

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Микитенко Максим Русланович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК _____

(індекс)

ДИСЕРТАЦІЯ

«Підвищення ефективності очистки аспіраційних викидів підвищеної
температури в скруберах з дисковими розпилювачами»

(назва дисертації)

Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Галузь знань 19 Архітектура та будівництво

(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Микитенко М. Р. 

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник (консультант) к.т.н., доц. Любарець Олександр Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Микитенко М. Р. Підвищення ефективності очистки аспіраційних викидів підвищеної температури в скруберах з дисковими розпилювачами. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільні інженерія». - Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2025.

Основний зміст дисертаційної роботи. Дисертація присвячена підвищенню ефективності очищення аспіраційних викидів з підвищеною температурою у пиловловлювачах циклонного типу з дисковими розпилювачами, які працюють із повторним використанням оборотної води, що містить механічні домішки. У роботі розглянуто проблеми знепилення повітряних викидів у виробництві будівельних матеріалів, де використання традиційних мокрих апаратів стикається з обмеженнями щодо ефективності очищення дрібнодисперсного пилу, енерговитратності та вимог до якості зрошувальної рідини.

У першому розділі дисертації представлено аналіз сучасних конструкцій пиловловлювальних апаратів та обґрунтовано доцільність застосування мокрих пиловловлювачів для очищення аспіраційних викидів. Встановлено, що такі апарати мають низку переваг: вони знижують ризик займання вибухонебезпечного пилу, усувають вторинне забруднення повітря та забезпечують одночасне видалення твердих, паро- і газоподібних домішок. Разом з тим, окреслено обмеження використання мокрих пиловловлювачів на підприємствах будівельних матеріалів, пов'язані з невисокою ефективністю уловлювання дрібнодисперсного пилу, вимогами до якості зрошувальної води та необхідністю очищення стічних вод. Проведено огляд теоретичних і експериментальних підходів до опису осадження аерозолів краплями рідини. Виявлено, що використання високорозвиненої краплинної поверхні та великої відносної швидкості між краплями і частинками може суттєво покращити ефективність очищення, однак потребує високих енерговитрат, як у випадку скруберів Вентурі. Зазначено недоліки існуючих моделей, зокрема відсутність достатньої кількості даних про вплив механічних домішок у зрошувальній рідині та відсутність адекватного математичного опису турбулентного руху в зоні взаємодії потоку з факелом розпилу, що зумовлює потребу у проведенні цілеспрямованих експериментальних досліджень. На основі проведеного аналізу сформульовано завдання дослідження, зокрема

вивчення дисперсного складу крапель, впливу умов запиленості та домішок у воді на ефективність очищення, а також гідродинамічних параметрів роботи дискових пиловловлювачів.

У другому розділі проведено теоретичне обґрунтування процесів взаємодії крапель рідини з частинками пилу та розглянуто основні закономірності диспергування рідини в розпилювачах. На основі аналізу фізичних процесів осадження аерозольних частинок встановлено, що ефективність пиловловлення значною мірою залежить від дисперсності крапель, яка, у свою чергу, визначається конструкцією та режимами роботи розпилювального пристрою, властивостями рідини та вмістом механічних домішок. Методом аналізу розмірностей виведено функціональну залежність для об'ємно-поверхневого діаметра крапель води й суспензії, яка враховує вплив концентрації твердих частинок. Одержано загальну формулу для розрахунку ефективності захоплення пилу факелом диспергованої рідини. Виявлено необхідність подальших експериментальних досліджень із використанням факторного аналізу для встановлення кількісного впливу параметрів розпилу та властивостей зрошувального середовища на ступінь очищення повітря при підвищених температурах. Результати розділу стали підґрунтям для формулювання загальної методики дослідження пиловловлення в наступних розділах та окреслення напрямів вдосконалення конструкції пиловловлюючих апаратів з дисковими розпилювачами.

У третьому розділі проведено комплексні експериментальні дослідження роботи пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем, призначеним для диспергування зворотної води з вмістом механічних домішок. Досліджено вплив гідродинамічних параметрів, конструктивних характеристик дискового розпилювача, а також властивостей рідини на формування крапельного факела. Отримано рівняння в критеріальному вигляді для розрахунку середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель суспензії та водопровідної води, що дало змогу оцінити вплив механічних домішок на дисперсність. Проведені лабораторні експерименти за планом повного факторного дослідження дозволили побудувати математичну модель процесу очищення та встановити оптимальні параметри функціонування апарата. Встановлено, що підвищена вологість запиленого потоку та вміст домішок у воді до $2,5 \text{ кг/м}^3$ позитивно впливають на ступінь очищення, тоді як підвищення температури знижує ефективність процесу. Отримано залежності для визначення краплевиносу та гідравлічного опору апарата, які разом з критеріальними рівняннями для ефективності

пиловловлення створюють основу для переходу до розробки промислової конструкції скрубера з дисковим розпилювачем.

У четвертому розділі представлено результати експериментального й аналітичного дослідження нового пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем, орієнтованого на очищення аспіраційних викидів підвищеної температури. Встановлено, що введення високодиспергованої рідини в обертний пилогазовий потік у центрі апарата забезпечує інтенсивну кінематичну коагуляцію частинок пилу та дозволяє досягти високої ефективності очищення – до 98,5% – навіть при використанні зворотної води з вмістом механічних домішок до 2,5 кг/м³. Досліджено вплив домішок на дисперсність крапель та доведено, що їх наявність сприяє зменшенню об'ємно-поверхневого діаметра крапель, підвищуючи ефективність пиловловлення. Побудовано математичну модель, яка враховує основні фактори процесу, включаючи фізичні властивості рідини, дисперсність пилу, вологість і гідродинамічні умови. Одержано критеріальні залежності для визначення гідравлічного опору апарата, що разом із розробленою методикою розрахунку стали основою для практичного застосування. Результати підтверджено промисловими випробуваннями на Київському заводі скловиробів, де було досягнуто значного економічного ефекту, а також розширено впровадження розробленої конструкції на низці інших підприємств.

Обсяг дисертації складає 175 сторінок, включає 41 рисунок, 19 таблиць, 128 джерел.

Ключові слова: аспіраційні викиди, дисковий розпилювач, диспергування рідини, механічні домішки, запилені потоки, ефективність пиловловлення, осадження крапель.

Список публікацій здобувача:

- 1) Любарець, О. П., Микитенко М. Р., «Аналіз складових чинників, що впливають на стан знепилення аспіраційних викидів». Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, т. 46, 2023, с. 89-108, doi:10.32347/2409-2606.2023.46.89-108
- 2) Микитенко М. Р., «Математичне моделювання та аналіз ефективності руху

частинок у циклонних розпилювальних апаратах». Просторовий розвиток, зб. 11, 2025, с. 456-463, doi:10.32347/2786-7269.2025.11.456-463

3) Oleksandr Liubarets, Maksym Mykytenko, «EVALUATION OF EFFICIENCY AND OPTIMISATION OF CYCLONE-TYPE DUST COLLECTORS WITH A CIRCULAR SPRAY OF REVERSIBLE SUSPENSION FOR GAS PURIFICATION UP TO 250 °C», Innovative Solutions In Modern Science № 3(67), 2025, New York “TK Meganom LLC”, p. 5-54, doi:10.26886/2414-634X.3(67)2025.1

4) Любарець, О. П., Микитенко М. Р., «Дослідження впливу конструкції дискового розпилювача на ефективність пиловловлення в умовах високотемпературних потоків». Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, т. 52, 2025, с. 69-84, doi: 10.32347/2409-2606.52.69-84

5) Любарець О.П., Микитенко М.Р., «Систематизація повітро- та газоочисних пристроїв з рідинним середовищем для уловлювання пилу та абсорбції шкідливих забруднень». Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, т. 53, 2025, с. 20-32. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.53.20-32>

Участь у наукових конференціях:

1) III Міжнародна науково-практична конференція «Екологія, ресурси, енергія», Київ, 23-25 листопада 2022 р.

2) II Міжнародна наукова конференція «Розвиток наук в умовах нової реальності: проблеми та перспективи» м. Київ, 3 травня 2024 р.

3) V Міжнародна науково-практична конференція «Енергія. Ресурси. Екологія» м. Київ, 27-29 листопада 2024 р.

Опубліковано тез або виступів:

1) Любарець О. П., Микитенко М. Р., «Аналіз складових чинників, що впливають на стан знепилення аспіраційних викидів». Міжнародна науково-практична конференція «Екологія, ресурси, енергія», Київ, 23-25 листопада 2022 р.

2) Любарець О. П., Микитенко М. Р., «Дослідження ступеня очищення аспіраційних викидів ливарних та будівельних цехів, в пиловловлювачі з дисковим розпилювачем». II Міжнародна наукова конференція «Розвиток наук в умовах нової реальності: проблеми та перспективи» м. Київ, 3 травня 2024 р.

3) Любарець О. П., Микитенко М. Р., «Аналіз впливу основних факторів на процес пиловловлення в пиловловлювачах з дисковими розпилювачами». Міжнародна науково-практична конференція «Екологія, ресурси, енергія», Київ, 27-29 листопада 2024 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
РОЗДІЛ 1. Аналіз існуючих методів та обладнання для очищення аспіраційних викидів з підвищеною температурою.....	12
1.1. Характеристика та джерела утворення аспіраційних викидів з підвищеною температурою в різних галузях промисловості.....	12
1.2. Аналіз існуючих методів очищення газових викидів від пилу.....	16
1.3. Аналіз ефективності пиловловлювачів різних типів для високотемпературних викидів.....	29
1.4. Скрубери з дисковими розпилювачами: конструкція, принцип дії та застосування.....	46
1.5. Висновки, проблеми та напрямки удосконалення пиловловлення.....	52
РОЗДІЛ 2. Розробка математичної моделі процесу пиловловлення в циклонному пиловловлювачі з дисковим водорозпилювачем.....	54
2.1. Фізична модель процесу пиловловлення: аналіз сил, що діють на частинки пилу та краплі рідини в циклонному пиловловлювачі.....	54
2.2. Математичне моделювання дисперсності крапель в циклоні з дисковим розпилювачем.....	60
2.3. Висновки по другому розділу.....	64
РОЗДІЛ 3. Експериментальні дослідження впливу параметрів процесу на ефективність пиловловлення.....	65
3.1. Опис експериментальної установки та методики проведення досліджень.....	65
3.2. Дослідження впливу дисперсності пилу на ефективність пиловловлення.....	77
3.3. Вплив основних факторів на ефективність процесу пиловловлення в пиловловлювачах з дисковими розпилювачами.....	115
3.4. Висновки по другому розділу.....	117

РОЗДІЛ 4. Обґрунтування параметрів та розробка рекомендацій з удосконалення конструкції циклонного пиловловлювача з дисковим водорозпилювачем.....	119
4.1. Аналіз впливу конструктивних параметрів дискового розпилювача на дисперсність розпилювальної рідини.....	119
4.2. Оптимізація параметрів процесу пиловловлення на основі експериментальних досліджень та математичної моделі.....	122
4.3. Розробка рекомендацій щодо вдосконалення конструкції дискового водорозпилювача для підвищення ефективності пиловловлення.....	125
4.4. Характеристика аспіраційних викидів сушильних установок на прикладі процесу сушіння піску.....	131
4.5. Виробничі дослідження пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем.....	131
4.6. Схеми аспіраційних систем з дослідно-промисловими зразками пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем на заводі Заводі імені В. О. Малишева.....	134
4.7. Виробничі дослідження пиловловлювача із зовнішньою рециркуляцією води при очищенні аспіраційних викидів від органічного пилу.....	140
4.8. Узагальнення результатів досліджень та аналіз ефективності пиловловлювача з дисковим розпилювачем.....	141
4.9. Методика розрахунку ефективності та конструктивних параметрів пиловловлювача з дисковим розпилювачем.....	143
4.10. Практичне впровадження пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем.....	147
4.11. Розрахунок річного економічного ефекту від впровадження пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем.....	148
Загальні висновки з дисертаційної роботи.....	153

ВСТУП

В умовах науково-технічного прогресу та стрімкого розвитку всіх галузей економіки особливого значення набувають питання охорони навколишнього середовища та раціонального використання природних ресурсів.

У комплексі заходів з охорони навколишнього середовища, що спрямовані на збереження та відтворення природних умов, необхідних для життя людини, значна увага приділяється контролю чистоти атмосферного повітря у містах і промислових районах. Ефективним способом захисту довкілля від пилу та шкідливих газів, що викидаються в атмосферу промисловими підприємствами, є впровадження удосконалених технологічних процесів і енергетичних установок, які мінімізують шкідливі викиди.

Попри використання технологічних процесів, що зменшують кількість шкідливих викидів, вентиляційні викиди на промислових підприємствах часто містять значні концентрації пилу. Наприклад, на скляних заводах концентрація пилу у викидах досягає $(700-900) \cdot 10^{-6}$ кг/м³. Понад 70% порошинок мають розміри $5 \cdot 10^{-6}$ м. Вміст вільного двоокису кремнію у пилу становить 74-75%. У ливарних цехах із виробництва санітарно-технічних виробів вентиляційні викиди містять ливарний пил, концентрація якого становить $(300-5000) \cdot 10^{-6}$ кг/м³.

Очищення повітря є одним із ключових заходів для створення сприятливих санітарно-гігієнічних умов праці та, у деяких випадках, для підвищення якості продукції та надійності роботи обладнання.

За останні десятиліття техніка пиловловлення постійно вдосконалювалася. Сучасні комплекси пиловловлюючих апаратів за умови правильної експлуатації забезпечують високий рівень очищення повітря.

Для сухого пиловловлення розроблено різні типи фільтрувальних апаратів з тканинних матеріалів, які забезпечують ступінь очищення до 99% для дрібнодисперсного пилу.

Використання сухого очищення газів тканинними фільтрами має певні обмеження: високий аеродинамічний опір, обмежений термін служби, складність регенерації, необхідність попереднього очищення при високих концентраціях пилу, значні капітальні та експлуатаційні витрати. Найбільш поширеними інерційними апаратами сухого очищення є циклони, які є малоефективними для вловлення частинок пилу діаметром менше $10 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

У ряді випадків ефективним методом пиловловлення є мокрий спосіб, який останнім часом активно застосовується у промисловості.

Серед методів мокрого пиловловлення суттєві переваги має фільтрація запилених потоків через високошвидкісний факел водяних крапель, що утворюється дисковими розпилювачами рідини [1-3].

У цій роботі представлені результати досліджень апарату для очищення аспіраційних викидів, що містять дрібнодисперсний пил і мають підвищену температуру (до 150°C) з використанням дискових водорозпилювачів. Такі апарати стійко працюють на оборотній воді із концентрацією механічних домішок до $2,5 \text{ кг/м}^3$.

Робота містить аналіз досліджень мокрих пиловловлювачів, характеристику основних технічних засобів уловлювання пилу з газів, а також дослідження механізму взаємодії пилогазового потоку з дисперговою рідиною [4-6]. Сформульовано мету та завдання дослідження.

Робота містить вибір об'єкта досліджень та обґрунтування прийнятих методів вимірювань та конструкцій приладів щодо визначення витрат повітря та води, гідравлічних опорів, концентрації та дисперсного складу експериментального та промислового пилу.

Основна частина роботи присвячена експериментальному дослідженню пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем рідини.

Проведено аналіз факторів, що впливають на ефективність пиловловлення у досліджуваний установці. Наведено результати вивчення пиловловлюючої здатності факела розпику за підвищених температур і різної вологості запиленого потоку, а також впливу механічних домішок у воді на ефективність пиловловлення.

Визначено оптимальні режими роботи установки для очищення вентиляційного повітря від дрібнодисперсного пику.

Представлено результати виробничих досліджень цього типу апарату, викладено методику його розрахунку, а також оцінено ефективність впровадження та економічну доцільність його використання.

Дисертаційну роботу виконано за результатами досліджень, проведених у лабораторії обладнання для очищення вентиляційних викидів науково-дослідного інституту санітарної техніки та інженерних споруд.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ АСПІРАЦІЙНИХ ВИКИДІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ.

1.1. Характеристика та джерела утворення аспіраційних викидів з підвищеною температурою в різних галузях промисловості

1.1.1. Характеристика аспіраційних викидів чавуноливарного виробництва

Основними джерелами забруднення атмосфери на підприємствах санітарно-технічного обладнання є пил, що утворюється в процесі приготування формувальних та стрижневих сумішей, вибивання та очищення лиття тощо.

Особливо інтенсивним пилоутворенням супроводжуються процеси сушіння, помелу, просіювання, транспортування та змішування окремих компонентів сумішей. Велика кількість пилу утворюється при обробці виробів на абразивних, повстяних та матер'яних колах, у галтувальних барабанах і дробоструминних камерах та ряду інших операцій.

У зв'язку з тим, що для виготовлення однієї тонни лиття використовується до 4 т формувальних сумішей (піску, глини ін.), компоненти які необхідно висушувати, просіювати, транспортувати тощо, на ділянках приготування сумішей виділяється до 800 мг/м³ повітря. Наявність піску та глини, що містять вільну SiO₂, регламентує допустиму концентрацію на робочих місцях 2 мг/м³ повітря.

Викиди вентиляційного повітря на підприємствах промисловості санітарно-технічного обладнання за даними натурних обстежень (додаток 1, табл. П1.1-П1.4) різні за кількістю, різноманітні за шкідливими речовинами, що містяться в них, і розосереджені по території промислових підприємств.

Дані натурних обстежень (див. табл. П1.1-П1.4) показують, що пил є найбільш масовим після окису вуглецю забруднювачем повітря.

Різнманітність застосовуваної сировини, палива та технологічних процесів у промисловості, зумовлює утворення аерозолів і пилу з різними

фізико-механічними та хімічними властивостями, які можна розділити на наступні групи [7]:

а) аерозолі, що утворюються при дробленні та транспортуванні (при пересипанні) матеріалів, які характеризуються високою дисперсністю твердої фракції (вміст часток розміром <5 мкм сягає 65%) при вмісті вологи і температурі навколишнього середовища;

б) аерозолі сушильних барабанів для піску та добавок, що містять як великі, так і дрібні частинки і мають температуру $70-150^{\circ}\text{C}$ при підвищеному вмісті вологи газу (до 110 г/кг сухого газу);

в) аерозолі, що виділяються при очищенні чавунних виробів, які характеризуються наявністю як великих, так і дрібних частинок, сажистих і металевих включень і продуктів зкріплювачів, що розклалися;

г) аерозолі, що виділяються при емалюванні чавунних та сталевих виробів;

д) аерозолі, що виділяються при шліфуванні та поліруванні виробів, які відрізняються наявністю волокнистого пилу при вологовмісті та температурі навколишнього середовища;

е) аерозолі, що утворюються в процесі фарбування виробів (є пожежо- та вибухонебезпечними).

Дисперсний склад пилу є однією з найважливіших характеристик твердої фази аерозолів.

Більші частинки є продуктом механічного винесення сировинної суміші, дрібніші частинки утворюються при конденсації лужних та інших сполук, що виганяються в зоні високих температур.

Дисперсність пилу вкрай непостійна та залежить від технологічного режиму.

Дисперсний склад пилу, що містяться у вентиляційних викидах ливарних цехів чавуноливарних заводів та складових цехів скляної промисловості, представлений на рис. 1.1. Розташування кривих дисперсного складу пилу у III та IV зонах класифікаційної номограми вказує на його

належність до середньо- та дрібнодисперсного пилу. Більше 50% хімічного складу становить SiO_2 , що робить цей пил силікоzoneбезпечним і складним для вловлювання [8].

1.1.2. Огляд пиловловлюючого обладнання, що використовується на заводах будівельної індустрії України

Проведений аналіз пиловловлюючого обладнання, що використовується на підприємствах будівельної галузі в Україні, показав, що на сьогоднішній день заводи оснащуються переважно одно- та двоступеневими системами аспірації, які можуть здійснювати як сухе, так і мокре очищення запиленого повітря.

Одноступеневі апарати сухого очищення застосовуються на підприємствах, де відбувається попереднє очищення повітря з великими та середніми за розміром частками пилу (25–50 мкм). Для цього переважно використовуються сухі циклони, інерційні пиловловлювачі, рукавні або касетні фільтри. Сухі циклони є найбільш поширеними на підприємствах з виробництва цементу, вапна, гіпсових виробів, а також на дробильно-сортувальних дільницях, де концентрація пилу висока, а дисперсність відносно велика (понад 40–50 мкм).

На підприємствах, що спеціалізуються на виробництві будівельних сумішей, сухе очищення, як правило, є першою ступінню аспірації. Друга ступінь очищення повітря – це переважно мокрі пиловловлювачі, які застосовуються для уловлювання дрібнодисперсних частинок пилу (до 25 мкм і менше). Типовими апаратами для мокрої очистки є скрубери різних конструкцій (наприклад, барботажні, форсуночні, пінні, Вентурі-скрубери, скрубери з дисковими та роторними розпилювачами).

Особливе місце серед таких систем займають пиловловлювачі циклонного типу з дисковими водорозпилювачами. Вони ефективно забезпечують уловлювання дрібнодисперсного пилу, що утворюється при виробництві сухих будівельних сумішей, штукатурок, гіпсових шпаклівок, цементних розчинів. Перевагою таких систем є висока ефективність

очищення (до 98%), низькі експлуатаційні витрати, можливість рециркуляції технологічної води, а також утворення шламу або пульпи, які можуть повторно використовуватися у виробничому процесі як вторинна сировина.

Утворений у процесі очищення повітря шлам або пульпа може використовуватися у подальших технологічних процесах, наприклад, при виробництві цементних та будівельних розчинів, плитних матеріалів, а також як сировина для виробництва керамічної продукції.

Таким чином, впровадження двоступеневих аспіраційних систем із застосуванням циклонних пиловловлювачів з дисковими розпилювачами є перспективним напрямом модернізації пиловловлюючого обладнання на підприємствах будівельної індустрії України. Це дозволяє не лише знизити концентрацію шкідливих викидів до рівнів, визначених національними та європейськими екологічними стандартами, але й забезпечити ресурсозберігаючий підхід, що відповідає вимогам сталого розвитку.

