

132. 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.

133. Козій І.С. Моделювання ефективності пиловловлення в апараті з провальними тарілками великих отворів / І.С. Козій // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Карпатська конференція з проблем охорони довкілля» Мукачєво-Ужгород, 15-18 травня 2011 р. - С. 282.

134. Пінний апарат: пат. 44700 України, МПК (2009) B01D47/04; 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.

135. Кутателадзе С.С. Гидродинамика газожидкостных систем. 2-е изд., перераб. и доп. / С.С. Кутателадзе, М.А. Старикович. – М.: Энергия, 1976. - 296с.

136. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах. т.2 / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. - М.: Наука, 1968. - 624 с.

137. ЕОЛ 2000 / Автоматизована система розрахунку викидів забруднюючих речовин в атмосферу ТОВ «Софт фонд» [Електронний ресурс]. – 2011. Режим доступу:

<http://www.sfund.kiev.ua/rus/products/ecology.htm>.

## ДОДАТОК А

Прилади, що використовувались при вимірюванні пиловловлення в апараті

<b>№ п/п</b>	<b>Назва ЗВТ</b>	<b>Заводський номер</b>	<b>Відомості про повірку</b>
1	Мікроманометр ММЦ-200	222	Свідоцтво №39-03-2355 від 03.12.08
2	Напірна трубка ТН-0,7(К <sub>Т</sub> =0,576)	2033	Тавро, 4 кв. 2008
3	Напірна трубка ТН-1,0(К <sub>Т</sub> =0,551)	10	Тавро, 4 кв. 2008
4	Напірна трубка ТН-1,5(К <sub>Т</sub> =0,551)	5	Тавро, 4 кв. 2008
5	Напірна трубка ТН-2,0(К <sub>Т</sub> =0,546)	35	Тавро, 4 кв. 2008
6	Вимірювач температури ИТ-1	39	Свідоцтво №561 від 27.03.2009
7	Вимірювач температури ИТ-1	266	Свідоцтво №2152 від 23.12.2008
8	Вимірювач швидкості ИС-1	145	Свідоцтво №22-00/0806551 від 11.12.08
9	Термометр цифровий "Testo"	33	Свідоцтво № 2151 від 23.12.2008
10	Мановакууметр МЦ-1Д-10	47	Свідоцтво №39-03-2395 від 11.12.2008
11	Мановакууметр МЦ-1Д	44	Свідоцтво №39-03-2394 від 11.12.2008
12	Рулетка Р5У3К	1	Тавро, I кв. 2009
13	Штангенциркуль ШЦ	3008720	Тавро, I кв. 2009
14	Секундомір СОСпр-2б-2-000	8507	Свідоцтво № 253 від 23.03.2009
15	Барометр-анероїд БАММ-1	11272	Свідоцтво № 0535 від 25.03.2009

## ДОДАТОК Б

Результати дослідження гідродинамічних та конструктивних параметрів апарату з ПТВО

Діаметр отворів тарілки, м	Вільний перетин полотна тарілки $\tau$ , %	Щільність зрошення $L_3$ , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ГОД})$	Швидкість газу в апараті $w_2$ , м/с	КУР, $10^{-3}$ , $\text{м}^3/\text{м}^2$	Гідравлічний опір $\Delta P$ , Па	Висота шару піни $H$ , $10^{-3}$ м
1	2	3	4	5	6	7
0,09	8,5	10	2,5	20	400	390
0,09	8,5	12	2,5	30	580	420
0,09	8,5	15	2,5	30	700	460
0,09	8,5	18	2,5	30	720	500
0,09	8,5	20	2,5	40	750	525
0,09	8,5	10	3	20	820	420
0,09	8,5	12	3	30	850	440
0,09	8,5	15	3	40	880	485
0,09	8,5	18	3	60	940	525
0,09	8,5	20	3	45	950	550
0,09	8,5	10	3,5	50	1200	405
0,09	8,5	12	3,5	40	360	430
0,09	8,5	15	3,5	60	520	470
0,09	8,5	18	3,5	85	400	515
0,09	8,5	20	3,5	100	450	540
0,12	15	10	2,5	60	1550	355
0,12	15	12	2,5	110	1570	380
0,12	15	15	2,5	150	1580	425
0,12	15	18	2,5	180	1250	465
0,12	15	20	2,5	130	1680	490
0,12	15	10	3	170	1680	425
0,12	15	12	3	220	1420	450
0,12	15	15	3	200	1330	490
0,12	15	18	3	240	1700	530
0,12	15	20	3	260	1600	560
0,12	15	10	3,5	200	1710	455
0,12	15	12	3,5	220	1040	480
0,12	15	15	3,5	245	1460	520
0,12	15	18	3,5	260	1720	560
0,12	15	20	3,5	280	1700	590
0,15	23,5	10	2,5	15	1150	260
0,15	23,5	12	2,5	130	1460	290