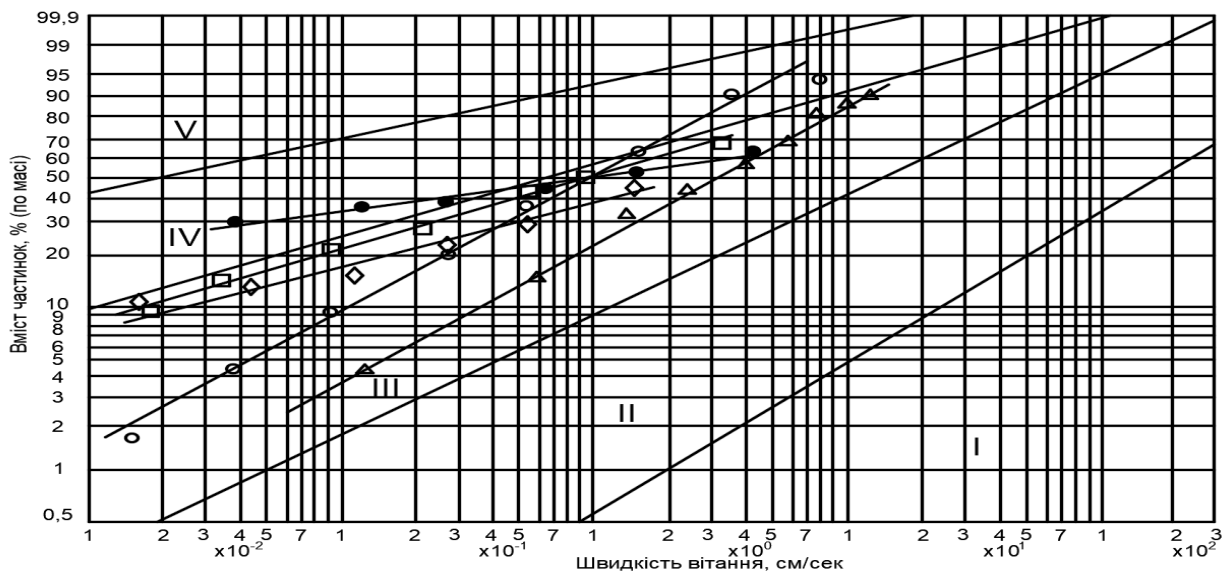


Рис. 1.1 Класифікаційна номограма (I-V групи пилу по їх дисперсності):

Δ - ливарний пил в викидах заводу ім. В.О. Малишева (м. Харків); о - пил кварцевого піску в вентиляційних викидах Львівського мехсклозаводу; ◇, ● - пил у зоні обслуговування ваг та змішувача шихти на Львівському мехсклозаводі; □ - пил обпаленого доломіту у викидах Київського механізованого склотарного заводу.

1.2. Аналіз існуючих методів очищення газових викидів від пилу

Дуже ефективними апаратами для уловлювання дрібнодисперсного силікоzoneбезпечного пилу (див. рис. 1.1) є мокрі пиловловлювачі. Серед наявних апаратів для очищення повітря від пилу вони відрізняються найбільшою різноманітністю конструкцій та форм виконання. Велика кількість модифікацій цих апаратів пояснюється різними поєднаннями конструктивних форм пиловловлювача та станів рідкої фази, яка може бути у вигляді плівки, піни, крапель або їх поєднання.

Залежно від стану рідкої фази пиловловлювачі поділяються на такі групи [9]:

- 1) апарати, у яких осадження пилу відбувається на плівку рідини;
- 2) пінні апарати;
- 3) турбулентні пиловловлювачі, в яких частинки пилу взаємодіють з краплями рідини;
- 4) конденсаційні апарати.

У більшості пиловловлювачів поряд з будь-яким основним ефектом використовуються також допоміжні, тому дана класифікація є умовною. Основний механізм пиловловлення у всіх цих апаратах інерційний.

Апарати першої групи поділяються на дві підгрупи:

- а) апарати, у яких розвиток поверхні водяної плівки здійснюється за допомогою насадок;
- б) апарати, у яких водяна плівка створюється на криволінійній поверхні корпусу апарату.

Характерною особливістю апаратів підгрупи «а» є процес осадження аерозолів на змочені поверхні в результаті численних поворотів пилегазового потоку при русі через насадки. До них відносяться конструкції скрубєрів з різними насадками (з рейок, гравію, кілець Рашига) ударно-змивні апарати та ін.

У скруберах з насадкою газу зазвичай вводяться знизу, а промивна рідина зверху. За експериментальними даними [10], каоліновий пил з 42%-м вмістом частинок розміром $5 \cdot 10^{-6}$ м уловлюється на 76%. Щільність зрошення у цих пиловловлювачів становить до $2,5 \text{ кг/м}^3$. При швидкостях газу близько $0,8\text{-}1,25 \text{ м/с}$ апарати громіздкі, а гідравлічний опір сягає 800 Па .

Пиловловлювач ударно-змивної дії уловлює пил завдяки використанню інерції частинок та відцентрових сил, що виникають при різких поворотах повітряного потоку між поверхнями, змоченими водяною плівкою. Апарат ефективно вловлює пил з частинками понад $10 \cdot 10^{-6}$ м при питомій витраті води $0,26\text{-}0,51 \text{ кг/м}^3$. Аеродинамічний опір пиловловлювача становить $440\text{-}640 \text{ Па}$.

У скруберах з псевдозрідженою кульовою насадкою взаємодія газів з рідиною та порожнистими кулями відбувається інтенсивно, оскільки циркулююча насадка, турбулізує потік, що сприяє кращому контакту фаз при багаторазовому оновленні міжфазної поверхні [11-13]. Ефективність цих апаратів досягає 99% при уловлюванні частинок пилу розміром $2 \cdot 10^{-6}$ м, однак гідравлічний опір при цьому становить $1500\text{-}2000 \text{ Па}$.

До підгрупи "б" першої групи належать апарати, у яких використовується відцентровий ефект виділення пилу з пилоповітряного потоку на криволінійну поверхню, змочену водою. До них відносяться циклон з водяною плівкою, відцентровий скрубер ВТІ, циклон-промивач та ін.

Циклони ефективно вловлюють частинки з діаметром понад $10 \cdot 10^{-6}$ м при гідравлічному опорі $400\text{-}840 \text{ Па}$. Більш ефективним є циклон з підвищеною швидкістю, але він має вищий гідравлічний опір - $840\text{-}2060 \text{ Па}$.

Крім циклону з водяною плівкою, існують інші конструкції мокрих відцентрових пиловловлювачів, які називаються мокрими відцентровими скруберами. Відцентрові скрубери, що застосовуються на практиці,

конструктивно можна розділити на два види: апарати з тангенціальним підведенням газів (скруббер ВТІ) та апарати, в яких обертання газового потоку здійснюється за допомогою спеціальних напрямних лопаток.

За конструктивним виконанням відцентровий скруббер ВТІ аналогічний конструкції циклону ЛПОТ з водяною плівкою.

Відмінна особливість циклону-промивача полягає в тому, що пиловловлення частково підвищується шляхом промивання повітря водою, що розпорошується повітряним потоком. Ефективність очищення аспіраційних викидів, що містять пил з медіанним діаметром частинок $5 \cdot 10^{-6}$ м, при номінальній витраті повітря за даними [14] становить 90%. Аеродинамічний опір апарату при цьому досягає 1300 Па.

Однак, у циклоні-промивачі при дробленні води повітряним потоком утворюються крупнодисперсні краплі.

До другої групи належать пиловловлювачі, у яких як фільтрувальний шар використовується рухома водяна піна. Поглинання аерозолів при барботажі за даними Н. А. Фукса [15], відбувається завдяки інерційному осадженню, седиментації та дифузії.

Ці апарати мають значний гідравлічний опір - у барботажних до 2900 Па при витраті води 0,4-1,0 кг/м³ повітря, що очищається [16]. Їх недоліки - велика металомісткість та значне утворення бризок.

Пінні пиловловлювачі, що широко застосовуються для технологічного очищення газів, недостатньо пристосовані до умов експлуатації, характерних для вентиляційних систем, та широкого поширення на заводах промисловості санітарно-технічного обладнання не отримали.

Залежно від способу диспергування рідини пиловловлюючі апарати третьої групи поділяються на три підгрупи:

а) форсуночні скрубери, де диспергування здійснюється за допомогою форсунок;

- б) апарати, у яких дроблення рідини здійснюється за рахунок енергії газоповітряного потоку;
- в) динамічні газопромивачі, де диспергування рідини здійснюється механічною енергією ротора-розпилювача, що обертається.

До підгрупи «а» належать форсуночні скрубери, мокрі пиловловлювачі конструкції “ВЦМ-Р”, порожнисті скрубери конструкції “СПВ-2”, циклонні зрошувальні скрубери "Піз-Антоні" та ін.

У форсуночних скруберах (рис.1.2 а, б) ефективно вловлюються частинки пилу розміром понад $10 \cdot 10^{-6}$ м. Частинки свинцевого пилу розміром $2 \cdot 10^{-6}$ м уловлюються на 60%. Скрубери набули широкого поширення переважно для охолодження та зволоження газу, необхідних для подальшого тонкого очищення газу.

Завдяки використанню відцентрових сил у циклонному зрошувальному скрубери "Піз-Антоні" (рис. 1.2 г) ступінь очищення промислових викидів збільшується за рахунок використання відцентрових сил обертового потоку. За даними Уайта П. і Сміта С. [17] ступінь очищення газу від пилу з $b_{50} = 4 \cdot 10^{-6}$ м становила 92%. Гідравлічний опір апарату досягав 500-1500 Па при питомій витраті води 0,4-1,3 кг/м³ газу, що очищається.

Недоліком скруберів зрошувального типу є:

- а) недосконалий розпил рідини;
- б) засмічення форсунок, за наявності у рідині механічних домішок.

До підгрупи «б» пиловловлюючих апаратів можна віднести такі [18-22]: барботажно-вихрові пиловловлювачі (барботажно-вихровий пиловловлювач, мокрий пиловловлювач), пиловловлювач з повітроочисним каналом ПВМ, ротоклон типу "N", омікрон "Шнакенберг", скрубер ФРН, скрубер Вентурі та ін, конструктивні варіанти яких наведені на рис. 1.3.

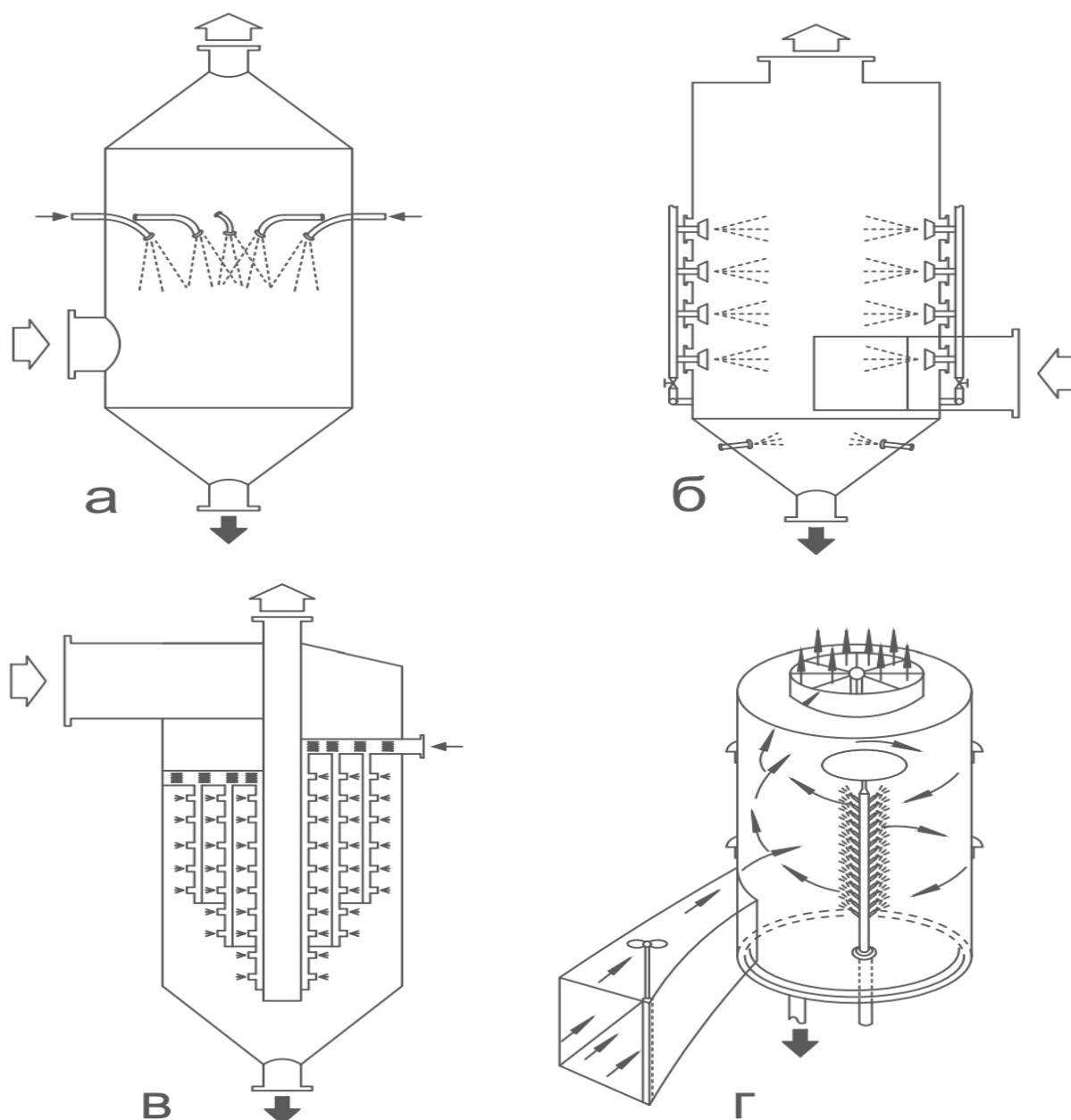


Рис. 1.2 Апарати з форсунковим диспергуванням рідини:

а - форсуночний скруббер з вертикальним розпилом рідини; б - скруббер з бічним розташуванням форсунок; в - відцентровий мокрий пиловловлювач; г - циклонний зрошувальний скруббер «Піз-Антоні» (Італія).

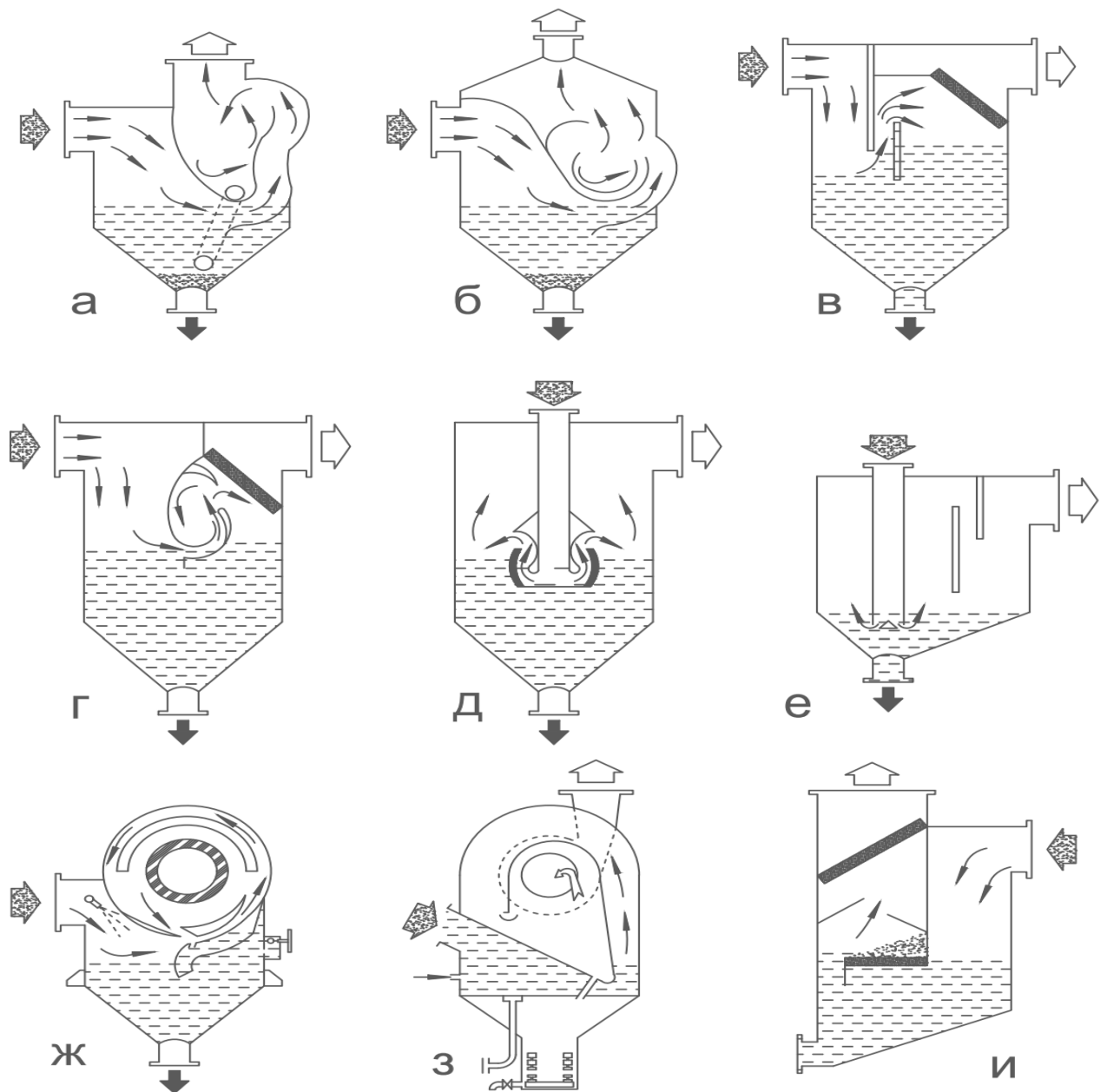


Рис. 1.3 Конструктивні варіанти барботажно-вихрових пиловловлювачів:

а - барботажно-вихровий пиловловлювач; б - мокрий пиловловлювач; в - пиловловлювач ПВМ; г — ротоклон; д — «Омікрон»; е - скруббер Дойля; ж - скруббер «ФРГ» (Німеччина); з - пиловловлювач «Fluomix» (Франція); и - пиловловлювач «АРГ-ФМ».

У поширених барботажно-вихрових пиловловлювачах пилогазова суміш прориває шар води, дробить при цьому частину рідини на краплі, разом з якими рухається далі каналами складної форми.

Ступінь очищення газу, що досягається до 99%, наприклад, у ротоклоні типу "N" (див. рис. 1.3 г), визначається швидкістю газів у каналі, яка не перевищує 15 м/с. Рідина, захоплена газовим потоком, переміщається вздовж каналу як турбулентний шар. Розмір крапель, що утворюються при цьому, становить $(300-400) \cdot 10^{-6}$ м при витраті води 0,3 кг/м³ газу, що очищається.

Всі пиловловлювачі цієї підгрупи характеризуються наявністю в їх конструкції ємності, заповненої водою. Повітря, що очищається, контактує з водою, насичуючи її пилом. Шлам, що накопичується в нижній частині ємності, видаляється механічним транспортером або зливається періодично.

У промисловості санітарно-технічного обладнання застосовуються пиловловлювачі типу Омікрон.

Апарати цієї підгрупи мають значний гідравлічний опір порядку 1500 Па і металоємність, яка в Омікроні, наприклад, становить 350 кг на 1000 м³/год повітря, що очищається [23].

Особливо слід зазначити турбулентні промивачі скрубери Вентурі (рис. 1.4). Широке застосування в інших галузях народного господарства пояснюється високим ступенем очищення газу навіть за уловлюванням дуже дрібних частинок. У конфузорі та горловині труби Вентурі відбувається дроблення води газовим потоком великої швидкості (60-150 м/с) на дрібні крапельки $(1-10) \cdot 10^{-6}$ м, швидкість переміщення яких менша за швидкість руху частинок пилу. Різниця швидкостей частинок пилу та крапель рідини, а також висока турбулентність потоку сприяє зіткненню частинок пилу з краплями та їх інтенсивної коагуляції.

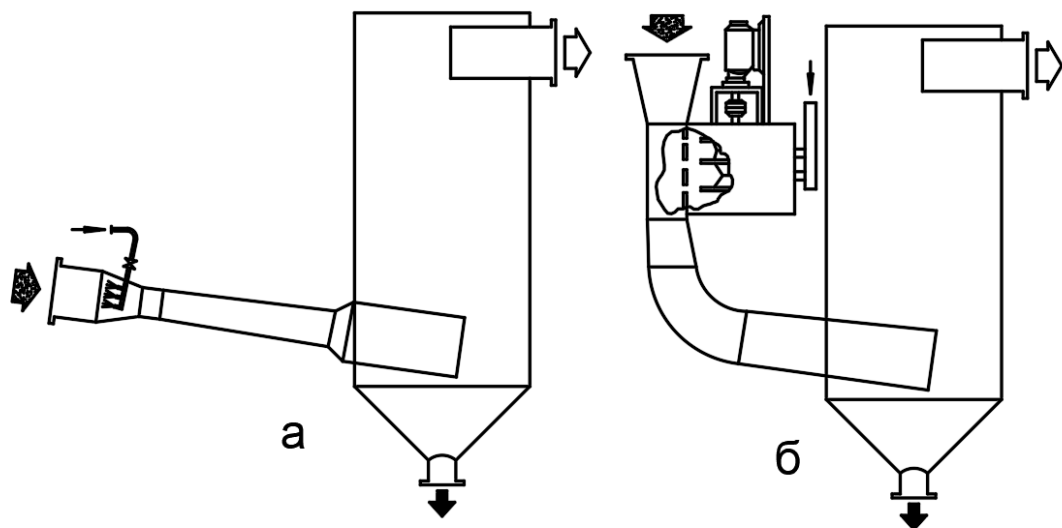


Рис. 1.4 Конструктивні схеми скруберів Вентурі

а - труба Вентурі з краплевловлювачем; б - труба Вентурі з дисковим розпилювачем та краплевловлювачем.

Скрубери Вентурі характеризуються високим ступенем очищення газу (рис. 1.4 а), великими гідравлічними втратами до 15000 Па [24] та необхідністю встановлення краплевловлювачів.

В наш час через велику енергоємність скрубери Вентурі не знайшли застосування в промисловості санітарно-технічного обладнання.

Турбулентні газопромивачі застосовуються, головним чином, для очищення промислових викидів від мікронного та субмікронного пилу. Менш енергоємні труби Вентурі з дисковими розпилювачами (рис. 1.4 б) поширені на асфальтобетонних заводах.

Підгрупу складають апарати, в яких диспергування здійснюється механічними розпилювачами: вентиляторні мокрі пиловловлювачі (вентиляторні пиловловлювачі ВМП, ротоклон W (США), дезінтегратори, і апарати з поверхнею контакту фаз, що утворюється у вільному обсязі [25].

Відмінною рисою вентиляторних апаратів є застосування для пиловловлювання зрошуваних водою лопатей колеса вентилятора або

дезінтегратора, що обертаються, і вплив на частинки пилу сил Коріоліса, які за своєю величиною можуть бути зрівнянні з відцентровими силами.

Гідравлічний опір пиловловлювача ВМП залежить від швидкості повітря на вході у вентилятор і коливається в межах 200-500 Па.

Недоліком таких пиловловлювачів є швидке зношування колеса при роботі з абразивним пилом.

У зарубіжній практиці (США) вентиляторний мокрий скруббер (ротоклон W із зволоженням) широко застосовується для знепилювання [26-29]. Під дією відцентрової сили частинки пилу відкидаються з відігнутої частини лопатей і вловлюються плівками рідини, що стікають по них, а потім відводяться у відстійник.

Витрата рідини становить 0,13-0,2 кг/м³ газів. Споживана електроенергія для обробки 1000 м³/год газів становить 0,8 кВт*год. Ефективність очищення за даними [30] досягає 85% для часток пилу діаметром $2,5 \cdot 10^{-6}$ м. Гідравлічний опір ротоклону становить 1600-2300 Па.

Ефективність дезінтеграторів за даними [31] досягає 90-95% при уловлюванні частинок розміром $10 \cdot 10^{-6}$ м та питомій витраті води 0,5-1,5 кг/м³ газу. Однак, для досягнення очищення із залишковою концентрацією пилу $50 \cdot 10^{-6}$ кг/м³ в дезінтегратор необхідно подавати охолоджений до 60°C газ із вмістом пилу не більше $2 \cdot 10^{-3}$ кг/м³. При цьому витрата електроенергії становить 6 кВт*год. на 1000 м³ газу на годину.

Широке поширення знайшли апарати з поверхнею контакту фаз, що утворюється у вільному обсязі, конструктивні варіанти представлені на рис. 1.5.

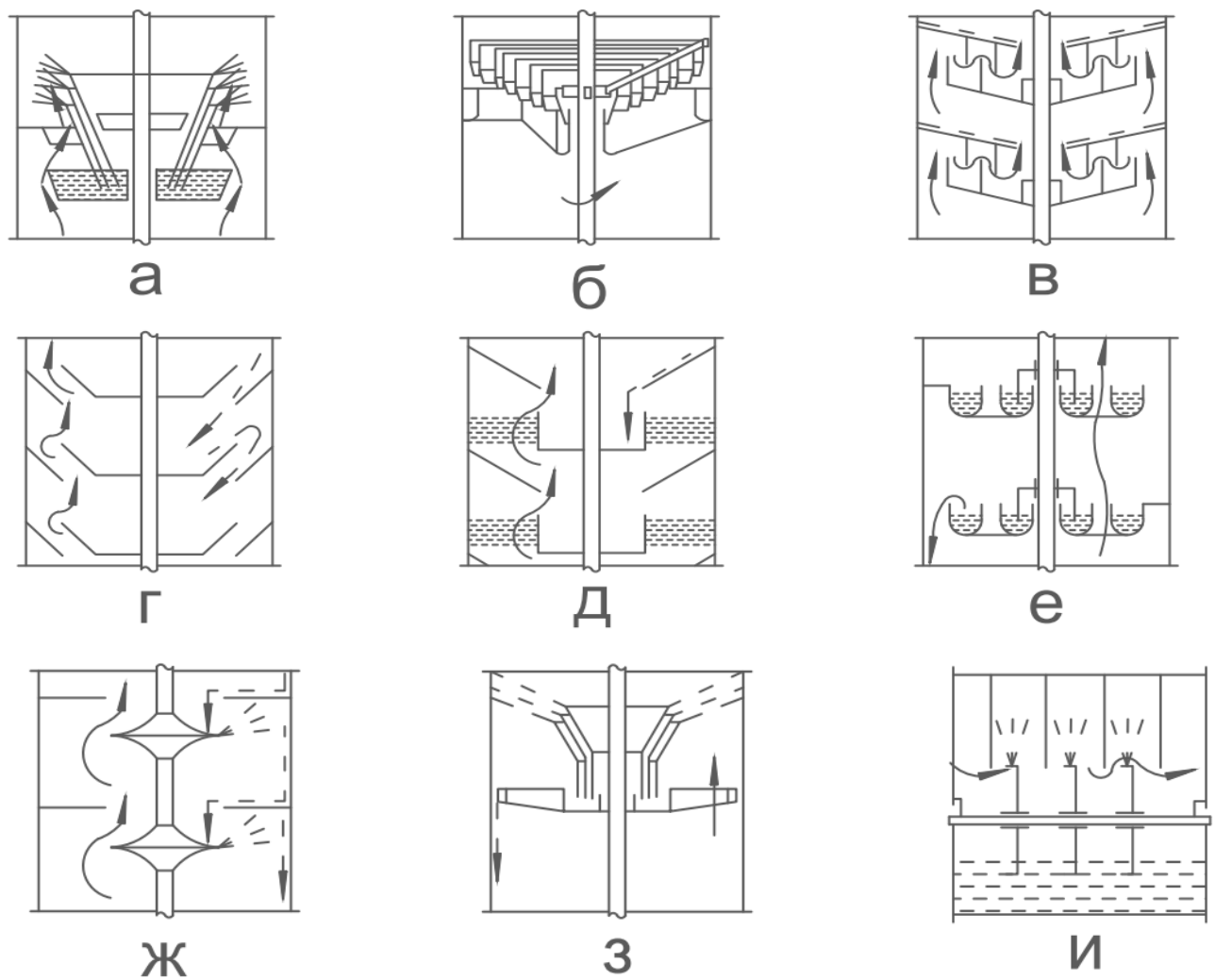


Рис. 1.5 Конструктивні схеми апаратів з поверхнею контакту фаз у вільному об'ємі:

а - абсорбер Фельда з занурювальним конусом, що обертається; б - абсорбер Сафріна з занурювальним конусом, що обертається; в - роторний апарат системи В. С. Ніколаєва; г - апарат з обертовими та нерухомими перегородками; д - апарат з обертовими корзинами та нерухомими перегородками; е - ударно-розпилювальний контактний пристрій Кіршбаумана та Штора; ж - апарат з дисками, що обертаються; з - апарат з тарілками, що обертаються; и - апарат з мішалками, що обертаються.

У хімічній промисловості, наприклад, знайшли широке застосування різні конструкції абсорберів з розпилювачами, що обертаються (абсорбери Фельда і Сафріна, див. рис. 1.5 а, б), призначені не тільки для очищення газів від газових домішок, а й для охолодження і очищення доменних газів [32-35]. У таких апаратах було отримано високі коефіцієнти масопередачі при абсорбції вуглекислого газу та ацетону.

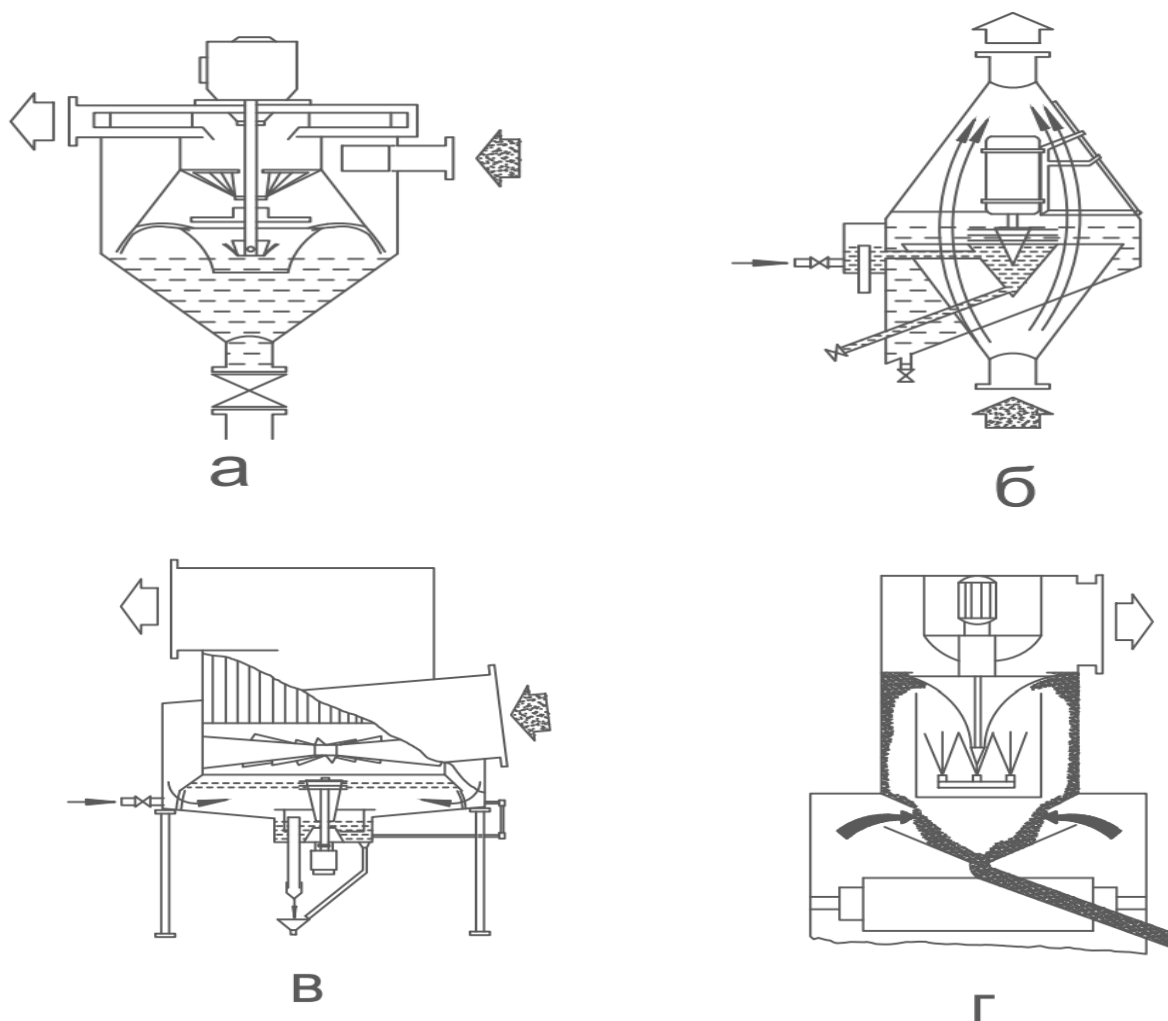


Рис. 1.6 Конструктивні схеми пиловловлювачів з розпилом рідини:

а - фільтр для очистки газового потоку від пилу; б - пиловловлювач з перехрестною взаємодією контактуючих фаз; в - мокрий пиловловлювач; г - пиловловлювач з сіткою що обертається.

Конструкція фільтра для очищення газового потоку від пилу (рис. 1.6 а) дозволяє диспергувати рідину, що містить тверді домішки. Однак, суттєвим недоліком є великодисперсний розпил, що спричиняє зниження ступеня очищення газового потоку від пилу.

У вентиляційній техніці перші дослідження з інженерними рішеннями питань використання фільтрувальної можливості факела розпиленої рідини для очищення вентиляційних викидів з температурою до 40 °С виконані С.І. Прийомовим [36].

У пиловловлювачі з дисковим розпилювачем (рис. 1.6 б) здійснено перехресний струм взаємодіючих середовищ. При очищенні аспіраційних викидів з температурою понад 50 °С ступінь очищення в таких пиловловлювачах є недостатньою через короткий період перебування частинок у факелі розпилу.

Мокрий пиловловлювач [37-38] (рис. 1.6 в), що знайшов застосування переважно в цукровій промисловості, не може бути так само ефективно використаний у промисловості будівельних матеріалів через експлуатаційні умови. По-перше, через схильність до засмічення отворів у конічній частині розпилювача при наявності в оборотній воді механічних домішок (що викликає нерівномірність розпилу). По-друге, при витраті рідини близько 5 м³/год дисперсність факела розпилу зменшується, що призводить до зниження ступіня очищення.

Пиловловлювач із сіткою, що обертається [39], можна застосувати для очищення промислових викидів підприємств з виробництва санітарно-технічного обладнання. Однак, він має недолік, який полягає у можливості засмічення сітки та форсунок під час роботи на оборотній воді. Крім того, відбувається зношування сітки, що фільтрує. Продуктивність цього апарата лімітується окружною швидкістю обертання сітки (рис. 1.6 г).

Особливу четверту групу складають пиловловлювачі, в яких використовується ефект конденсації парів на частинках пилу. Внаслідок

цього частинки пилу укрупнюються до таких розмірів, що їх можна легко вловити під впливом інерційних чи гравітаційних сил. У режимі конденсації можуть працювати також пінні, турбулентні та інші пиловловлювачі.

При виборі пиловловлювачів для очищення вентиляційних викидів від пилу особливе значення має здатність апаратів уловлювати найдрібніші силікозонебезпечні фракції пилу. У зв'язку з цим дослідження низки авторів [40-42] порівнюють ефективність очищення мокрих пиловловлювачів за однакових умов. Найбільш повно характеристики пиловловлювача відображає фракційний ступінь очищення. Як видно з рис. 1.7, найбільш ефективним апаратом для уловлювання дрібних фракцій є скруббер Вентурі.

Однак, слід зазначити, що скруббер Вентурі має найбільший гідравлічний опір (до 15000 Па), що впливає на витрати електроенергії при експлуатації пиловловлюючої установки. Серйозним недоліком пиловловлювачів труб Вентурі, як і пінних, є велика витрата води, що досягає до 1-2 л/м³ повітря, що очищається. Внаслідок контакту із запиленим повітрям вода забруднюється пилом.

Великий обсяг забрудненої води проходить фільтрацію для повторного використання, що потребує встановлення системи оборотного водопостачання з очищенням води. Якщо в ротоклонах і подібних пиловловлювачах наявність механічних домішок в оборотній воді майже не впливає на їх надійність, то в пиловловлювачах іншого принципу дії це грає істотну роль.

Для нормальної роботи пиловловлюючих установок (відцентрових скрубберів ВТІ, циклонів-промивачів, циклонів з водяною плівкою, скрубберів Вентурі тощо) залишкова концентрація механічних домішок після очищення у водоочисних спорудах не повинна перевищувати 100-400 мг/л.

З іншого боку, дослідження В. Н. Ужова, А. Ю. Вальдберга та В. А. Орлова [43] свідчать, що наявність механічних домішок в оборотній воді до 4000 мг/л підвищує ступінь очищення.

1.3. Аналіз ефективності пиловловлювачів різних типів для високотемпературних викидів

1.3.1. Фактори, що впливають на інерційне осадження пилу

Осадження пилових частинок під дією розпиленої води ґрунтується на кінематичній коагуляції. При цьому краплі або рухаються через пиловий аерозоль під дією лише сили тяжіння, або вводяться зі швидкістю, що значно перевищує швидкість їхньої седиментації.

Процес коагуляції у випадку руху частинок під дією сили тяжіння (гравітаційна коагуляція) відбувається шляхом захоплення частинок аерозолі водяними краплями різного розміру [44]. Якщо кількість частинок, захоплених краплями на 1 см шляху, становить $\frac{\pi}{4} d_K^2 E_n$, то кількість частинок, захоплених об'ємом 1 см³ розпорошеної води на тому ж відрізку шляху, складе $\frac{\frac{\pi}{4} d_K^2 E_n}{\frac{\pi d_K^3}{6}} = \frac{3}{2} E_n / d_K$. Відношення цих величин можна розглядати як ефективність захоплення частинок пилу розпиленою водою.

Ефективність захоплення залежить від таких факторів:

- розподілу швидкостей потоку повітряного середовища поблизу перешкод;
- траєкторії частки, що визначається її масою, опором середовища під час руху, розміром та формою перешкоди;
- швидкості повітряного потоку та прилипання частинок до перешкоди.

Поле течії біля перешкоди змінюється зі зміною критерію Рейнольдса R_{er} , що характеризує рух повітря відносно перешкоди. При високих R_{er} викривлення ліній струму стає помітним лише поблизу перешкоди, і за винятком вузького граничного шару, поле течії нагадує поле течії ідеальної рідини (рис. 1.8).

Різке викривлення ліній струму перед перешкодою при великих R_{er} посилює вплив інерції частинок, тоді як плавне викривлення ліній струму при низьких R_{er} зменшує ймовірність зіткнення частинок із перешкодою.

При низьких швидкостях повітряного потоку та малих розмірах частинок їхній рух у повітряному середовищі підпорядковується стоксовському закону опору, і рівняння руху записується у такому вигляді [45-47]:

$$m_u \frac{d^2x}{dt^2} = 6\pi\mu_r d_u \left(u - \frac{dx}{dt} \right), \quad (1.2)$$

$$m_u \frac{d^2y}{dt^2} = 6\pi\mu_r d_u \left(v - \frac{dy}{dt} \right), \quad (1.3)$$

Внаслідок приведення цих рівнянь до безрозмірного вигляду їх можна записати так:

$$Stk \frac{du'_1}{dt} = (u' - u'_1), \quad (1.4)$$

$$Stk \frac{dv'_1}{dt} = (v' - v'_1), \quad (1.5)$$

Де: $u'=u/U$; $v'=v/V$; $X'=x/l$; $y'=y/l$; $t'=t * U/l$; $u'_1=dx'/dt'$; $v'_1=dy'/dt'$.

m - маса частинки;

u — швидкість частинки;

U - швидкість незбуреної течії повітря на великій відстані від перешкоди;

l - характеристичний розмір перешкоди, наприклад діаметр краплі (d_k);

Stk - інерційний параметр (критерія Стокса).

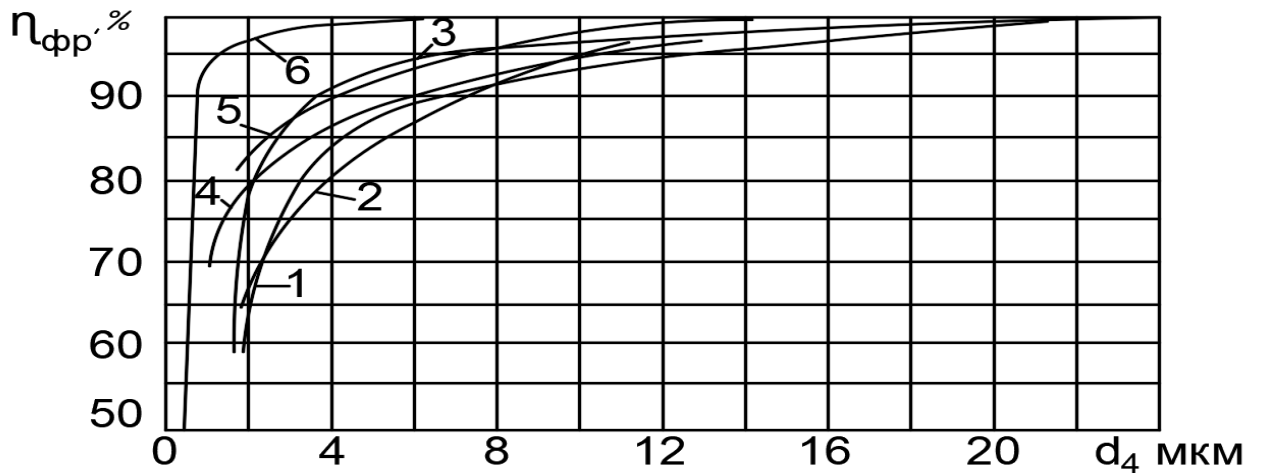


Рис. 1.7 Пофракційна ефективність очищення повітря від пилу в пиловловлювачах:

1 - пінний апарат; 2 - циклон-промивач СІОТ; 3 - ротоклон типу "N"; 4 - пиловловлювач прямоточного типу з дисковим розпилювачем; 5 - вентиляційний мокрий пиловловлювач ВМП-ЛІОТ; 6 - скруббер Вентурі.

Аналітичне рішення рівнянь для траєкторії частки виявилось неможливим за винятком найпростіших випадків течії при деяких граничних умовах.

Ефективність захоплення частинок на перешкодах також складно розрахувати аналітично, оскільки вона залежить не лише від критеріїв Стокса та Рейнольдса, а й від співвідношення розмірів частинок пилу та краплі [48].

$$E=f\left(\text{Stk}, \frac{d_u}{d_K}, R_{er}\right), \quad (1.6)$$

Аналіз залежності (1.6) показує, що зі збільшенням діаметра крапель зростає критерій Рейнольдса, знижується критерій Стокса та $\left(\frac{d_u}{d_K}\right)$, отже сумарним ефектом є зменшення коефіцієнта захоплення. Висока швидкість течії сприяє ефективному осадженню, оскільки при цьому збільшуються критерії Стокса та Рейнольдса.

Методом послідовного обчислення, а також із використанням обчислювальних машин, враховуючи певні спрощувальні припущення, низка

дослідників виконала різні розрахунки коефіцієнта захоплення. Проте, між отриманими результатами спостерігається розбіжність, оскільки розрахунки проводилися з урахуванням різних моделей поля течії.

Найбільш повні результати були отримані Ленгмюром і Блоджеттом [49-52], які за допомогою диференціального аналізатора виконали розрахунки траєкторій крапель, що рухаються з високою швидкістю перпендикулярно осі циліндра, а також здійснили кілька розрахунків для сфери.

Автори дослідили осадження на сфері у двох граничних випадках течії потоку - потенційному та в'язкому режимах. В результаті для потенційного потоку було встановлено критичне значення $Stk_{кр}$, при якому дрібні крапельки починають захоплюватися більшою краплею. Це значення дорівнює $1/12$.