## Продовження Додатку Б

1	2	3	4	5	6	7
0,15	23,5	15	2,5	200	1730	330
0,15	23,5	18	2,5	300	1700	370
0,15	23,5	20	2,5	300	1730	395
0,15	23,5	10	3	315	1730	380
0,15	23,5	12	3	320	1730	410
0,15	23,5	15	3	330	1180	450
0,15	23,5	18	3	270	1250	490
0,15	23,5	20	3	250	1480	520
0,15	23,5	10	3,5	20	930	465
0,15	23,5	12	3,5	80	1020	490
0,15	23,5	15	3,5	160	1160	530
0,15	23,5	18	3,5	290	1550	575
0,15	23,5	20	3,5	330	1270	600

## ДОДАТОК В

Форма затверджена наказом  
Мінекоресурсів України  
від 31 грудня 2003 р. № 194

Додаток \_\_\_ до Акта відбору проб від 02.07.09 № 14-09

### Протокол вимірювань параметрів газопилового потоку

Дата виконання вимірювань 02 липня 2009 року

Час виконання вимірювань: початок 13:40 год. хв, закінчення 15:10 год. хв.

Вимірювання виконані відповідно до ГОСТ 17.2.4.06-90 та 17.2.4.07-90.

1 Номер (назва) джерела Лабораторний стенд

2 Місце вимірювання газохід

2.1  До  Після вентилятора;  До  Після  Немає ГОУ; ділянка газоходу  вертикальна  горизонтальна  похила

2.2 Довжина прямої ділянки  $l$ , мм 3000

2.3 Вимірювальний переріз - Круглий

Круглий переріз	
Діаметр $D$ , мм	<u>310</u> , <u>310</u> , <u>310</u> , <u>310</u>
$\bar{D} =$	<u>310</u>
Значення $L = l / \bar{D} =$	<u>9,6774</u>
Довжина ділянки до вимірювального перерізу $l_y$ , мм	$l_y = l - (K_z \times \bar{D})$
	$l_y = 3000 - (3,3 \times 310) = 1977$
Кількість точок вимірювань $n_D$ , шт	$n_D =$ <u>1</u>
Скоригована кількість точок вимірювань $n_D$ , шт	$n_D =$ <u>3</u>
Кількість ліній вимірювань, шт	<u>3</u>
Площа перерізу $S_D$ , м <sup>2</sup> . $S_D = 0,785 \cdot (\bar{D} / 1000)^2$	$S_D = 0,785 \cdot (310 / 1000)^2$
	$S_D = 0,0754$

3 Температура газопилового потоку  $t_r, ^\circ\text{C}; T_r, \text{K}$

	Координати точки, мм	На початку	Наприкінці
т.1	$(0,250 \pm 0,083) \cdot D$ $0,25 \cdot 310 = 78$	<u>25</u>	<u>25</u>
т.2	$D - (0,250 \pm 0,083) \cdot D$ $310 - 78 = 232$	<u>25</u>	<u>25</u>

$$\bar{t}_r = 25$$

$$T_r = (273 + \bar{t}_r)$$

$$T_r = 298$$

4 Атмосферний тиск  $p_a$ , мм рт.ст.