Ленгмюр шляхом інтерполяції для перехідного режиму визначив ефективність захоплення крапель туману діаметром d_u краплями, що падають, діаметром d_k . Розрахункові дані наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Ефективність захоплення крапельок діаметра, краплями діаметра d_u

Діаметр краплі, $d_k \cdot 10^{-6}$, м	Діаметр крапель, d_u , м				
	$4 \cdot 10^{-6}$:	$6 \cdot 10^{-6}$:	$8 \cdot 10^{-6}$:	$12 \cdot 10^{-6}$:	$16 \cdot 10^{-6}$:
30	0	0	0	0	0,092
50	0	0	0	0,056	0,277
80	0	0	0	0,205	0,394
140	0	0	0,035	0,340	0,500
300	0	0,01	0,245	0,498	0,631
800	0,04	0,303	0,500	0,698	0,793

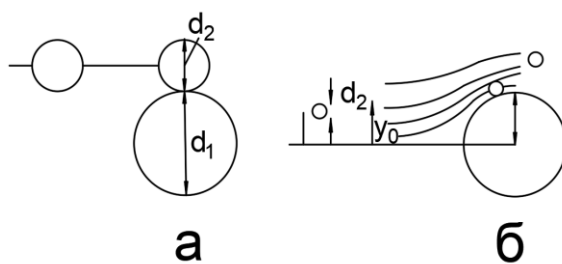


Рис. 1.8 Модель зіткнення частинок

а - спрощена модель, не враховуюча взаємодію з повітрям;

б - модель взаємодії частинок з врахуванням руху повітря.

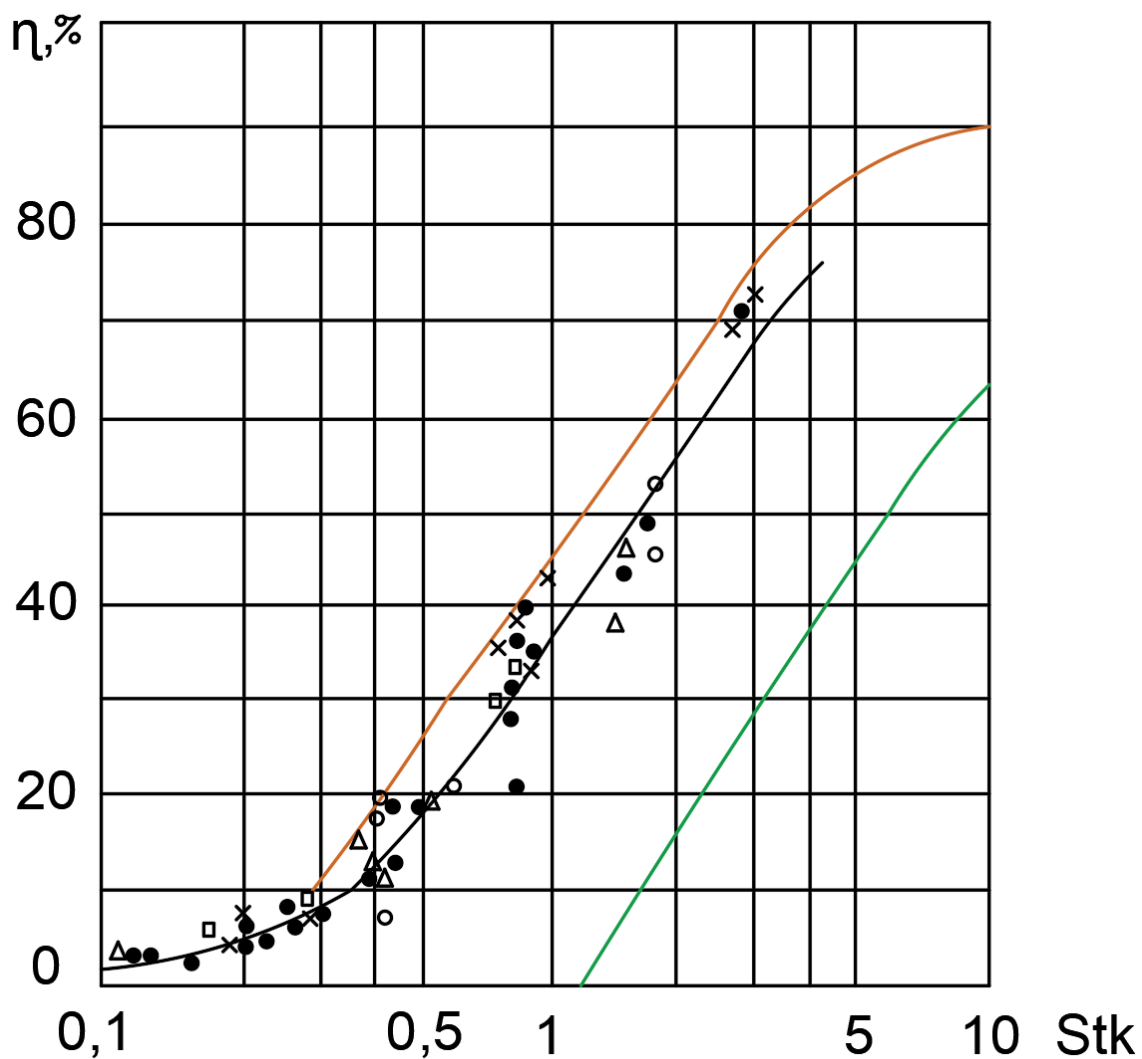


Рис. 1.9 Ефективність зіткнення частинок в залежності від критерія Стокса та відношенню діаметрів

— потенційна течія;

— в'язка течія.

Аналіз даних (табл. 1.2) показує, що краплі $d_k=30 \cdot 10^{-6}\text{м}$ можуть захоплювати краплинки більше за діаметром $(12-16) \cdot 10^{-6}\text{м}$, тоді як краплі з $d_u=4 \cdot 10^{-6}\text{м}$ не захоплюються. Однак розрахунки Ленгмюра недостатньо надійні [53-54] за такими припущеннями:

- по-перше, формули належать до випадку, коли власний розмір крапель з діаметром d_u малий порівняно з діаметром обтікаємого тіла d_k ;
- по-друге, в розрахунках взята не відносна швидкість великих і дрібних частинок, а абсолютна швидкість падіння великих частинок, без урахування взаємодії полів течії навколо краплі і крапельки, причому останні розглядалися як точкові маси;
- по-третє, застосований метод інтерполяції для значень E з в'язкого та потенційного режимів обтікання є необґрунтованим, оскільки, як показано в роботі Ленгмюра, E для частинок будь-якого розміру не дорівнює нулю.

Для підтвердження цього Н.А. Фукс ввів поняття "ефекту зачеплення" за допомогою якого враховується осадження частинок на краплі при відстані меншій за її радіус. Це означає, що захоплення частинок відбувається за рахунок торкання часткою поверхні тіла, що обтікається (великої краплі) (рис. 1.8 б). Якщо знехтувати інерційними ефектами та вважати, що частинка слідує строго за лінією струму, то осадження має відбутися не тільки в тому випадку, коли траєкторія частинки перетинає поверхню тіла (великої краплі), але й коли лінія струму проходить на відстані від поверхні тіла (пари чи краплі), що дорівнює її радіусу. Ефект зачеплення характеризується відношенням діаметрів частинки та обтічного тіла (краплі) d_u/d_k . У разі дуже малих відносин d_u/d_k , коли можна знехтувати інерційними ефектами, при обтіканні кулі для потенційного режиму ефективність зачеплення [55] становить:

$$E_{\text{зац}} = \left[1 + s \left(\frac{d_u}{d_k} \right)^2 \right] - \frac{1}{1 + d_u/d_k} \approx 3 \frac{d_u}{d_k}, \quad (1.7)$$

У іншому граничному випадку, коли інерційні ефекти значні, траєкторії частинок, що осідають, є прямолінійними:

$$E_{\text{зац}} = \left(\frac{d_u}{d_k} + 1 \right)^2 - 1 \approx 2 \frac{d_u}{d_k}, \quad (1.8)$$

Використовуючи ці залежності, Н.А. Фукс розрахував мінімальні значення коефіцієнта захоплення для в'язкого та потенційного течій, які для наочності представлені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Граничні (при $li=0$) значення коефіцієнта захоплення E в аерозолях з кулястими частинками

Режим течії	При відношенні d_u/d_k							
	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025
В'язке	1,25	0,83	0,48	0,22	0,06	0,044	0,0036	0,001
Потенційне	3,50	2,69	1,93	1,25	0,62	0,300	0,1500	0,075

Звідси очевидно, що для частинок із максимальним діаметром $30 \cdot 10^{-6}$ м, коли інерційні ефекти малі, ця таблиця дає значення коефіцієнтів захоплення, ближчі до дійсних, ніж прийняте Ленгмюром значення нуль.

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

У пізніших роботах були введені поправки на кінцевий розмір крапельок, а Хокінг [56], розглядаючи випадок в'язкої течії, врахував взаємодію між водяними краплями діаметра d_k , що вільно падають, і крапельками туману діаметра d_u при $d_u/d_k > 0.2$. Дані, отримані ним, показують, що у в'язкому режимі, при діаметрі крапель менше $36 \cdot 10^{-6}$ м крапельки ними не захоплюються.

Пікнетт [57] виміряв коефіцієнт захоплення розпиленими краплями розчину кухонної солі з діаметром $(2-18) \cdot 10^{-6}$ м для крапель чистої води

діаметром $(60-80) \cdot 10^{-6}$ м, отриманих за допомогою обертового диска. Ці дані добре узгоджуються з розрахунками Хокінга. Дослідження Пікнетта також показали, що існує критичний розмір крапель, нижче якого уловлювання не відбувається, хоча цей розмір є меншим за обчислений Хокінгом. Насправді трапляються випадки, коли величина частинок одного порядку є поперечним розміром обтікаємого тіла. Якщо діаметр частинки перевищує діаметр обтікаємого тіла (краплі), то можна знехтувати відхиленням траєкторії частинок від прямолінійності, тобто коефіцієнт захоплення буде високим і дорівнюватиме сумі ефективностей за рахунок прямого зіткнення та ефекту зачеплення, тобто:

$$E = 1 + \frac{d_u}{d_K}, \quad (1.9)$$

На рис. 1.9: наведено результати деяких здійснених розрахунків, а також експериментальні дані [57].

М. Химач та Н. Шишкін [58] експериментально визначили ефективність осадження при в'язкому перебігу ($Re=10$). Для цього автори під мікроскопом вивчали зростання краплі діаметром $200 \cdot 10^{-6}$ м, підвішеної на скляній нитці в аеродинамічній трубі, через яку продувався водяний конденсаційний туман з діаметром крапельок $(6-24) \cdot 10^{-6}$ м зі швидкістю від 0,3 до кількох м/с. Розрахунок ефективності осадження проводився за формулою для в'язкої течії:

$$E = \left(1 - \frac{0,607}{Stk}\right)^2, \quad (1.10)$$

Відношення розрахованих та вимірених швидкостей зростання крапельок у середньому було близько до одиниці.

У роботі Тельфорда, Торндайка і Боуена [59] порівняно ізодисперсний водяний туман з діаметром крапельок $140 \cdot 10^{-6}$ м, отриманий за допомогою дискового розпилювача, безперервно вводився у вертикальну трубу, через яку продувався знизу вгору насичений водяною парою повітря зі швидкістю, що перевищує швидкість вільного падіння крапель. Величина захоплення в

цьому випадку дорівнювала 12.6, у той час як при прямолінійному падінні крапель з урахуванням ефекту зачеплення має дорівнювати 4. Автори пояснюють настільки високу величину E гідродинамічною взаємодією між падаючими краплями та крапельками туману. Оскільки позаду обтічної краплі лінії струму спрямовані під невеликим кутом до вертикальної осі, то інша крапелька, що знаходиться позаду першої недалеко від цієї осі, захоплюватиметься потоком до передньої, що призводить до збільшення E .

За отриманими Тельфордом та ін. знімкам така взаємодія спостерігалася з відривом 40 діаметрів крапель. Критерій R_{ek} при цьому дорівнював 6. Раніше вказувалося, що при малих значеннях R_{ek} , тобто при симетричності течії попереду та ззаду крапельки зменшення опору середовища однаково для обох крапель, але вже при великих значеннях R_{ek} ця симетрія порушується, і вплив передньої краплі на задню значно більший за зворотний вплив.

Дані за визначенням коефіцієнта захоплення великими краплями води дрібних крапельок туману можна перенести і на випадок взаємодії крапель з порошинками, при припущенні, що порошинки мають сферичну форму.

З цього питання великий інтерес становлять дослідження С.С. Духіна та В. М. Каганера [60-63], які довели, що при розрахунку ефективності захоплення порошинок діаметром d_u , водяними краплями можна скористатися даними Ленгмюра (табл. 1.2), але з введенням поправки, приймаючи для порошин еквівалентний діаметр

$$d_{\text{екв}} = d_u \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_T}} = d_u * x, \quad (1.11)$$

де, для кварцу $x = \sqrt{\frac{1}{2,66}} = 0,61$,

Ефективність захоплення пилових частинок кварцу в 1.6 раза більша, ніж для крапель такого ж розміру. Внаслідок досліджень С.С. Духін та В.М. Каганер [61] зроблено висновок, що в зоні згасання розпику гідрофорсунок

при розмірі крапель $(15-120) \cdot 10^{-6}$ м порошинки з розміром $(5-12) \cdot 10^{-6}$ м не захоплюються.

Думки дослідників щодо оптимальних розмірів крапель для пиловловлення не збігаються, і за літературними даними можна лише визначити інтервал їх зміни від $10 \cdot 10^{-6}$ м до $80 \cdot 10^{-6}$ м.

Так, В. А. Сіп'ягін та А. Ф. Скачков [64] вважають, що для промислових пиловловлення найбільш ефективні краплі від $10 \cdot 10^{-6}$ м до $50 \cdot 10^{-6}$ м. До цих висновків автори дійшли при дослідженні пиловловлення в шахтах та вибухах. Клейншмідт [65] вважає, що найбільш доцільний розмір крапель має бути $(30-50) \cdot 10^{-6}$ м, а краплі діаметром більше $400 \cdot 10^{-6}$ м не відіграють істотної ролі для випадку, коли рідина розпорошується радіально щодо газу, що обертається (див. рис. 1.2 г).

Е.Н. Теверовський та М.М. Зайцев [66] встановили, що краплі діаметром до $50 \cdot 10^{-6}$ м при взаємодії з частинками будь-якого розміру і, особливо, одна з одною виявляються найбільш ефективними для пиловловлення.

Експериментальні дані І. Чиждова [66] показують, що ефективність уловлювання пилу методом зрошення можна значно підвищити, надавши краплі води електричний заряд. Автор стверджує, що краплі діаметром $(30-80) \cdot 10^{-6}$ м найбільш ефективні.

Різні оптимальні розміри крапель виявились у цих роботах, мабуть, через те, що дослідження виконані в умовах, що відрізняються як за дисперсністю пилу, так і за способом введення крапель у пиловий аерозоль.

При введенні під тиском крапель води в потік газів ефективність захоплення зростає зі зменшенням розміру крапель і досягає великих значень для дуже дрібних частинок. Такий метод широко застосовується в скруберах Вентурі. Швидкість крапель рідини, що розпорошується перед горловиною труби, або в самій трубі, менше швидкості газів у горловині труби, оскільки краплі рідини не можуть відразу набрати швидкість газів. У зв'язку з цим у

горловині труби Вентурі створюються великі відносні швидкості частинок пилу та крапель, що призводить до інтенсивної кінематичної коагуляції.

Принцип активного введення крапель розпиленої води в повітряний потік використовується в апаратах з дисковими розпилювачами.

У роботі С. І. Приємова [36] зроблено висновок, що взаємодія крапель розпиленої рідини з частинками пилу в мокрому пиловловлювачі з дисковим водорозпилювачем підпорядковується імовірнісним процесам. В результаті дослідження запропоновано залежність для визначення ефективності пиловловлення, що має наступний вигляд:

$$\eta_{об} = 1 - (0,144 - 0,0176n - 0,00184n^2) \left(\frac{4,144 \left(\frac{mi}{mo} \right)^{0,4}}{\left(\frac{mi}{mo} \right)^x} - 3,398 \right) * \\ * \left(1,9706 \frac{\phi_{10}(t)}{50} - 0,6464 \left(\frac{\phi_{10}(t)}{50} \right)^2 - 0,1079 \right), \quad (1.12)$$

Аналіз цієї залежності показує, що вона характеризує високу точність при очищенні вентиляційних викидів з температурою 20-30 °С і температурою води, що розпилюється, 10-20 °С. Поряд з цим тут не враховується випаровування крапель та початкова концентрація механічних домішок в оборотній воді, оскільки дослідження виконані при взаємодії крапель чистої проточної води та запиленого повітря з температурою до 30°С.

1.3.2. Вплив тепло- та масообміну на процеси пиловловлення

Необхідно відзначити, що взаємодія пилогазового потоку при підвищеній температурі з факелом розпиленої рідини супроводжується або випаровуванням промивної рідини (коли на очищення надходить суха пилоповітряна суміш з достатньою високою температурою), або конденсацією водяної пари (у разі очищення з охолодженням газу).

З погляду процесу пиловловлення в апаратах з диспергуванням рідини істотне значення має час життя водяних крапель. Час життя водяного туману

залежить від швидкості випаровування крапель. Детальний аналіз теоретичних та експериментальних досліджень з випаровування крапель у газоподібному середовищі та конденсації парів води на краплях, що відбуваються при контакті нагрітого газу з холодною водою залежить від ступеня насичення газу парами води, наведених у роботах Фукса Н.А. [67], Ужова В.М. та Вальдберга А.Ю. [68], та Дубинської Ф.Є. [69].

При випаровуванні краплі відбуваються одночасно два процеси: підведення тепла з навколишнього середовища до поверхні краплі та дифузія парів у навколишнє середовище.

Тепло, що підводиться до краплі, витрачається на випаровування рідини та перегрів пар від температури на поверхні краплі до температури навколишнього середовища [70]. Отже:

$$q * 4\pi r_o^2 = \lambda \frac{dT}{dr} * 4\pi r^2 / [L + C_p(T - \theta)], \quad (1.13)$$

Інтегрування рівняння (1.13) при $C_p = \text{const}$ і $\lambda = \text{const}$ (середньому) призводять до наступного виразу:

$$q = \frac{\lambda}{r_o R} (T_\infty - \theta) \Phi, \quad (1.14)$$

$$\text{Де } \Phi = \frac{\ln \left[1 + \frac{C_p(T_\infty - \theta)}{R} \right]}{\frac{C_p}{R}(T_\infty - \theta)}.$$

Φ - параметр, що враховує вплив масообміну на перенесення тепла на поверхню краплі.

Діяльність Г.Б. Петражицького [71], що вивчав випаровування крапель води, етилового спирту і газу, що рухаються в потоці газу, було встановлено, що швидкість випаровування краплі підпорядковується залежності

$$Nu_d = [2 + 0,4 R_K^{0,56} * \rho_z^{0,1}] \left(1 + \frac{\Delta p}{p} \right)^{1,1}, \quad (1.15)$$

В області температур 90-500 °С і значення $R_{ек}$ від 115 до 450,

При випаровуванні краплі в ансамблі крапель, які оточені середовищем, що вже має певну концентрацію парів C , завдання ускладнюється. Але її можна

спростити, якщо ввести коефіцієнт масообміну β , який у цьому випадку відображає загальний вплив турбулентної та молекулярної дифузії.

Якщо розглядати випаровування краплі в обмеженому середовищі з концентрацією C , то питома швидкість випаровування може бути визначена за рівнянням:

$$q = \beta \frac{\frac{\rho}{Rn \cdot T}}{\frac{\rho}{Rn \cdot T} - C_0} (C_0 - C), \quad (1.16)$$

Для кількісних розрахунків процесів тепломасообміну між краплею, що рухається, і повітрям коефіцієнт β може бути визначений за експериментальною залежністю Фресслінга [72]:

$$Nu_d = 2(1 + 0,276 * R_{ек}^{0,56} * S_c^{0,33}), \quad (1.17)$$

Виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновки, що швидкість випаровування краплі залежить не тільки від швидкості дифузії, а й від інтенсивності теплообміну між краплею та навколишнім середовищем.

За даними Х. Грина і В. Лейна [73-74] крапля, діаметром 10 мкм при температурі навколишнього повітря 20 ° С і відносній вологості 80% живе лише 0,64 секунди (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Час життя крапель води [74]

Діаметр краплі, мкм	Час повного випаровування, сек.	
	При температурі повітря 20°C і відносній вологості 80%	При температурі повітря 30°C і відносній вологості 50%
80	33,7	9,46
60	19,2	5,37
40	8,73	2,43
20	2,35	0,64
10	0,64	0,16

Дані табл. 1.4 показують, що великий вплив на час життя краплі надає температура та кількість водяної пари в навколишньому середовищі.

В.А. Федосєєв та Д.І. Поліщук [75-76] експериментально встановили, що випаровування крапель води збільшується при зростанні температури та швидкості повітряного потоку.

Процесу вловлювання пилу в мокрих пиловловлювачах сприяє конденсаційний ефект, який позначається в попередньому укрупненні частинок за рахунок конденсації на них водяної пари та подальшого інерційного осадження.

Швидкість конденсації лежить на поверхні краплі, зваженої в спокійному газі, та виражається рівнянням [76]:

$$\frac{dm_n}{d\tau} = \frac{2\pi D_n d_K M}{R_n T \varphi} (P - P_K), \quad (1.18)$$

φ - коефіцієнт, що враховує вплив розміру краплі, розраховується за рівнянням:

$$\varphi = 1 + \frac{1,33 K_n + 0,71}{1 + \frac{1}{K_n}}, \quad (1.19)$$

За даними Амеліна Г.А. [77] зі збільшенням діаметра краплі коефіцієнт зменшується, наближаючись до одиниці. Коефіцієнт можна не враховувати аж до $d_K = 5 \cdot 10^{-6}$ м. Поправку необхідно вводити для дрібніших крапель, а при тисках нижче за атмосферне і для великих крапель.

При конденсації водяної пари на краплі має місце дифузійний ефект, що істотно впливає на конденсацію, а також на рух аерозольних частинок. У цьому випадку, як вказується в [77], поверхню краплі, що росте, можна розглядати як напівпроникну стінку, через яку за нормаллю до неї дифундує водяна пара, але не дифундують інші компоненти суміші. Отже, у міру наближення до стінки парціальний тиск водяної пари падає, тоді як парціальний тиск решти суміші P_{cm} зростає, і вона дифундує назустріч водяній парі. Оскільки стінка проникна тільки для водяної пари, дифундуючому потоку інших компонентів суміші протистоїть інший потік маси, рівний за

величиною, але протилежний у напрямку. Цей потік компенсує молекулярну дифузію і включає додаткову кількість водяної пари (G_{Π}), що переноситься в напрямку молекулярної дифузії, тобто збільшує дифузію на краплю.