На початку	Наприкінці
<u>752</u>	<u>752</u>

$$\bar{p}_a = 752$$

5 ЗВТ, що застосовувались при вимірюванні Вибір ЗВТ

Назва ЗВТ	Заводський номер	Відомості про повірку
Рулетка Р5УЗК	1	Тавро, I кв. 2009
Штангенциркуль ШЦ	3008720	Тавро, I кв. 2009
Секундомір СОСпр-26-2-000	8507	Свідоцтво № 253 від 23.03.2009
Барометр-анероїд БАММ-1	11272	Свідоцтво № 0535 від 25.03.2009
Вимірювач температури ИТ-1	266	Свідоцтво №2152 від 23.12.2008
Мікроманометр ММЦ-200	222	Свідоцтво №39-03-2355 від 03.12.08
Напірна трубка ТН-0,7(Кт=0,576)	2033	Тавро, 4 кв. 2008



Продовження Додатку В

6 Швидкість  $v$  і об'ємна витрата  $q_v$

$n_i$	Координати точки $n_i$ , мм		Тиск $\odot$ повний $p_{\text{пі}}$ $\circ$ статичний $p_{\text{ст}}$ , мм вод.ст.					Динамічний тиск $p_{\text{ді}}$ , мм вод.ст.					Швидкість $v_i$ , м/с $v_i = 4,429\sqrt{(1/\rho)} \times \sqrt{p_{\text{ді}}}$		
	$K_{Di}$	$K_{Di} \times \bar{D}$	$\beta = \frac{1}{K_T} = 0,576$			$\bar{p}$	$p_{\text{пі}}(p_{\text{ст}}) = \bar{p} \times \beta \times K_T$	$\beta = \frac{1}{K_T} = 0,576$			$\bar{p}$	$p_{\text{ді}} = \bar{p} \times \beta \times \sqrt{p_{\text{ді}}} \times K_T$			
			Показ ЗВТ					Показ ЗВТ							
$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_1$	$p_2$	$p_3$							
1			1	1,1	1,1	1,07	0,62	-0,05	1,1	1,2	1,2	1,17	0,67	0,82	3,4
2			1,1	1,2	1,1	1,13	0,65	-0,06	1,2	1,3	1,2	1,23	0,71	0,84	3,48
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															

$\bar{p}_{\text{п}} = 0,01$                        $\bar{p}_{\text{ст}} = -0,001$

$p_r = (p_a \pm \bar{p}_{\text{ст}})$                        $p_r = 752$                        $\bar{v} = 3,44$

$p_r/T_r = 752/298$                        $p_r/T_r = 2,523$

Густина газу  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>  $\rho = 0,359\rho_0 \times p_r/T_r$ ;  
 При  $\rho_0 = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>  $\rho = 0,463 p_r/T_r$ ;                       $\rho = 1,168$  кг/м<sup>3</sup>                       $\sqrt{1/\rho} = 0,925$

Об'ємна витрата  $q_v$  та  $q_{v0}$ , м<sup>3</sup>/с.  
 При робочих умовах  $q_v = \bar{v} S = 0,26$   
 При нормальних умовах  $0,359 q_v \times p_r/T_r$                        $q_{v0} = 0,235$

7 Температура навколишнього середовища, °C

$t_{\text{нс}} = 25$

Примітка. \_\_\_\_\_

Вимірювання виконали \_\_\_\_\_ Кириллова Т.І. \_\_\_\_\_ Подлуцький О.О.  
(підписи, прізвище та ініціали)

Перевірив \_\_\_\_\_ Кириллова Т.І. \_\_\_\_\_  
(підписи, прізвище та ініціали)

Представник підприємства \_\_\_\_\_ Козій І.С. \_\_\_\_\_  
(підписи, прізвище та ініціали)



## ДОДАТОК Г

Стан запиленості повітряного середовища в межах СЗЗ ПАТ «Сумихіпром»

Місце відбору проб	Концентрація, мг/м <sup>3</sup>		ГДК нас. пункт., мг/м <sup>3</sup>
	Експериментальні значення	Математична модель	
400 м від джерела	2,6	3,0	0,5
	2,1	2,4	0,5
	2,0	2,1	0,5
	1,9	1,85	0,5
	2,2	2,3	0,5
	1,8	1,9	0,5
	1,8	1,7	0,5
	1,7	2,0	0,5
	2,1	2,3	0,5
	2,3	2,4	0,5
500 м від джерела	2,0	1,7	0,5
	2,2	1,9	0,5
	1,6	1,52	0,5
	1,9	1,6	0,5
	1,5	1,45	0,5
	1,3	1,55	0,5
	1,2	1,4	0,5
	1,5	1,45	0,5
600 м від джерела	1,2	1,35	0,5
	1,8	1,6	0,5
	1,2	1,2	0,5
	1,2	1,1	0,5
	1,3	1,2	0,5
	1,1	1,25	0,5
	1,1	1,5	0,5
800 м від джерела	0,9	1,1	0,5
	1,4	1,0	0,5
	1	1,1	0,5
	0,9	1,0	0,5
	0,8	0,85	0,5
	0,8	0,7	0,5
	0,7	0,7	0,5
1000 м (межа СЗЗ)	0,75	0,65	0,5
	1,1	0,9	0,5
	0,9	0,7	0,5
	0,7	0,6	0,5
	0,6	0,5	0,5
	0,5	0,55	0,5
	0,6	0,65	0,5
0,8	0,75	0,5	

## ДОДАТОК І



ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор СумДУ, професор

Васильєв А.В.

12 \_\_\_\_\_ 2011 р.

## АКТ

Використання результатів дисертаційної роботи

Козій Івана Сергійовича

«ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ПИЛОВИХ  
ВИКИДІВ ПІДПРИЄМСТВ ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ»

Запропонована математична модель розрахунку розсіювання дрібнодисперсного пилу від стаціонарних джерел забруднення використовується в курсі лекцій з дисципліни «Моделювання та прогнозування стану навколишнього середовища» за темою «Моделювання рівня вмісту домішок в атмосфері», що викладається на кафедрі прикладної екології СумДУ.

Лабораторна модель розробленого дисертантом пінного апарату з провальними тарілками великих отворів використовується для проведення практичних занять за темою «Розрахунок апаратів мокрого пиловловлення» з дисципліни «Процеси та апарати природоохоронних технологій».

Зав.кафедрою

Прикладна екологія, д.т.н., проф. \_\_\_\_\_

Пляцук Л.Д.

Професор кафедри

Прикладна екологія, д.т.н., проф. \_\_\_\_\_

Філатов Л.Г.

Доцент кафедри

Прикладна екологія, к.е.н., доц. \_\_\_\_\_

Рибалов О.О.

### ДОДАТОК Д

Дослідження ефективності пиловловлення апарату з отворами тарілки 0,15 м та вільним перетином 23,5%

№ п/п	Щільність зрошення, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	Швидкість газу в апараті, м/с	Параметри ГПП на вході в апарат		Параметри ГПП на виході з апарату		Ступінь очищення, %
			Середня масова концентрація пилу, $10^{-3} \text{ г/м}^3$	Масова витрата пилу, $10^{-3} \text{ кг/с}$	Середня масова концентрація пилу, $10^{-3} \text{ кг/м}^3$	Масова витрата пилу, $10^{-3} \text{ кг/с}$	
1	10	2,5	3	0,56	0,774	0,145	74,2
2	10	3	3	0,68	0,594	0,134	80,2
3	10	3,5	3	0,79	0,495	0,130	83,5
4	12	2,5	3	0,56	0,645	0,121	78,5
5	12	3	3	0,68	0,456	0,103	84,8
6	12	3,5	3	0,79	0,342	0,090	88,6
7	15	2,5	3	0,56	0,285	0,053	90,5
8	15	3	3	0,68	0,114	0,026	96,2
9	15	3,5	3	0,79	0,045	0,012	98,5
10	18	2,5	3	0,56	0,234	0,044	92,2
11	18	3	3	0,68	0,081	0,018	97,3
12	18	3,5	3	0,79	0,024	0,006	99,2
13	20	2,5	3	0,56	0,225	0,042	92,5
14	20	3	3	0,68	0,072	0,016	97,6
15	20	3,5	3	0,79	0,012	0,003	99,6

## ДОДАТОК Е



МІНІСТЕРСТВО УКРАЇНИ З ПИТАНЬ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТА У СПРАВАХ  
ЗАХИСТУ НАСЕЛЕННЯ ВІД НАСЛІДКІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ  
**СУМСЬКИЙ ОБЛАСНИЙ ЦЕНТР З ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЇ**  
40000 м. Суми, вул. Героїв Сталінграду, 1 тел. (0542) 22-25-96, 27-42-43, факс 27-41-00  
e-mail: sumyweather@utel.net.ua ідентифікаційний код 21121370

18.02.2011р. № 05-53,3/ 49  
на № 808 від 16.02.2011р.

Генеральному директору  
ТОВ «Сумитеплоенерго»  
Пляцуку Л.Д.

На Ваш запит надаємо кліматичну характеристику за даними метеорологічної станції Суми.