Розглянуте явище виражається залежністю такого виду [78]:

$$G_{\Pi} = \frac{D_{\Pi} M_{\Pi} P_r dP_{\Pi}}{R_{\Pi} T (P_r - P_{\Pi}) dy}, \quad (1.20)$$

З урахуванням стефанівського потоку швидкість конденсації пари на поверхні краплі може бути виражена залежністю [79]:

$$\frac{dm_n}{dt} = \frac{2\pi d_K D_{\Pi} M_{\Pi} K_{ст}}{R_{\Pi} T \Phi} (P_{\Pi} - P_K), \quad (1.21)$$

$$\text{Де } K_{ст} = 1 + \frac{P_K + P_{\Pi}}{P_r}, \quad (1.22)$$

Коли процес конденсації відбувається в присутності великої кількості газів, що не конденсуються, вираз (1.22) наближається до одиниці і стефанівський потік не має істотного впливу на конденсацію.

У турбулентному потоці конденсація водяної пари на краплях відбувається значно інтенсивніше, ніж у спокійному газі. Оскільки краплі не повністю захоплюються турбулентними пульсаціями, до їхньої поверхні переноситься додаткова кількість пари завдяки конвективній дифузії. При зменшенні діаметра крапель, вони все більше захоплюються турбулентними пульсаціями і вплив конвективної дифузії зменшується. За даними В.Г. Левича [80], цей ефект можна не враховувати для крапель діаметром $d_k < 1 \cdot 10^{-6}$ м.

Загальна швидкість переходу пари в рідкий стан при одночасній конденсації пари на поверхні та в обсязі апарату виражається наступним рівнянням [81]:

$$\frac{dm_n}{dt} = \beta S_k \frac{M_n}{R_n T} K_{ст} (P_{\Pi} - P_{ст}) + \frac{2\pi M_n D_{\Pi} d_k n_k V_a K_{ст}}{R_n T \Phi} (P_{\Pi} - P_K) + \frac{\pi d_k^3 V_a \rho_{ж} I_3}{6}, \quad (1.23)$$

Перший доданок правої частини рівняння (1.23) виражає швидкість процесу конденсації на поверхні. За даними В.Н. Ужова та А.Ю. Вальдберга [82], у багатьох мокрих пиловловлювачах охолодження газу через стінку

становить не більше 3% від загальної кількості тепла, утилізованого в апараті. Поверхнева конденсація відбувається в насадкових скруберах, відцентрових скруберах, мокрих циклонах і частково в пінних апаратах.

Другий доданок виражає швидкість переходу пари в рідкий стан в результаті утворення зародків крапель. Оскільки величина діаметра зародка $\sim 10^{-9}$ м, то третій доданок можна не враховувати. Однак при охолодженні запиленних газових потоків центрами конденсації виступають частинки пилу. Тому в разі конденсаційного охолодження в мокрому пиловловлювачі рівняння (1.23) набуває вигляду [82]:

$$\frac{dm_n}{dt} = \beta S_k \frac{M_n K_{CT}}{R_n T} (P_{II} - P_{CT}) + \frac{2\pi M_n D_n d_k n_k V_a K_{CT}}{R_n T \Phi} (P_{II} - P_K) + \frac{2\pi M_n D_n d_{\text{ч}} n_{\text{ч}} V_a K_{CT}}{R_n T \Phi_1} (P_{II} - P_u), \quad (1.24)$$

Уловлювання пилу в конденсаційних пиловловлювачах визначається цілою низкою факторів, з яких основними є: конденсаційне укрупнення частинок, спрямований рух частинок пилу завдяки дифузії пари, стефанівська течія.

Дослідження М.Л. Михельсона [83] показали, що пилові частки розміром $(0,1-1,0) \cdot 10^{-6}$ м, які змочуються, і ті, що погано змочуються, активніше інших ядер конденсації, тобто вимагають меншого пересичення для свого необмеженого зростання.

Б.В. Дерягіним і С.С. Духіним [60] запропоновано залежність, що дозволяє розрахувати швидкість осадження частинок з концентрацією n_0 на сферичній краплі при конденсації у ній пари, тобто при спільній дії дифузії самих частинок та стефанівської течії:

$$I_{\text{ч}} = \frac{2\pi d_K D_n (c - c_0) n_0}{c' \{ \exp[D_n (c - c_0) / D_{\text{ч}} c'] - 1 \}}, \quad (1.25)$$

З рівняння (1.25) випливає, що Стефанівська течія не впливає на осадження частинок на краплі тільки при малих значеннях відношення $(C - C_0) / D_{\text{ч}} \cdot c'$

Ефективність осадження частинок при конденсації парів на краплі, що росте, η_k може бути визначена за формулою [84]:

$$\eta_k = \frac{144\pi\mu_r D_n (c - c_o)}{g\rho_q c' d_k (d_k^2 - d_q^2)}, \quad (1.26)$$

З рівняння (1.26) видно, що з малих частинок ефективність захоплення із зменшенням їхнього розміру (за інших рівних умов) залишається майже постійною, тому бажано, щоб у потоці були присутні краплі меншого розміру. З іншого боку, краплі повинні бути досить великими, що дозволяє зменшити витрати електроенергії на розпил та знизити винесення дрібнодисперсних крапель.

Експериментальними дослідженнями впливу конденсації на ступінь очищення газу в трубах Вентурі займалися багато дослідників [85-87]. А.Т. Литвинов [88] виявив, що ступінь очищення газів зростає зі збільшенням температури точки роси газів, які надходять у скруббер Вентурі.

М.Л. Михельсон [83] довів, що при подачі пари в потік газу перед промисловою трубою Вентурі у кількості 20 г/м³ досягається зниження залишкової запиленості в 3 рази.

Б.А. Кузенков [89] розрахунковим шляхом показав, що у пиловловлювачах типу ПВМ не відбувається значного укрупнення частинок і підвищення ефективності їх уловлювання за рахунок конденсації водяної пари. У дослідженнях А.Т. Литвинова [90] також зазначається, що конденсація парів на частинках не впливає суттєво на ступінь очищення, оскільки збільшення розміру частинок та її обтяження є незначним. Згідно з розрахунками, при максимальному конденсаційному уловлюванні частинок діаметром $d_q=10^{-6}$ м та густиною $\rho_q=3600$ кг/м³ у двополковому пінному апараті їхній розмір збільшується лише до $1,2 \cdot 10^{-6}$ м, а густина зменшується до 2560 кг/м³. У цій же роботі зазначається, що гідродинамічна течія, спричинена конденсацією водяної пари, не має суттєвого впливу на ефективність уловлювання частинок розміром $>0,1 \cdot 10^{-6}$ м.

За даними В.Н. Ужова та А.Ю. Вальдберга [82] застосування конденсації є найбільш доцільним при уловлюванні частинок менш $2 \cdot 10^{-6}$ м.

Таким чином, як свідчить аналіз літературних джерел, конденсація на краплях і частинках призводить до деякого підвищення ступеня очищення газів. Однак, зазначені роботи не охоплюють усіх аспектів процесу, у зв'язку з чим необхідно продовжити дослідження впливу процесів тепло- та масообміну в ансамблі крапель факела розпилю на ступінь очищення газів.

Оскільки на інтенсивність процесів тепло- і масообміну впливає, серед інших факторів, діаметр крапель рідини, виникає необхідність розглянути способи диспергування рідини в пиловловлювачах та залежності, що визначають розмір крапель.

1.4. Скрубери з дисковими розпилювачами: конструкція, принцип дії та застосування

Детальний аналіз способів розпилювання рідини та конструктивних особливостей різних типів розпилювальних пристроїв представлено в роботах Г.К. Лебедюка [91], Д.Г. Пажі та ін. [92], Ю.Ф. Дитякіна, Л.А. Клячко [93], А.М. Ластовцева [94], А.А. Долінського [95] та інших дослідників.

Диспергування рідини може здійснюватися за допомогою:

- 1) форсунок;
- 2) обертових розпилювачів;
- 3) пульсації тиску;
- 4) ультразвукових коливань;
- 5) динамічної взаємодії рідини з потоком газу або пари, що розпилює;
- 6) електричного впливу.

За даними Г.К. Лебедюка та ін [91] (табл. 1.4) енергетичні витрати на розпил 1 т рідини є найменшими при використанні механічних форсунок і становлять 2-4 кВт.

Порівняння способів розпилення рідин за питомою витратою енергії

Спосіб розпилення	Продуктивність форсунки	Тиск розпилюючого середовища, кПа		Енергетичні витрати на розпил 1 т рідини, кВт	Літературне джерело
		Газа (пару)	рідини		
Механічне за допомогою форсунок	50-5000	-	До 6870	2-4	[95]
Механічне розпилювачами, що обертаються (дисковими розпилювачами)	1-15000	-	-	15	[91]
Пульсаційне	До 200	-	-	4-8	[94]
Ультразвукове	80	-	-	2-7	[92]
Пневматичне	200	290-590	98	20-60	[92]
Пневмомеханічне	400-6400	150-900	До 3450	4-6	[93]
Електричне	До 500	-	-	50-100	[93]

Енергетичні витрати на розпилювання 1 т рідини при пульсаційному, ультразвуковому та пневмомеханічному способах розпилення є аналогічними.

Однак через малу продуктивність та складність конструкції розпилювачів, пульсаційне та ультразвукове розпилення застосовуються досить рідко. Пульсаційний метод використовується переважно для

розпилювання рідкого палива, а ультразвуковий - у спеціальних реакторах та розпилювальних сушарках.

Електричне та пневматичне розпилення потребує значних енергетичних витрат.

Механічне розпилення за допомогою форсунок є менш енергоємним, проте схильне до засмічення при наявності механічних домішок у рідині.

Аналіз чинних способів розпилення рідин показав, що для диспергування суспензій і в'язких рідин найкраще підходять обертові розпилювачі. Проте енерговитрати на розпилювання 1 т рідини в такому випадку можуть досягати 15 кВт [93].

Дискові розпилювачі з конусною насадкою [37] є менш енергоємними (енерговитрати на розпил 1 т суспензії становлять 1,7 кВт). Крім того, вони не засмічуються, що дозволяє використовувати їх у розпилювальних пристроях мокрих пиловловлювачів.

При обертанні дискового розпилювача з конусною насадкою [37] рідина піднімається насадкою по спіралі, розподіляється на диски й отримує обертальний рух. Завдяки дії відцентрової сили рідина у вигляді плівки рухається з постійним прискоренням до периферії диска й скидається. Розпилення рідини відбувається з безпосереднім утворенням крапель.

На рис. 1.10 зображено процес розпад рідини на краплі під час розпилення гладким диском ($D_g=0,3$ м: $w=25$ л/сек). На фотографії, отриманій при стробоскопічному освітленні, видно, що утворення ансамблю крапель починається біля кромки диска. Дисперсність розпилу залежить від низки факторів, зокрема й від кількості рідини, що надходить на диск.

Для оцінки середнього діаметра крапель під час диспергування відцентровими дисковими розпилювачами існує низка емпіричних залежностей.

А.М. Ластовцевим отримано залежність [94]:

$$d_{3,2} = 81 \frac{\sigma_{\text{ж}}^{0,46} * h^{0,46} * \mu_{\text{ж}}^{0,08}}{u * \rho_{\text{ж}}^{0,54}}, \quad (1.27)$$

Для визначення середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель води, що диспергується дисковим розпилювачем, С.І. Приемов рекомендує залежність, отриману статистичними методами [36] в діапазоні зміни параметрів $W=10-180$ л/год і $\omega R=12-45$ м/с:

$$d_{3,2} = 134 + 40x_1 - 49x_2 - 24,5x_1^2 - 6,85x_2^2 - 12,5x_1x_2, \quad (1.28)$$

де x_1 – витрата води;

x_2 - швидкість обертання розпилювача.

О.С. Чечик та Б.М. Люмінарський зробили спробу теоретично отримати рівняння для розрахунку діаметра крапель під час розпилення методом відцентрового дроблення рідини. Однак швидкість течії рідини по диску розраховували відповідно до методики, запропонованої А.М. Ластовцевим [94], під час обробки експериментальних даних.

Залежність такого виду [94]:

$$d_k = \frac{30\sqrt[3]{4}}{\pi n} \sqrt{\frac{36 - 4,5\mu_r\omega_r - \sqrt[3]{\frac{R_g n^2 \mu_{ж}^2 \rho_{ж} (W/l)^2}{100\pi}}}{\rho_{ж} * R_g}}, \quad (1.29)$$

Наведені залежності (1.27-1.29) отримані для дроблення однорідних рідин.

Розпилювання дисперсних систем, як показали дослідження П.А. Барса та М.І. Сідорова [97], відрізняються від розпилювання однорідних рідин.

В.В. Кафаров та С.І. Шапіро при розпиленні суспензій і барвників дисковим розпилювачем визначали середній діаметр крапель за формулою [98]:

$$d_k = 98,5 \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\sigma_{ж}}{R_g \rho_{ж}}}, \quad (1.30)$$

При розпиленні суспензій в розпилювальній сушарці Friedman S.J. [99] запропонував визначити середній об'ємно-поверхневий діаметр краплі за такою залежністю:

$$d_{3,2} = 1,345 \left(\frac{W_v}{D_g}\right)^{0,2} \left(\frac{G_{ж}}{l}\right)^{0,1} \left(\frac{1}{\omega}\right)^{0,6} \left(\frac{1}{\rho_{ж}}\right)^{0,3}, \quad (1.31)$$

Використання запропонованих залежностей для визначення середнього об'ємно-поверхневого діаметра краплі очищеної води у факелі розпилю дисковим розпилювачем є неможливим, оскільки в них відсутній важливий фактор - концентрація механічних домішок. Розрахунок діаметра крапель за залежностями (1.27-1.31) дає розбіжність більш ніж у 2 рази порівняно з експериментальними даними (табл. 1.5).

З огляду на це виникає необхідність експериментального дослідження диспергування рідин, що містять механічні домішки, за допомогою дискових розпилювачів [37].

Конструктивні особливості дискових розпилювачів дають змогу отримати дрібнодисперсний високошвидкісний факел розпилю (розмір крапель $(1-200) \cdot 10^{-6}$ м) за незначних енерговитрат. Такі пристрої є перспективними для процесів пиловловлення. Зі збільшенням ступеня дисперсності зростає кількість крапель, що утворюються внаслідок дроблення певного об'єму рідини.

За даними Л.В. Леонтовича [100], під час розпилення рідин з однаковими фізико-механічними властивостями та за однакової швидкості витікання струменя, що визначає $D_{\max}$, дискові розпилювачі з конусною насадкою забезпечують максимальну поверхню розпилю.

Високорозвинена поверхня при контакті з частинками пилу має сприяти підвищенню ефективності пиловловлення.

Таблиця 1.5

Порівняльні значення об'ємно-поверхневого діаметра краплі однорідної рідини

Умови експерименту	Розмір об'ємно-поверхневого діаметру ($d_{3,2}$) краплі, розрахований за залежністю					Експериментальне значення $d_{3,2}$; м
	Ластовцев А.М.	Приємов С.И.	Чечик Люмінарский	Шапіро С.И.	Friedman S.J.	
1. $D_g=0,2$ м; $\theta=14^\circ\text{C}$; $\omega'=157$ рад/с; $W=0,02639$ кг/с; $\sigma_{ж}=0,07364$ Н/м; $P_{ж}=999,24$ кг/м ³ ; $v_{ж}=1,27 \cdot 10^{-6}$ м ² /с.	162,83* $\cdot 10^{-6}$	131,86* $\cdot 10^{-6}$	473,98* $\cdot 10^{-6}$	596,00* $\cdot 10^{-6}$	283,96* $\cdot 10^{-6}$	189,0* $\cdot 10^{-6}$
2. $D_g=0,3$ м; $\theta=30^\circ\text{C}$; $\omega'=314$ рад/с; $W=0,05138$ кг/с; $\sigma_{ж}=0,07103$ Н/м; $P_{ж}=995,65$ кг/м ³ ; $v_{ж}=0,7982 \cdot 10^{-6}$ м ² /с.	35,39* $\cdot 10^{-6}$	76,96* $\cdot 10^{-6}$	190,05* $\cdot 10^{-6}$	226,55* $\cdot 10^{-6}$	176,36* $\cdot 10^{-6}$	91,25* $\cdot 10^{-6}$
3. $D_g=0,2$ м; $\theta=10,5^\circ\text{C}$; $\omega'=157$ рад/с; $W=0,05138$ кг/с; $\sigma_{ж}=0,07402$ Н/м; $P_{ж}=999,65$ кг/м ³ ; $v_{ж}=1,30 \cdot 10^{-6}$ м ² /с.	224,28* $\cdot 10^{-6}$	218,41* $\cdot 10^{-6}$	474,66* $\cdot 10^{-6}$	565,39* $\cdot 10^{-6}$	333,45* $\cdot 10^{-6}$	206,17* $\cdot 10^{-6}$
4. $D_g=0,4$ м; $\theta=45^\circ\text{C}$; $\omega'=314$ рад/с; $W=0,2639$ кг/с; $\sigma_{ж}=0,0686$ Н/м; $P_{ж}=990,22$ кг/м ³ ; $v_{ж}=0,6 \cdot 10^{-6}$ м ² /с.	14,45* $\cdot 10^{-6}$	52,25* $\cdot 10^{-6}$	162,73* $\cdot 10^{-6}$	133,47* $\cdot 10^{-6}$	70,64* $\cdot 10^{-6}$	70,36* $\cdot 10^{-6}$

1.5. Висновки, проблеми та напрямки удосконалення пиловловлення

1. Аналіз конструктивних рішень пиловловлюючих апаратів показав, що мокрі пиловловлювачі є економічно вигіднішими порівняно з тканинними та електричними. Вони усувають небезпеку займання деяких видів пилу, запобігають вторинному пиловиносу та забезпечують одночасне уловлювання твердих частинок, паро- і газоподібних компонентів. Однак більшість мокрих пиловловлювачів не забезпечує ефективного вловлювання дрібнодисперсного пилу на підприємствах будівельних матеріалів через специфічні фізико-хімічні властивості частинок. Додатковою проблемою є необхідність використання відносно чистої води (із вмістом механічних домішок не більше 400 мг/л), щоб уникнути засмічення зрошувальних пристроїв, що, своєю чергою, вимагає очищення стічних вод і підвищує загальну вартість процесу очищення повітря.

2. Систематизований аналіз теоретичних та експериментальних досліджень осадження аерозолів краплями розпиленої рідини свідчить про перспективність застосування високорозвиненої поверхні крапель та високих відносних швидкостей між краплями рідини й частинками пилу для підвищення ефективності очищення промислових викидів.

Попри це, існуючі пиловловлювачі, такі як скрубери Вентурі, що працюють за принципом високорозвиненої поверхні крапель, є надмірно енергоємними.

Крім того, ступінь очищення промислових викидів з підвищеною температурою в апаратах із перехресним факелом розпиленої рідини та частинок пилу залишається недостатнім через нетривалий час контакту фаз.

3. При аналізі осадження аерозолів краплями розпиленої рідини встановлено, що відсутні вичерпні дані щодо впливу механічних домішок у воді на ефективність пиловловлення.

4. Відсутність рівнянь, що описують турбулентний рух пилоповітряних потоків у циклонних камерах під час їхньої взаємодії з факелом розпиленої

рідини, не дозволяє здійснити теоретичний аналіз багатофакторних залежностей ефективності пиловловлення. Отже, дослідження цих процесів слід проводити шляхом експериментальних досліджень.

Основні завдання дисертаційної роботи:

- дослідити дисперсність крапель розпиленої рідини, що містить механічні домішки;
- вивчити вплив вмісту вологи, концентрації запиленних потоків і механічних домішок в оборотній воді на ступінь очищення;
- дослідити вплив гідродинамічних умов роботи пиловловлювачів з дисковими розпилювачами на ефективність пиловловлення.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПИЛОВЛОВЛЕННЯ В ЦИКЛОННОМУ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ З ДИСКОВИМ ВОДОРОЗПИЛЮВАЧЕМ

2.1. Фізична модель процесу пиловловлення: аналіз сил, що діють на частинки пилу та краплі рідини в циклонному пиловловлювачі

Рух частинок у циклонних розпилювальних апаратах є складним криволінійним рухом у просторовому полі швидкостей. На нього впливає велика кількість різних сил і ефектів. На кожную частинку в загальному випадку діють такі зовнішні сили: гравітаційні, сили реактивного випаровування, молекулярного тяжіння, електростатичні сили, сили взаємодії частинок між собою, а також сили, що виникають в результаті взаємодії частинки з несучим потоком.

До останніх належить сила аеродинамічного опору, сила протитиску, сили турбулентного масопереносу та сила Магнуса, що виникає при обертанні частинки навколо власної осі.

У диференціальних рівняннях руху частинок неможливо повною мірою врахувати сукупність цих сил, тому прийнято ряд припущень.

У цій роботі розглядається рух повітря по гвинтовій лінії вгору з рівнозмінним кроком по висоті та радіусу камери. При цьому потік вважається стаціонарним, з усередненою швидкістю та без інтенсивного турбулентного обміну.

Не враховується також вплив радіального стоку та вторинних вихорів, які можуть захоплювати дрібні частинки до центру камери (до дискового розпилювача) (рис. 2.1).

Передбачається, що відцентрова сила інерції діє в радіальному напрямку, а тангенціальні й осьові швидкості частинки та повітря в кожний момент часу є рівними між собою.

При побудові моделі взаємодії краплі рідини, що випаровується, із закрученим потоком повітря враховується зміна її маси, а в радіальному напрямку - вплив відцентрових сил інерції та в'язкого опору середовища.