Середня максимальна температура повітря найбільш жаркого місяця року, Т, °С	+25,0 <sup>0</sup>
Середня мінімальна температура повітря найбільш холодного місяця року, Т, °С	-4,5 <sup>0</sup>
Середня річна температура повітря	+6,6 <sup>0</sup>
Середня річна кількість опадів	603 мм
Середня річна відносна вологість повітря	78 %
Середньорічна роза вітрів, %	
Північний	9,4
Північно-східний	9,2
Східний	13,6
Південно-східний	17,5
Південний	12,1
Південно-західний	10,5
Західний	15,0
Північно-західний	12,7
Переважаючий напрямок вітру	Південно-східний
Швидкість вітру (за середніми багаторічними даними), повторення перевищення якої складає 5%	12-13 м/с
Максимальна зареєстрована швидкість вітру	34 м/с

Начальник

Вик. Літвінов Ю.І.  
221507



З.П. Кравченко

## ДОДАТОК Є

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Сумського ДНДІ «МІНДІП»



*[Signature]*  
С.В. Вакал

« 20 » 05 2011 р.

## АКТ

**Впровадження результатів дисертаційної роботи по підвищенню ефективності процесу пилоочищення відхідних газів при виробництві пігментного двоокису титану**

Роботу виконано на кафедрі Прикладної екології Сумського державного університету

Тема дисертаційної роботи «Зниження техногенного навантаження від пилових викидів підприємств хімічної промисловості», виконавець – асистент СумДУ Козій Іван Сергійович, науковий керівник - доц. Гурець Лариса Леонідівна.

У відповідності з планом науково-дослідних робіт кафедри Прикладної екології Сумського державного університету для проведення досліджень у промислових умовах був розроблений пилогазоочисний апарат для мокрого очищення газу. Дослідження ефективності пилоочищення проводилось на реальних пилогазових сумішах, які містили пил двоокису титану та ільменіту.

Випробування проводили за таких умов:

- навантаження установки по газовому потоку складало 1000 м<sup>3</sup>/год;
- концентрація пилу двоокису титану складала 2,5-3 г/м<sup>3</sup>;
- гідравлічний опір апарату складав 1300 Па.

На основі аналізів результатів випробувань зроблено такі висновки:

- встановлено роботоздатність пилогазоочисного апарату та його висока ефективність для очищення газів від пилу;



- гідравлічний опір апарату нижчий від гідравлічного опору апаратів інших конструкцій;
- рекомендувати пилогазоочисний апарат для широкого впровадження в промисловість.

Випробування показали, що запропонований апарат має високу ефективність очищення (ефективність пилоочистки 99,2 - 99,5%), низьку енергомісткість і стабільну роботоздатність за умов тривалої експлуатації.

Результати досліджень переданих Сумському ДНДІ «МІНДІП» повною мірою відповідають процесу очищення відхідних газів від пилу при виробництві двоокису титану і 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., доц.



Л.Л. Гурець

Відповідальний виконавець



І.С. Козій



## ДОДАТОК Ж

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора з наукових питань  
СП «Технополіс»

О.С. Шевченко



11 \_\_\_\_\_ 2011 р.

## АКТ

**Впровадження результатів дисертаційної роботи по  
підвищенню ефективності процесу пилоочищення відхідних газів при  
виробництві пігментного двоокису титану**

Роботу виконано на кафедрі Прикладної екології Сумського державного університету

Тема дисертаційної роботи «Зниження техногенного навантаження від пилових викидів підприємств хімічної промисловості», виконавець – асистент СумДУ Козій Іван Сергійович, науковий керівник - доц. Гурець Лариса Леонідівна.

У відповідності з планом науково-дослідних робіт кафедри Прикладної екології Сумського державного університету для проведення досліджень у промислових умовах був розроблений пилогазоочисний апарат для мокрого очищення газу. Дослідження ефективності пилоочищення проводилось на реальних пилогазових сумішах, які містили пил двоокису титану та ільменіту.

Отримані результати використовувались для розробки та проектування пилоочисного обладнання в виробництвах:

- утилізації відхідних газів при виробництві залізоокисних пігментів;
- утилізації пилогазових викидів при виробництві двоокису титану.

Від СП «Технополіс»

Головний інженер проекту

В.І. Овсяник

Від Сумського державного університету

Науковий керівник, к.т.н., доц.

Л.Л. Гурець

Відповідальний виконавець

І.С. Козій