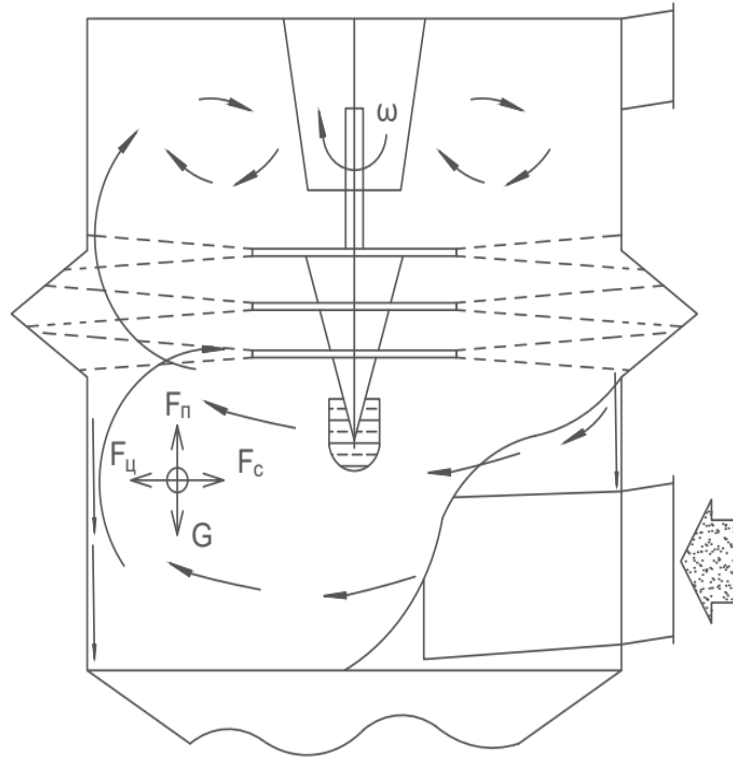


Рис. 2.1 Схема руху контактуючих фаз у дисковому розпилювачі

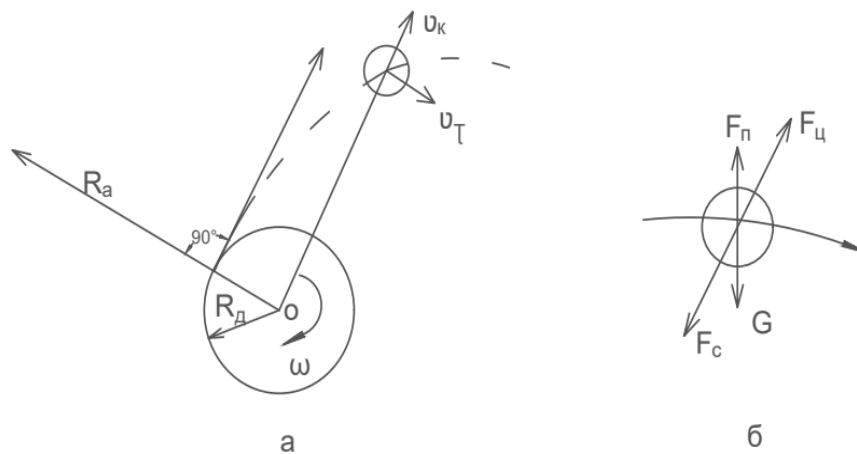


Рис. 2.2 Схема руху краплі в горизонтальній площині

Величина відцентрової сили інерції, що діє на частинки визначаються за формулою:

$$F_u = m_u \frac{w^2 u}{r}, \quad (2.1)$$

Для того щоб тверді частинки осідали на корпусі апарата, відцентрова сила повинна дорівнювати або перевищувати силу опору середовища.

Згідно із законом Ньютона, сила опору середовища при русі кулеподібної частинки в радіальному напрямку визначається за формулою [101]:

$$F_c = \Psi S \frac{(v_r - v_u)^2 \rho_r}{2g}, \quad (2.2)$$

Де Ψ - коефіцієнт аеродинамічного опору, який обчислюється залежно від режиму течії.

При $Re_u \leq 1$, а при $3 \leq Re_u \leq 400$

$$\Psi = \frac{2u}{Re_u} \left(1 + \frac{Re_u^{(2/3)}}{6} \right).$$

Під дією відцентрової сили інерції відбувається збільшення відносної швидкості частинок від нуля до деякого граничного значення, яке визначається умовою $F_u \leq F_c$.

При встановленні рівноваги, що описується законом Стокса, диференціальне рівняння руху частинок набуває вигляду рівняння І.В. Мещерського [102]:

$$m_u \frac{\omega_u^2}{r} - \frac{24}{Re_u} \cdot S \frac{(v_r - v_u)^2 \cdot \rho_r}{2g} = m_u \frac{d(v_r - v_u)}{dt}, \quad (2.3)$$

де перший і другий члени рівняння представляють собою відцентрову силу інерції та в'язкий опір середовища, а третій - інерційну силу частинок у радіальному напрямку.

Одним із головних явищ, що відіграє ключову роль у поведінці аеродисперсних систем, є процес випаровування крапель, який визначає тривалість існування водяного аерозолі.

При розгляді руху краплі, що випаровується, необхідно враховувати зміну її маси відповідно до рівняння [103]:

$$d_K^2 = d_{Ko}^2 - \left(\frac{d_{Ko}^2 - d_{KT}^2}{\tau_x} \right)$$

Якщо m_u виразити як $m_u = \frac{\pi d_K^3 \rho_{ж}}{6}$; $S = \frac{\pi d_K^2}{4}$ та $Re_u = \frac{d_K(v-v_u)}{\nu}$, то рівняння (2.3) можна записати у вигляді:

$$\frac{\omega_u^2}{r} - 18 \frac{V \cdot \rho_r (v-v_u)}{\left[d_{Ko}^2 - \left(\frac{d_{Ko}^2 - d_{KT}^2}{\tau_x} \right) \tau \right] \cdot \rho_{ж}} = \frac{d(v-v_u)}{d\tau}, \quad (2.4)$$

Для зручності інтегрування відносно швидкість крапель у радіальному напрямку подамо у диференціальній формі $v - v_u = \frac{dr}{d\tau}$ (за умови, що початкова швидкість краплі дорівнює нулю, а коефіцієнт при першій похідній для $Re_u \leq 1$)

$$A(\tau) = \frac{18V\rho_r}{\left[d_{Ko}^2 - \left(\frac{d_{Ko}^2 - d_{KT}^2}{\tau_x} \right) \tau \right] \cdot \rho_{ж}},$$

при $Re_u \leq 1000$:

$$A(\tau) = \frac{18V\rho_r}{\left[d_{Ko}^2 - \left(\frac{d_{Ko}^2 - d_{KT}^2}{\tau_x} \right) \tau \right] \cdot \rho_{ж}} - \left(1 + \frac{R_{eu}^{(2/3)}}{6} \right).$$

Тоді загальне диференціальне рівняння, що описує рух краплі, яка випаровується, у радіальному напрямку, набуде вигляду [101]:

$$\frac{dr^2}{d\tau^2} + A(\tau) \frac{dr}{d\tau} - \omega^2 r = 0, \quad (2.5)$$

Щоб визначити переміщення частинки разом із газовим потоком в осьовому напрямку, необхідно знати крок гвинтового руху, який визначається за формулою:

$$l_n = 2\pi r \cdot \operatorname{tg} \gamma, \quad (2.6)$$

де γ - усереднений кут підйому по спіралі.

Газовий потік, що містить пилові частинки, рухаючись в осьовому напрямку, надходить у зону дії горизонтального факела розпиленої рідини. Перебіг газового потоку в шарі диспергованих крапель рідини має складний характер, оскільки потік безперервно змінює напрям, огинаючи краплі, що рухаються від центру до корпусу апарату. Такий рух аерозоліу призводить до турбулентно-інерційного механізму уловлювання. Щоб встановити його

закономірності в шарі диспергованих крапель рідини, необхідно виходити з ідеалізованої моделі зваженого трифазного шару (рис. 2.3) [102].

При створенні такої моделі прийнято такі припущення:

- краплі нерухомі;
- розташовані в шаховому порядку по висоті та поперечному перерізу шару на рівній відстані одна від одної;
- поле течії потоку встигає встановлюватися на кожній ділянці шару.

Відповідно до [105], коефіцієнт осадження частинок на одиничній краплі, а, отже, і на одному ряду крапель шару, визначається лише числом I :

$$i = \text{stk} = \frac{v_u \cdot d_u^2 \rho_u}{18 \mu_r d_K}, \quad (2.7)$$

де v_u - середня осьова швидкість течії аерозолі в проміжках між краплями.

Очевидно, що

$$v_u = \frac{(d_K + b)^2}{(d_K + b)^2 - d_K^2} \cdot v_r \quad (2.8)$$

В шарі висотою dh_Φ міститься рядів крапель (точніше, їх осей).

При русі через шар крапель газового потоку з концентрацією частинок n остання зменшиться на величину d_n

$$-d_n = i n \frac{dh_\Phi}{\frac{\sqrt{3}}{2}(d_K + b)} = \frac{2i}{\sqrt{3}(d_K + b)} \cdot n \cdot dh_\Phi, \quad (2.9)$$

Оскільки величина $i = \text{Stk}$ є сталою для одного ряду крапель за умови незмінності інших величин у рівнянні (2.8), то, проінтегрувавши вираз (2.9) і виконавши перетворення, отримаємо:

$$n_K = n_o \cdot \exp \left\{ -i \frac{2h_\Phi}{\sqrt{3}(d_K + b)} \right\}, \quad (2.10)$$

де n_K - кінцева концентрація уловлених частинок при виході з шару крапель висотою h_Φ ;

n_o - початкова концентрація частинок.

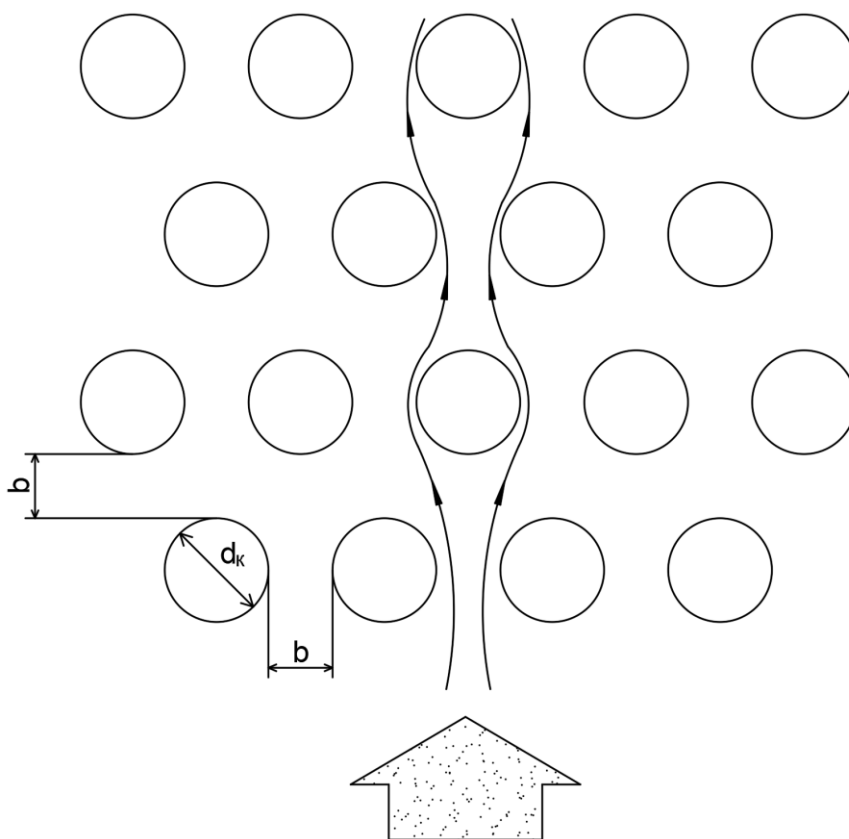


Рис. 2.3 Поле течії аерозолу в шарі диспергованої рідини дисковим розпилювачем

Тоді рівняння для розрахунку ефективності шару крапель (частки затриманих частинок) з урахуванням рівнянь (2.7) і (2.8) та відповідних перетворень набуває вигляду:

$$\eta_{II} = 1 - \exp\{-a \cdot \text{Stk}_c \cdot \Gamma_n\}, \quad (2.11)$$

де $a = \frac{d_K + b}{9\sqrt{3}(2d_K + b)}$ - коефіцієнт пропорційності,

$\text{Stk}_c = \frac{v_u \cdot d_u^2 \rho_u}{18 \cdot \mu_r \cdot d_K}$ - критерій Стокса, що характеризує осадження частинок в шарі крапель факела розпилу;

$\Gamma_n = \frac{h_\Phi}{b}$ - симплекс геометричної подібності.

Середню відстань між краплями можна визначити, виходячи з геометрії їхнього розташування відповідно до прийнятої моделі [86], за наступним рівнянням:

$$l = \left(\frac{6}{\pi \cdot C_k} \right)^{\frac{1}{3}} d_k, \quad (2.12)$$

де l – середня відстань між краплями;

C_k – концентрація крапель у шарі (кількість крапель на одиницю об'єму);

d_k – середній діаметр крапель.

Висоту факела розпику при одному диску можна визначити за залежністю [105]:

$$h_{\Phi} = (0.7 \cdot u + 5.7) \cdot 10^{-3}, \text{м} \quad (2.13)$$

де u – швидкість потоку крапельної суміші.

Висоту факела розпику багатодискового розпилювача необхідно визначати експериментальним шляхом.

Рух розпилених крапель у газовому середовищі неминуче призводить до передачі імпульсу навколишнім газовим масам, залучаючи їх до руху. У результаті формується двофазна струмінь віялоподібної конфігурації.

Диспергування рідини на дрібні краплі істотно впливає на ефективність процесів пиловловлення тепломасообміну.

У зв'язку з цим виникає необхідність визначення характеристик факела розпику.

2.2. Математичне моделювання дисперсності крапель в циклоні з дисковим розпилювачем

Аналіз теоретичних та експериментальних даних низки дослідників [106-109] показав, що в процесі осадження аерозолів краплями рідини велике значення має дисперсність крапель.

Дисперсність крапель у факелі розпику характеризується середнім об'ємно-поверхневим діаметром $d_{3,2}$, який визначає гіпотетичний діаметр крапель однакового розміру за умови, що їх загальна поверхня $\sum \pi d_i^2$ та загальний об'єм $\sum \pi d_i^3$ відповідають фактичним параметрам факела, що складається з крапель різних розмірів. Отже,

$$d_{3,2} = 6 \frac{V}{S_K} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2},$$

де V - загальний об'єм крапель;

S_K – загальна поверхня крапель;

Диспергування рідини дисковим розпилювачем [37] залежить від конструктивних особливостей, гідродинамічного режиму та фізичних властивостей рідини, що розпилюється.

Таким чином, на дисперсність розпилу рідини в газовому середовищі (із щільністю ρ_r та динамічною в'язкістю μ_r) впливають:

- продуктивність розпилювача W , м³/с;
- частота обертання розпилювача ω , о/с;
- діаметр диска розпилювача D_g , м;
- фізичні властивості рідини (щільність $\rho_{ж}$, кг/м³; динамічна в'язкість $\mu_{ж}$, кг/мс; поверхневий натяг $\sigma_{ж}$, Н/м);
- концентрація частинок мінералів C_n , кг/м³;
- щільність частинок мінералів ρ_t , кг/м³.

Залежність об'ємно-поверхневого діаметра крапель суспензії можна подати у вигляді:

$$d_{3,2} = f(D_g, \omega, W, \rho_c, \mu_c, \sigma_c, C_t, \rho_t, \rho_r, \mu_r), \quad (2.15)$$

Для визначення безрозмірних критеріїв, що характеризують процес диспергування рідини, яка містить механічні домішки, скористаємося положеннями π — теореми.

В рівнянні (2.15) всі величини мають розмірність, а три з них (D_g , ρ_c , μ_c) приймемо за основні:

$$[D_g] = [L] \cdot [M]^0 \cdot [T]^0, \quad (2.16)$$

$$[\rho_c] = [L]^{-3} \cdot [M] \cdot [T]^0, \quad (2.17)$$

$$[\mu_c] = [L]^{-1} \cdot [M] \cdot [T]^{-1}, \quad (2.18)$$

Основними величинами D_g , ρ_c та μ_c можуть бути прийняті у тому випадку, якщо вони незалежні.

Величини незалежні, якщо визначник (Δ) із показників ступенів при L, M та T в рівняннях (2.16)-(2.18) відмінний від нуля [109].

Обчислюємо визначник із показників ступенів при L, M та T рівняннях (2.16) – (2.18)

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -3 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 1 \cdot 1 \cdot (-1) + (-3) \cdot 1 \cdot 0 + (-1) \cdot 0 \cdot 0 - 0 \cdot 1 \cdot (-1) - 0 \cdot (-3) \cdot (-1) - 1 \cdot 0 \cdot 1 = -1 \neq 0$$

Отже, вибрані величини D_g , ρ_c та μ_c незалежні та можуть бути прийняті за основні.

Залежність об'ємно-поверхневого діаметру крапель суспензії від інших величин можна виразити в наступному вигляді [90a] βX :

$$\frac{d_{3,2}}{D_g^{\alpha_1} \rho_c^{\beta_1} \mu_c^{\chi_1}} = F \left(1, \frac{\omega}{D_g^{\alpha_2} \rho_c^{\beta_2} \mu_c^{\chi_2}}, \frac{W_c}{D_g^{\alpha_3} \rho_c^{\beta_3} \mu_c^{\chi_3}}, 1, 1, \frac{\sigma_c}{D_g^{\alpha_4} \rho_c^{\beta_4} \mu_c^{\chi_4}}, \frac{C_T}{D_g^{\alpha_5} \rho_c^{\beta_5} \mu_c^{\chi_5}}, \frac{\rho_T}{D_g^{\alpha_6} \rho_c^{\beta_6} \mu_c^{\chi_6}}, \frac{\rho_T}{D_g^{\alpha_7} \rho_c^{\beta_7} \mu_c^{\chi_7}} \right) \quad (2.19)$$

Отримане рівняння відображає зв'язок між безрозмірними комплексами.

Оскільки ліва частина рівняння (2.19) є безрозмірною величиною, то можна записати:

$$\frac{d_{3,2}}{D_g^{\alpha_1} \rho_c^{\beta_1} \mu_c^{\chi_1}} = 1, \text{ тобто } \frac{[L]}{([L])^{\alpha_1} ([M][L]^{-3})^{\beta_1} ([L]^{-1} [M][T]^{-1})^{\chi_1}} = 1;$$

$$[L] = [L]^{\alpha_1 - 3\beta_1 - \chi_1} [M]^{\beta_1 + \chi_1} [T]^{-\chi_1}$$

При порівнянні показників ступенів при однакових основах у лівій та правій частинах останнього рівняння отримаємо систему з трьох рівнянь, що містять три змінні α_1 , β_1 та χ_1 .

$$\begin{cases} \alpha_1 - 3\beta_1 - \chi_1 = 1 \\ \beta_1 + \chi_1 = 0 \\ -\chi_1 = 0 \end{cases}$$

Розв'язавши систему рівнянь, отримаємо, що:

$$\alpha_1 = 1, \beta_1 = 0, \chi_1 = 0.$$

Отже перший безрозмірний параметр:

$$\Pi_1 = \frac{d_{3,2}}{D_g}.$$

Виконавши аналогічні перетворення для інших безрозмірних параметрів, отримаємо:

$$\begin{aligned} \Pi_2 &= \frac{\omega D_g^2 \rho_c}{\mu_c}; \Pi_3 = \frac{\omega_c \rho_c}{D_g \mu_c}; \\ \Pi_4 &= \frac{\sigma_c D_g \rho_c}{\mu_c^2}; \Pi_5 = \frac{C_T}{\rho_c}; \\ \Pi_6 &= \frac{\rho_T}{\rho_c}; \Pi_7 = \frac{\rho_\Gamma}{\rho_c}; \Pi_8 = \frac{\mu_\Gamma}{\mu_c}. \end{aligned}$$

В результаті залежність (2.19) можна записати в наступному вигляді

$$\frac{d_{3.2}}{D_g} = F\left(\frac{\omega D_g^2 \rho_c^2}{\mu_c}, \frac{W_c \rho_c}{D_g \mu_c}, \frac{\sigma_c D_g \rho_c}{\mu_c^2}, \frac{C_T}{\rho_c}, \frac{\rho_T}{\rho_c}, \frac{\rho_\Gamma}{\rho_c}, \frac{\mu_\Gamma}{\mu_c}\right), \quad (2.20)$$

Таким чином, на підставі π - теореми встановлюємо, що вихідна функціональна залежність (2.15) при числі фізичних $n=\Pi$, які виражаються через три основні одиниці виміру L, M, T, зведена до восьми безрозмірних відношень. Вид функціонального зв'язку (2.20) може бути встановлений експериментальним шляхом.

2.3. Висновки по другому розділу

1. Розгляд фізичної картини взаємодії крапель з частинами пилу дозволив з'ясувати особливості протікання процесу пиловловлення краплями розпорошеної води.

2. На підставі аналізу закономірностей диспергування рідини розпилювачами встановлено, що дисперсність крапель рідини, що містить механічні домішки, залежить від конструктивних та гідродинамічних характеристик розпилювача, фізичних властивостей рідини, витрати рідини та концентрації механічних домішок.

3. Методом аналізу розмірностей отримано загальну функціональну залежність для визначення об'ємно-поверхневого діаметру краплі суспензії та чистої води. Ця залежність включає безрозмірний комплекс, який враховує наявність механічних домішок в рідині.

4. Отримано залежність у загальному вигляді для визначення ефективності пиловловлювання факелом диспергованої рідини.

5. Встановлено необхідність проведення факторного експерименту та факторного аналізу для вивчення впливу визначальних факторів на ступінь очищення аспіраційних викидів з підвищеною температурою.

6. Необхідно розглянути можливість вдосконалення апарату в наступних главах роботи, зокрема, через аналіз впливу параметрів розпилу на ефективність роботи розпилювача. Також важливо сформулювати загальну методику дослідження та визначити ключові фактори, що впливають на ефективність процесу пиловловлення.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПИЛОВЛОВЛЕННЯ

3.1. Опис експериментальної установки та методики проведення досліджень

3.1.1. Експериментальний стенд для дослідження диспергування рідини дисковим розпилювачем: конструкція та принцип роботи

Експериментальні дослідження розподілу води на поверхні дисків розпилювача, визначення густини та дисперсності факела розпилу, його геометричних характеристик здійснювалися на експериментальному стенді, принципова схема якого наведена на рис. 3.1 Основним елементом стенду є дисковий розпилювач із конусною насадкою [5].

На кришці циліндричної камери діаметром 1,0 м встановлено електродвигун змінного струму потужністю 0,6 кВт. За допомогою муфти диск розпилювач із конусною насадкою з'єднаний з валом електродвигуна. Вершина конусної насадки опущена в чашу із суспензією (водою).

Конструктивно дисковий розпилювач виготовлений із окремих частин. Це дозволило дослідити розпилювач з дисками різного діаметра (0,2; 0,3 та 0,4 м).

У прозорій кришці камери є люк, над яким встановлений механізм регулювання положення пастки крапель. Для візуального спостереження та визначення частоти обертання розпилювача використовувався стробоскопічний тахометр типу СТ-5.

В експериментальному стенді створювалася замкнута циркуляція суспензії та води. Циркуляційна система складається із посудини з водяною сорочкою (для стабілізації температури рідини), чаші, збірного бака і циркуляційного насоса. Продуктивність насоса дозволяла активно перемішувати суспензію в баку та чаші, що забезпечувало рівномірний склад рідини.

Витрату рідини вимірювали методом зважування мірної судини на технічних терезах.

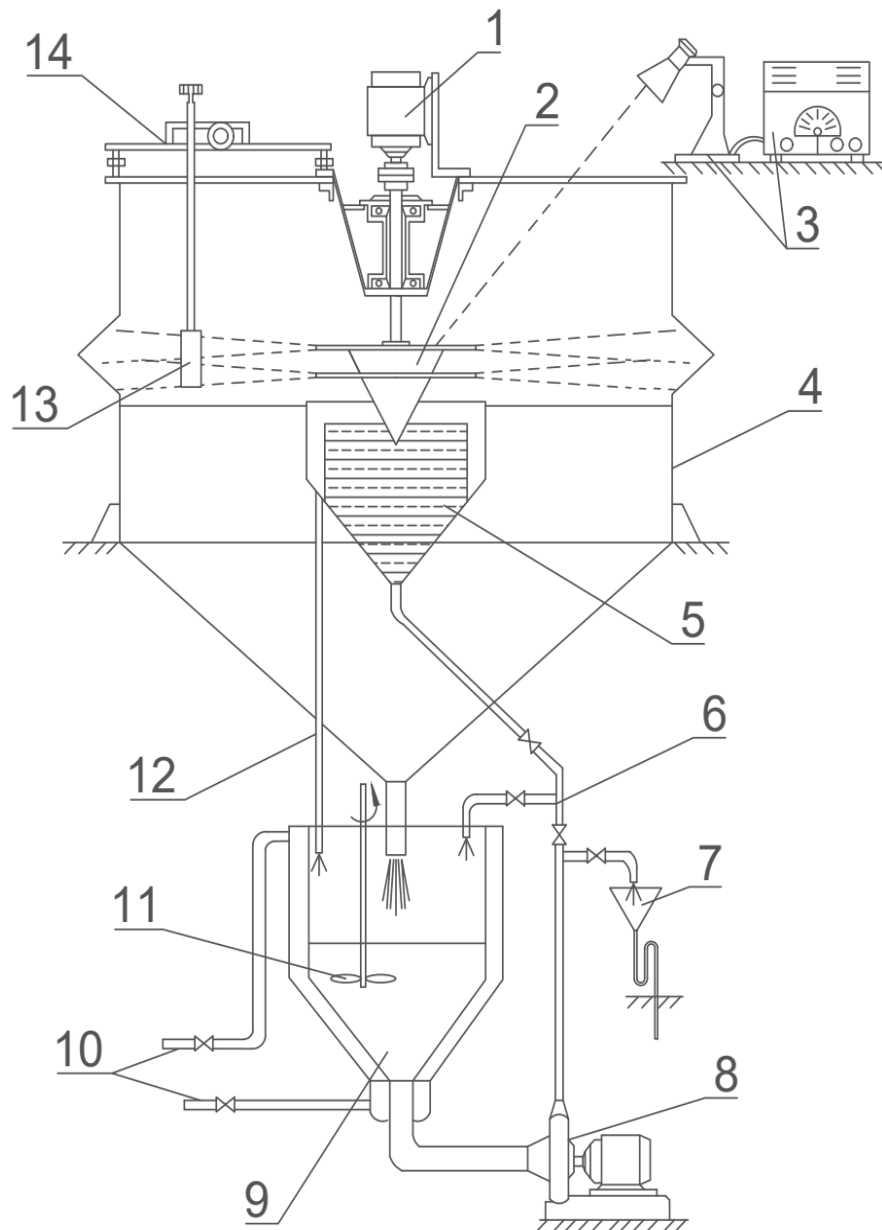


Рис. 3.1 Схема експериментального стану по розпилю суспензії та води

1 - електродвигун; 2 - дисковий розпилювач; 3 - стробоскопічний тахометр; 4 - циліндричний корпус з кільцевою камерою; 5 - чаша; 6 - трубопроводи; 7 - злив; 8 - насос; 9 - бак з водяною рубашкою; 10 - трубопроводи теплоносія; 11 - мішалка; 12 - циркуляційний трубопровід; 13 - пастка для крапель; 14 - координатник.

3.1.2. Дослідження розподілу рідини та геометричних характеристик факелу розпилю дискавого розпилювача

При конструюванні та дослідженні дискавого водорозпилювача спочатку досягався рівномірний розподіл води по дисках. Це забезпечувалося зміною периметра отворів у конічній поверхні.

Встановлено, що при збільшенні кількості отворів у дисках зі збереженням незмінного периметра проходу рідини, розподіл води по конічній поверхні і безпосередньо на дисках покращується. Це підтверджується фотографіями, представленими на рис. 3.2 та рис. 3.3.

Виявлено, що на рівномірний розподіл води по поверхні розпилювального диска впливає форма отворів та їх розмір.

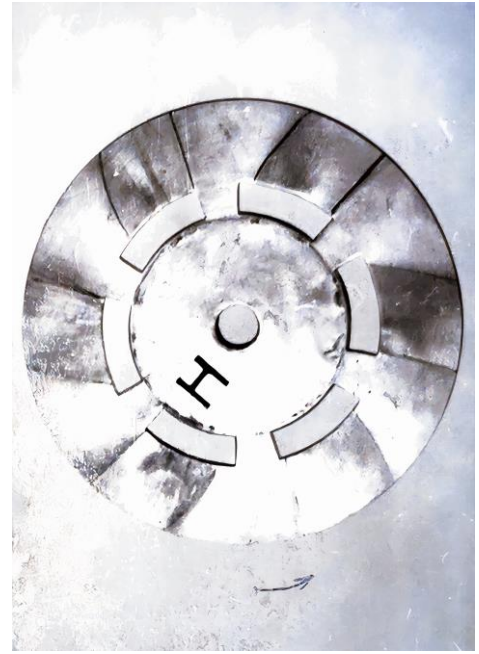
Злиття потоків води на конічній поверхні при проходженні через нижній диск відбувається на висоті 15 мм з кутом розкриття конуса 60° і швидкості обертання розпилювача $n=2820$ об/хв, після проходження води через середній диск - на висоті 28 мм.

Аналіз експериментальних даних показує, що для рівномірного розподілу води по дисках необхідно, щоб відстань між дисками становила 30 мм.

Заміри кількості розподіленої води між дисками і густини факела розпилю, які здійснювалися на експериментальному стенді за допомогою пастки, представлені в табл. 3.1.



а

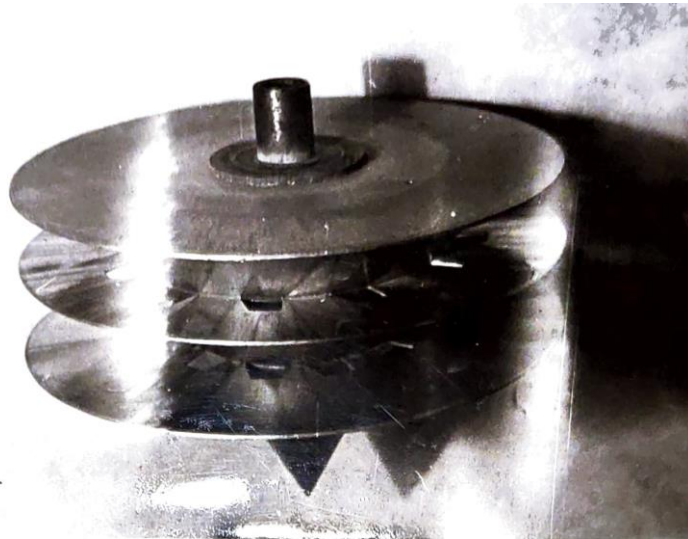


б

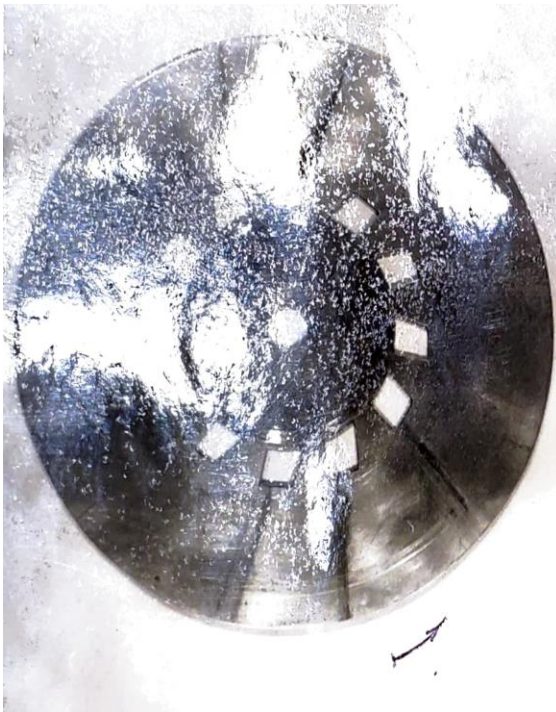
Рис. 3.2 Тридисковий водорозпилювач з конусною насадкою при куті розкриття конуса 60° , діаметрі дисків $D_d=300$ мм і обертанні за годинниковою стрілкою з швидкістю обертання $n=2820$ об/хв

а — загальний вид водорозпилювача;

б — нижній диск водорозпилювача зі слідами руху водяної плівки по поверхні диску.



а



б



в

Рис. 3.3 Тридисковий водорозпилювач з конусною насадкою при куті розкриття конуса 60° , діаметрі дисків $D_d=300$ мм і обертанні за годинниковою стрілкою з швидкістю обертання $n=2820$ об/хв

а — загальний вигляд водорозпилювача;

б — нижній диск водорозпилювача зі слідами руху водяної плівки по поверхні диска (вид знизу);

в — суцільний диск з конічною вставкою висотою 30 мм зі слідами розподілу води по поверхні (вид знизу).

Таблиця 3.1

Результати дослідження розподілу води на диски тридискового розпилювача з діаметрами дисків 300 мм і швидкістю обертання $n=2820$ об/хв при продуктивності розпилювача 397 кг/год (відбір здійснювався на відстані 40 мм від краю дисків).

Найменування дисків розпилювача	Масова кількість води, що розпиляється диском, кг/год			
	1-ий відбір	2-ий відбір	3-ий відбір	4-ий відбір
Нижній	132.8	132.9	132.7	132.8
Середній	132.2	132.0	132.3	132.2
Верхній (без отворів)	132.0	132.1	132.0	132.0

Потім цей водорозпилювач помістили в модель пиловловлювача і провели дослідження з очищення гарячого повітря від пилу. При температурі повітря 100-150 °С солі, що містилися в розпилюваній воді, розкладалися, залишаючи слід на шляху руху по поверхні водорозпилювача.

Це дозволило візуально спостерігати картину розподілу води як на конічній поверхні розпилювача, так і на поверхні дисків (див. рис. 3.2, 3.3).



Рис. 3.4 Дисківий розпилювач з конусною насадкою

а — чотиридисківий розпилювач з круглими отворами для проходу рідини (вид знизу);

б — профіль факела розпилю чотиридисківого розпилювача (при $W_p=0.38$ м³/год, $\theta=15$ °С, $\omega R=31.4$ м/с).

Таким чином встановлено, що для рівномірного розподілу води на диски необхідно передбачати по 12 отворів у дисках із співвідношенням периметрф отворів у конічній поверхні (для трьохдисківого розпилювача): на нижньому диску - $2/3$ довжини кола, на середньому диску - половина довжини кола.

Відстань між дисками має становити 30 мм.

Для серійного виготовлення розпилювачів запропоновано конструкцію, загальний вигляд якої представлено на рис. 3.4. а.

Геометричні характеристики факела розпилю визначали за допомогою пристрою, що дозволив вимірювати межі польоту крапель. Пристрій був виготовлений із вологопоглинаючого матеріалу. Для визначення верхньої і нижньої меж факела розпилю воду підфарбовували, щоб чітко позначити лінії розподілу на водопоглинаючому матеріалі. Заздалегідь було нанесено координатну сітку та горизонтальну площину диска. За допомогою мікрометра вимірювали висоту факела розпилю в перерізах на відстані від

краю диска 0,055; 0,105; 0,155; 0,205; 0,235 м. Результати вимірювань висоти факела розпилу одностороннього водорозпилювача з швидкістю обертання $n=2820$ об/хв наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Результати інструментальних вимірювань висоти факела розпилу дискового водорозпилювача з конусною насадкою (діаметр диска $D_d=300$ мм, швидкість обертання - $n=2820$ об/хв, товщина диска - 0,0015 м, продуктивність водорозпилювача - 123,6 кг/год).

Найменування величин вимірів	Результати замірів				
	I	II	III	IV	V
Відстань від краю диску, м	0,055	0,105	0,155	0,205	0,235
Висота факелу розпилу над горизонтальною площиною диску, м	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$12,5 \cdot 10^{-3}$	$11,0 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$13,0 \cdot 10^{-3}$	$10,5 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$12,5 \cdot 10^{-3}$	$11,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Загальна висота факелу розпилу, м	$17,0 \cdot 10^{-3}$	$39,0 \cdot 10^{-3}$	$40,5 \cdot 10^{-3}$	$41,0 \cdot 10^{-3}$	$39,0 \cdot 10^{-3}$
	$17,0 \cdot 10^{-3}$	$39,5 \cdot 10^{-3}$	$42,0 \cdot 10^{-3}$	$44,0 \cdot 10^{-3}$	$39,5 \cdot 10^{-3}$
	$17,0 \cdot 10^{-3}$	$39,0 \cdot 10^{-3}$	$41,0 \cdot 10^{-3}$	$42,5 \cdot 10^{-3}$	$38,0 \cdot 10^{-3}$

Профіль і план факела розпилу за даними дослідження представлені на рис. 3.5.

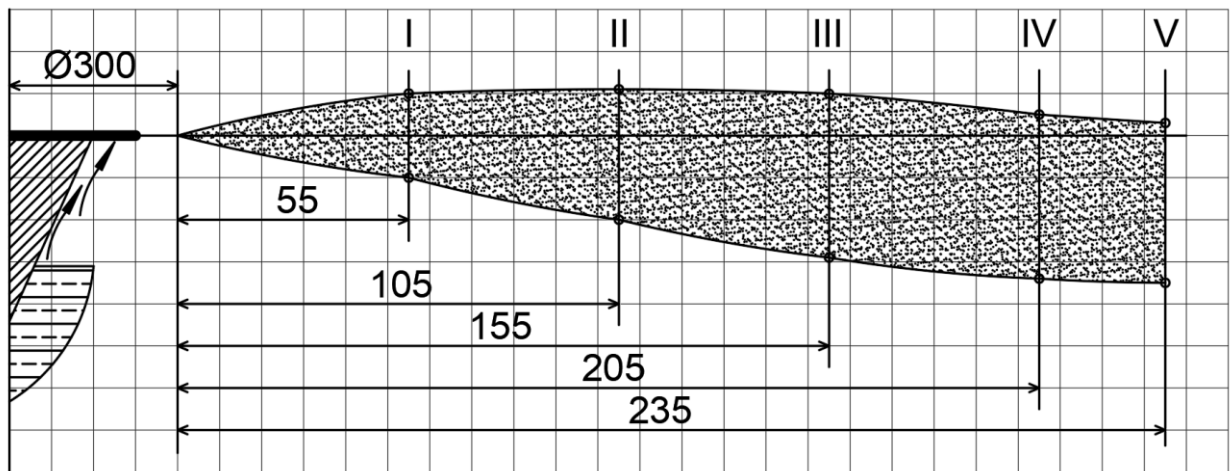


Рис. 3.5 Профіль факелу розпилю води однодисковим розпилювачем з конусною насадкою за даними табл. 3.2.

Дослідження показали, що при розпилюванні води дисковим розпилювачем з конусною насадкою в циліндричній камері діаметром 1,0 м факел розпилю на відстані 0,105 м від краю диска становить 0,04 м за висотою, а потім висота змінюється незначно.

Таким чином, форма і структура (кут розкриття та далекобійність) факелу взаємопов'язані з конструктивними параметрами та режимом роботи розпилювача.

Так, кут розкриття поступово збільшується зі збільшенням обертів розпилювача. Далекобійність факелу (активна зона) пропорційна витраті рідини і кутовій швидкості розпилювача.

Крім форми і структури факела, головною характеристикою є ступінь розпилю рідини та концентрація крапель в одиниці об'єму факелу.

3.1.3. Вплив механічних домішок на дисперсність факелу розпилю оборотної води

Для визначення дисперсності розпилю суспензії та водопровідної води було застосовано метод уловлювання крапель в імерсійне середовище з подальшим мікрофотографуванням [110]. Установка для мікрофотографування включає мікроскоп МБІ-1, мікрофотонасадку і

фотокамеру AmScope MU Series (США), яка дозволяла виконувати спостереження за краплями з пилинками аж до моменту зйомки.

Як експериментальний план обрано латинський куб з однократними спостереженнями.

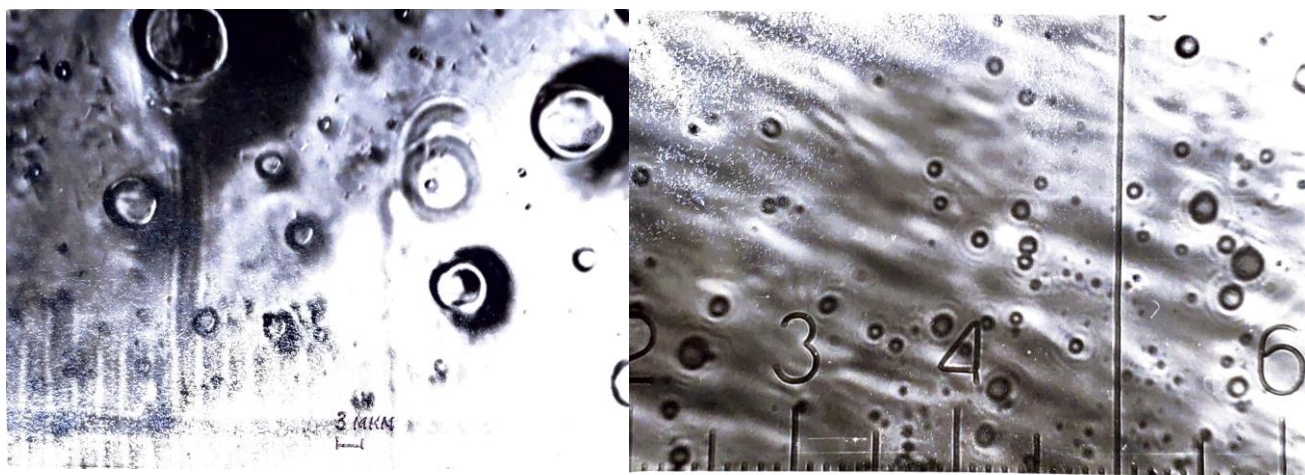
На підставі отриманих даних встановлено, що основними (істотними) факторами, що впливають на розпил рідини дисковим розпилювачем є: W_p - витрата рідини, що розпилюється, $\text{м}^3/\text{с}$; θ - температура рідини, $^{\circ}\text{C}$; ωR - окружна швидкість диска, $\text{м}/\text{с}$; C_T - концентрація механічних домішок в оборотній воді, $\text{кг}/\text{м}^3$. При цьому три з них вивчалися на трьох рівнях, а останній фактор — на дев'яти рівнях.

Загалом проведено 27 дослідів. План та результати експерименту наведено в таблиці.

За допомогою мікрофотографій (рис. 3.6 та 3.7) встановлено, що зі збільшенням кількості механічних домішок (часток кварцу з $b_{50}=5$ мкм) дисперсність крапель зростає. При цьому збільшується кількість дрібних крапель, а об'ємно-поверхневий діаметр крапель зменшується.

Мікрофотографії крапель показали, що механічні домішки (частинки кварцу) розміщуються на поверхні краплі у вигляді колоній (див. рис. 3.7), що має важливе значення для осадження аерозолів на поверхні крапель.

Зі збільшенням температури води об'ємно-поверхневий діаметр крапель зменшується. При використанні оборотної води для пиловловлення необхідно враховувати температурний фактор рідини.



а

б

Рис. 3.6 Мікрофотографії розпику водопровідної води дисковим розпилювачем

а — водопровідна вода при $\theta=18$ °С (витрата води $W=0.18$ м³/год; $\omega R=23.6$ м/с);

б — водопровідна вода при $\theta=45$ °С (витрата води $W=0.14$ м³/год; $\omega R=31.4$ м/с).

Дослідження показали, що зі збільшенням витрати рідини об'ємно-поверхневий діаметр крапель збільшується (додаток 3).

У результаті обробки експериментальних даних отримано в явне рівняння для визначення середнього об'ємно-поверхневого діаметра краплі суспензії:

$$\frac{d_{3,2}}{d_g} = 4.81 \left(\frac{d_g^2 \omega \rho_c}{\mu_c} \right)^{-0.47} \cdot \left(\frac{W_c \rho_c}{d_g \mu_c} \right)^{0.33} \cdot \left(\frac{\sigma_c d_g \rho_c}{\mu_c^2} \right)^{-0.22} \cdot \left(\frac{C_T}{\rho_c} \right)^{0.05}, \quad (3.1)$$

Динамічна в'язкість суспензії визначалася за формулою Ейнштейна [111]

$$\mu_c = \mu_{ж} (1 + 2.5\varphi) \quad (3.2)$$

де φ - об'ємна концентрація твердої фази в суспензії.

Під час експерименту динамічна в'язкість вимірювали за допомогою віскозиметра типу ВЗ-І.

Щільність суспензії визначали за формулою Кривошеєва Н. П. [112]

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{\chi}{\rho_T + \frac{1-\chi}{\rho_{ж}}}} \quad (3.3)$$

де x - масова частка твердої фази в суспензії; $\rho_T, \rho_{\text{ж}}$ — відповідно, щільність твердої фази та рідини.

Поверхневий натяг σ_c суспензії вимірювали за допомогою сталамометра.

Окрім плану експерименту (див. табл. 3.2) проведено дослідження з диспергування дистильованої та водопровідної води. Загалом, разом із планом, наведеним у додатку 3, виконано більше 80 дослідів у різних режимах. Встановлено, що за однакових умов середній об'ємно-поверхневий діаметр крапель дистильованої води на 5-8% більше $d_{3,2}$ водопровідної води.

Для визначення середнього об'ємно-поверхневого діаметра краплі водопровідної води отримано залежність такого вигляду

$$\frac{d_{3,2}}{D_g} = 0.38 \left(\frac{W_{\text{ж}}}{D_g^3 \omega} \right)^{0.12} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{ж}}}{D_g^3 \omega^2 \rho_{\text{ж}}} \right)^{0.26} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{D_g^2 \omega \rho_{\text{ж}}} \right)^{0.15}, \quad (3.4)$$

Діапазон достовірності рівнянь (3.1) та (3.4) при наступних режимних параметрів процесу та фізичних властивостях рідини й суспензії:

$$D_g = (0.2 - 0.4) \text{ м}; \quad \omega = (20 - 60) \text{ і/с}; \quad W_c, W_{\text{ж}} = (0.06 - 0.185) \text{ м}^3/\text{год};$$

$$\rho_c, \rho_{\text{ж}} = (990 - 1050) \text{ кг/м}^3; \quad \mu_c, \mu_{\text{ж}} = (0.6 \cdot 10^{-3} - 1.3 \cdot 10^{-3}) \text{ кг/м} \cdot \text{с};$$

$$\sigma_c, \sigma_{\text{ж}} = (0.068 - 0.074) \text{ Н/м};$$

$$C_T = (0.2 - 4.0) \text{ кг/м}^3 \text{ при медіанному діаметрі твердих частинок, що дорівнює 5 мкм.}$$

Таким чином отримані явні рівняння для визначення середнього об'ємно-поверхневого діаметра краплі суспензії та водопровідної води у факелі розпику, сформованому дисковим розпилювачем із конусною насадкою.

3.2. Дослідження впливу дисперсності пилу на ефективність пиловловлення

3.2.1. Експериментальний стенд для дослідження ефективності ступеня очищення

Відповідно до поставлених задач розроблено та змонтовано експериментальний стенд (рис. 3.7) для дослідження аеродинамічних та пилових характеристик пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем [113].

Повітря, об'єм якого регулювався дросельним клапаном 23, забирався з приміщення за допомогою відцентрового вентилятора 22. Пройшовши вимірювальний колектор 1, електропідігрівачі 2 і 7 з регулюючим температурним пристроєм 38, воно надходило у випробувану модель водопиловловлювача 30 циклонного типу з дисковим розпилювачем.

Запилення повітря дрібнодисперсним пилом, дисперсний склад якого представлений на рис. 3.12, проводилося за допомогою пилоутворювача 37 ежекторного типу. Стиснене повітря надходило в пилоутворювач через дросельну шайбу 8 від компресора 9. Запилене повітря потрапляло в пиловловлювач, де інтенсивно змішувалося з дисперговою водою, в результаті чого відбувалося змочування пилу, що містився в повітрі.

Вода до дискового розпилювача надходила з водопроводу через електрокотел 21 і бак з мішалкою 19. Підігрів води до необхідної температури для експерименту здійснювався в електрокотлі 21. Витрата води регулювалася зміною глибини занурення вершини конуса у воду та контролювалася шляхом зважування мірної посудини 12 на терезах 15.

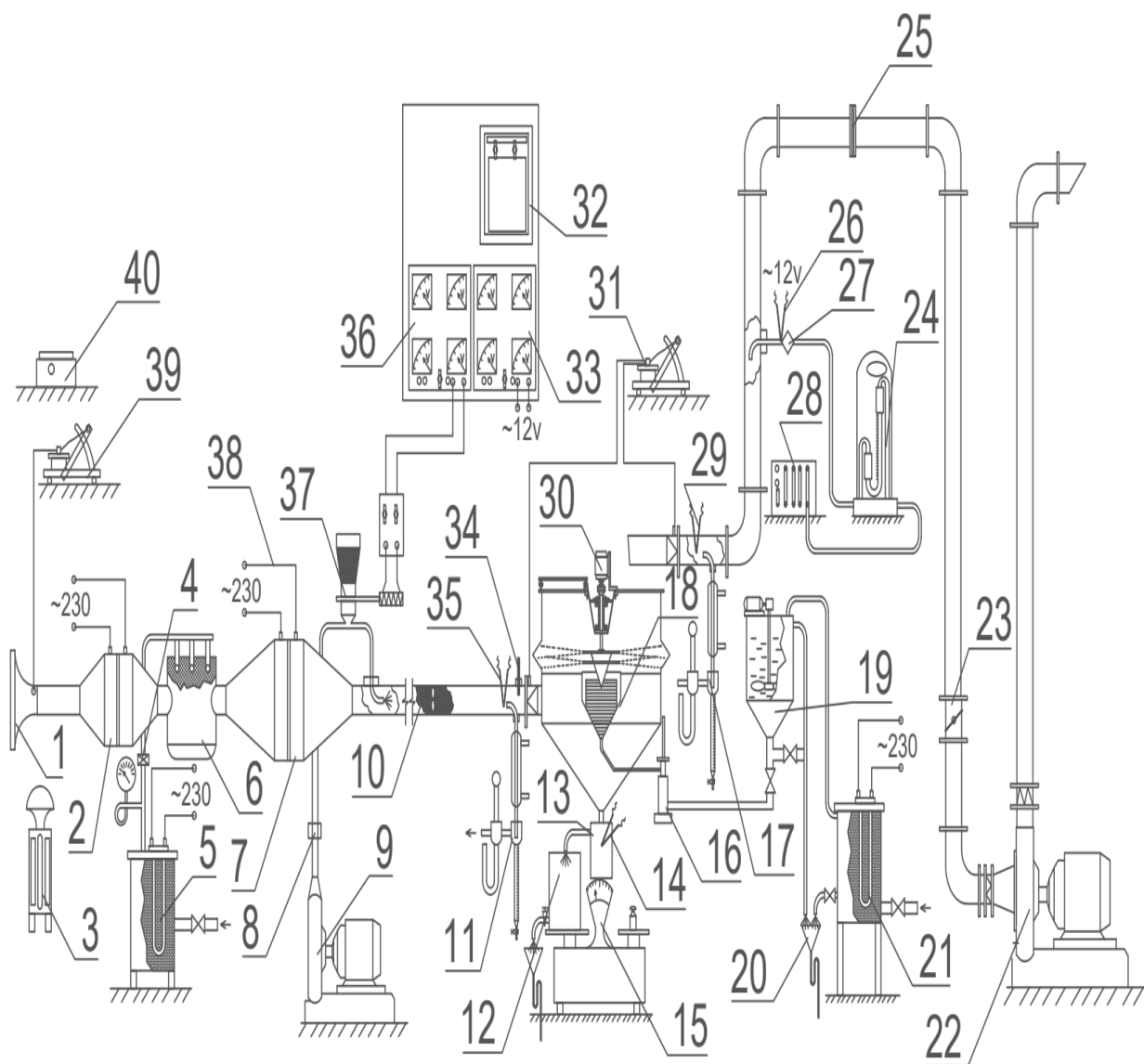


Рис. 3.7 Схема експериментального стану

1 – вимірювальний колектор; 2 – електропідігрівач (електрокалорифер); 3 – аспіраційний психрометр; 4 – вимірювальна діафрагма пари; 5 – електрокотел для генерації пари; 6 – змішувальна камера; 7 – додатковий електропідігрівач; 8 – дросельна шайба; 9 – компресор; 10 – стабілізуючі сітки; 11 – пристрій для визначення вологості (вхідний); 12 – мірна посудина; 13 – трубопровід зливу суспензії; 14 – термопара (хромель-краплинна); 15 – технічні терези; 16 – клапан подавання суспензії; 17 – пристрій для визначення вологості (вихідний); 18 – термопара вбудована в апарат; 19 – бак з мішалкою для приготування суспензії; 20 – викид в каналізацію; 21 – електрокотел для нагріву води; 22 – відцентровий вентилятор; 23 – дросель

клапан; 24 – реометр Т-80; 25 – вимірювальна діафрагма (на виході); 26 – термопара; 27 – камера стабілізації потоку; 28 – ротаційна установка ПРУ-4; 29 – термопара; 30 – пиловловлювач циклонного типу з дисковим розпилювачем; 31 – мікроманометр ММН; 32 – самописний потенціометр ЕПП-09М; 33 – шкала з вольтами; 34 – технічний отвір для взяття проб; 35 – термопара; 36 – шкала для контролю подачі пилу; 37 – пилоутворювач ежекторного типу; 38 – регулятор температури (потужності калорифера); 39 – мікроманометр ММН; 40 – барометр.

Експериментальний стенд був оснащений контрольно-вимірювальними приладами: мікроманометрами 31, 39 типу ММН, пневмотрубками, хромель-краплинними термопарами 14, 18, 26, 29, 35, показники яких фіксувалися самописним електронним потенціометром 32 типу ЕПП-09М, барометром 40, психометром 3 та вимірювальними шайбами 4, 8, 25.

Для підвищення надійності вимірювання температури дублювалося за допомогою лабораторних ртутних термометрів з ціною поділу 0,1 °С.

Витрата повітря постійно контролювалася колектором 1, встановленим на вході в систему, та дросельною діафрагмою 25, розташованою після пиловловлювача.

Кутова швидкість обертання дискового водорозпилювача вимірювалася стробоскопічним тахометром типу СТ-5.

Температурний режим у заданому інтервалі на вході в пиловловлювач підтримувався автоматичним пристроєм, розробленим відділом метрології НІСТ.

Щоб уникнути втрат тепла в навколишнє середовище, робочі ділянки експериментальної установки були ізольовані азбестом товщиною 30 мм (ізоляція не показана на схемі для кращої наочності).

Особливу увагу було приділено тепловій та гідродинамічній стабілізації потоку, що надходить у модель циклонного апарата. З цією метою ділянка повітроводу між дозатором суспензії 37 і апаратом 30 була

виконана прямолінійною, довжиною 1500 мм. Крім того, перед дозатором і після нього були встановлені металеві сітки 10 з осередками 2 мм.

При вивченні впливу вологості запиленого потоку на процес пиловловлення повітряний потік, попередньо підігрітий в електрокалорифері 2, насичувався парою в камері 6. Пар вироблявся в електрокотлі 5 і подавався у необхідній кількості до змішувальної камери 6. Витрата пари контролювалася вимірювальною діафрагмою 4.

Вологовміст повітря до зволоження визначався за допомогою аспіраційного психометра 3, а після зволоження - на вході та виході пиловловлювача конденсаційним методом за допомогою пристроїв 11 і 17.

Бак з мішалкою 19 використовувався для приготування суспензії під час дослідження впливу концентрації механічних домішок у воді.

Відбір проб на запиленого повітря здійснювався за допомогою ротаційної установки 28 типу ПРУ-4 через пилозабірну трубку конструкції НПОГАЗ з електропідігрівачем. Об'єм відібраного повітря фіксувався за допомогою реометра 24 типу Т-80.

3.2.2. Методика визначення аеродинамічних характеристик та витрати води в циклонному пиловловлювачі з дисковим водорозпилювачем

Витрата повітря в експериментальній моделі пиловловлювача визначалася за статичним тиском у повітроводі безпосередньо після входу в колектор. Колектор має тарувальний коефіцієнт, рівний 1, тому величина $H_{ст}$, яка вимірювалася за допомогою мікроманометра типу ММН, дорівнює швидкісному напору в перерізі трубки.

Витрата повітря у пиловловлювачі експериментального стенда визначалася шляхом обчислення середньої швидкості повітря в перерізі повітроводу за значеннями динамічного тиску. Динамічний тиск у повітропроводі визначався за допомогою пневмометричної трубки та мікроманометра типу ММН.

Введення трубки в повітропровід здійснювалося через отвори, обладнані герметичними люками. Вимірювальні отвори були розташовані вздовж взаємно перпендикулярних діаметрів. Точність встановлення пневмотрубки забезпечувалася координатним пристроєм, який дозволяв переміщення трубки з точністю до 0,5 мм.

Повітропроводи круглого перерізу умовно поділялися на концентричні кільця з рівновеликими площами.

Відстань точок, у яких проводилися виміри, від внутрішньої стінки повітропроводу визначалася за рівняннями [98]:

$$l_x = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{2x-1}{2n}} \right), \quad (3.5)$$

$$l'_x = \frac{D}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{2x-1}{2n}} \right), \quad (3.6)$$

де l_x - відстань від точки на внутрішній стінці повітропроводу до найближчої точки виміру на даному кільці, мм;

l'_x - те саме, для дальньої точки виміру даного кільця, мм;

D - діаметр повітропроводу, м;

x - порядковий номер кільця;

n - число кілець, на які розділено переріз повітропроводу.

За отриманими значеннями динамічних тисків у точках рівновеликих площин перерізу визначалося середнє значення:

$$l_{\text{дин.ср}} = \left(\frac{\sum_1^x \sqrt{H_{\text{дин.х}}}}{N} \right) \frac{\rho_{\text{сп.м}}}{\rho_{\text{сп}}}, \text{кг/м}^2 \quad (3.7)$$

де N - число вимірів у перерізі, шт;

$\rho_{\text{сп}}$ - густина спирту в мікроманометрі при його таруванні, г/см³;

$\rho_{\text{сп.м}}$ - густина спирту в мікроманометрі під час виробництва замірів, г/см³.

За значенням $H_{\text{дин.ср}}$ визначалася середня швидкість повітря в повітроводі за формулою [98]:

$$v_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{2g \cdot H_{\text{дин.ср}}}{\rho_{\text{в}}}}, \text{м/с} \quad (3.8)$$

де g - прискорення сили тяжіння, м/с²;

$\rho_{\text{в}}$ - густина повітря, що переміщається, кг/м³.

Щільність повітря визначається за формулою [112]:

$$\rho_v = \rho_v \frac{273}{T} \left(1 - 0.378 \frac{P_n}{P_0} \right), \text{кг/м}^3 \quad (3.9)$$

де ρ_0 - густина сухого повітря при температурі 0 °C і барометричному тиску 760 мм рт.ст.;

T - температура повітря, °K;

P_n - парціальний тиск ненасиченої водяної пари (мм рт.ст.) при температурі повітрянопарової суміші;

P_0 - барометричний тиск, мм рт.ст.

Витрата повітря визначається за формулою:

$$G_v = \sum_1^n f v_{cp} \rho_v, \text{кг/с} \quad (3.10)$$

Гідравлічний опір пиловловлювача визначався по різниці повних тисків на вході та виході з нього за формулою [114]:

$$\Delta P = P'_{ст} + P'_{ск} - P''_{ст} - P''_{ск}, \text{кг/м}^2 \quad (3.11)$$

де $P'_{ст}$, $P''_{ст}$ - статичний тиск до і після пиловловлювача;

$P'_{ск}$, $P''_{ск}$ - швидкісні тиски на вході та виході пиловловлювача.

Різниця статичних тисків у дослідженнях визначалася по мікроманометру типу ММН.

Швидкісні тиски на вході та виході пиловловлювача визначаються за формулою

$$P_{ск} = \frac{\rho_v \cdot v_v^2}{2g}, \text{кг/м}^2 \quad (3.12)$$

де v_v - швидкість повітря у відповідному патрубку апарату.

За відношенням втрат тиску в пиловловлювачі ΔP до швидкісного тиску повітря на вході в апарат або у визначальному горизонтальному перерізі його корпусу (активній зоні факела розпилювача) визначалися коефіцієнти гідравлічних опорів $\zeta_{вх}$ та ζ_a , віднесені відповідно до перерізу на вході та перерізу в активній зоні пиловловлювача, за формулою:

$$\zeta_{вх} = \frac{\Delta P}{P_{ск'вх}}, \quad (3.13)$$

Витрату води, що подається до пиловловлювача, визначали ваговим методом.

Визначення наявності краплиносу після випробуваного пиловловлювача здійснювали шляхом відбору проб повітря на алонжі, заповнені силікагелем.

Алонжі зважували до та після експерименту на терезах ВЛА-200М, а за приростом маси визначали загальну кількість вологи в повітрі, що виходило з пиловловлювача. Велечину краплиносу обчислювали як різницю між загальним вмістом вологи в повітрі на виході з установки та кількістю вологи, що надходила з повітрям в систему.

3.2.3. Методи вимірювання температури та вологості повітря (газу)

Температуру повітря (газу) та води до і після апарата вимірювали ртутними лабораторними термометрами з ціною поділки 0,1 °С, а також заздалегідь відкаліброваними хромель-краплинними термопарами, встановленими в контрольних точках вимірювання (див. рис. 3.8).

Показання термопар фіксували самописним електронним потенціометром типу ЕПП-09М, який відображав результати та реєстрував їх на стрічковій діаграмі. Клас точності пристрою - 0,5.

У виробничих умовах температуру запилених потоків і води вимірювали хромель-краплинними термопарами. Їхні показання фіксували переносним потенціометром ПП-63 (клас точності — 0,05), а додатковий контроль здійснювали за допомогою ртутних термометрів.

Вологість повітря в приміщенні визначали за допомогою аспіраційного психрометра.

Визначення вологості повітряного потоку до та після пиловловлювача (при додаванні водяної пари) здійснювали конденсаційним методом за допомогою спеціального пристрою, схема якого наведена на рис. 3.9.

Повітря (газ), що містило водяні пари, проходячи через холодильник 1, охолоджувалося нижче точки роси, внаслідок чого сконденсована волога збиралася у мірній піпетці 3.

При цьому вимірювали:

- кількість повітря - за допомогою реометра;
- температуру - ртутним термометром;
- різницю тисків - U-подібним манометром.

Вологість визначали як відношення суми сконденсованої води та абсолютного вологовмісту насиченого повітря (газу) до загальної кількості повітря.

Контроль за визначенням вологості повітря після пиловловлювача здійснювали за допомогою сухої та мокрої термопар.

3.2.4. Методи визначення концентрації пилу у повітрі

Початкова масова концентрація пилу (під час лабораторних досліджень) у повітрі, що надходило в пиловловлювач, визначалася на основі маси пилу $G_{\text{п}}$, поданого у вхідний повітропровід за час досвіду T , та об'єму повітря, що пройшло через апарат за той самий промвжок часу при витраті повітря $L_{\text{в}}$ за формулою:

$$Z_{\text{н}} = \frac{G_{\text{п}}}{L_{\text{в}} \cdot \tau}, \text{мг/м}^3 \quad (3.14)$$

Час досліду фіксувався за допомогою секундоміра.

Кінцева запиленість повітря, що виходило з пиловловлювача, визначалася прямим методом - шляхом відбору проби запиленого повітря, зважування осадженого пилу та подальшого розрахунку його масової концентрації як відношення знайденої маси до одиниці об'єму повітря.

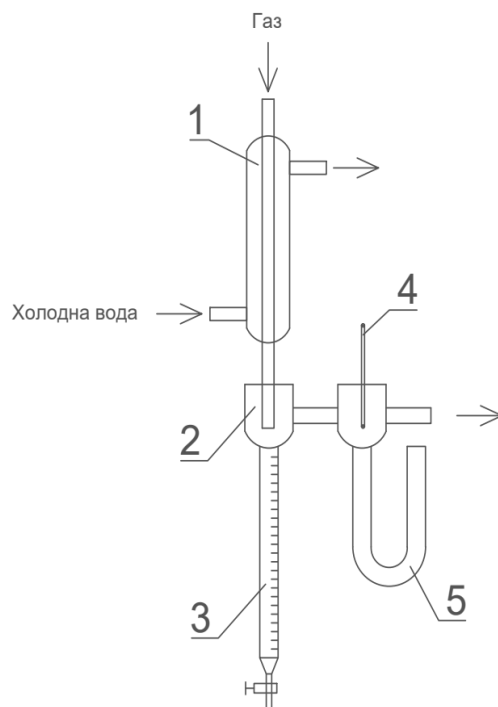


Рис. 3.8 Прилад для виявлення вологи в газах конденсаційним методом.

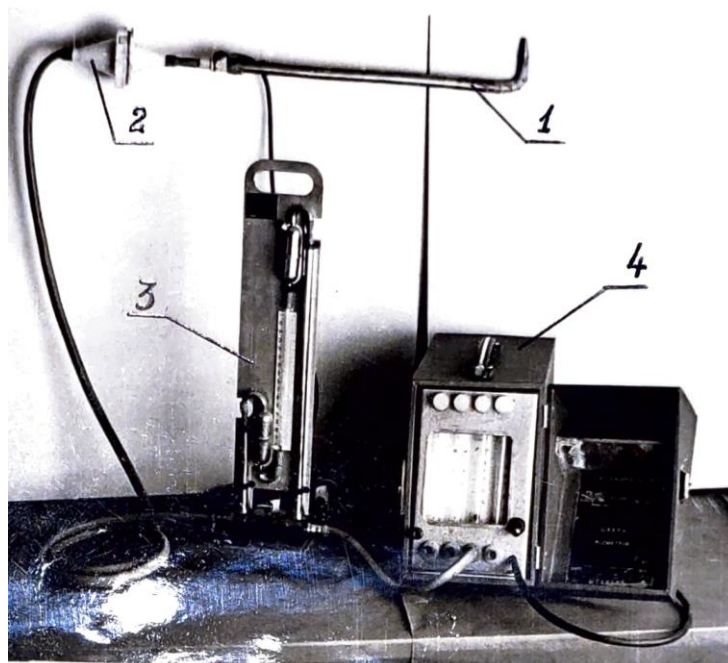


Рис. 3.9 Установка для відбору пилових проб

- 1 — пилозабірна трубка з електрообігрівом;
- 2 — патрон для фільтрів АФА-В-18;
- 3 — реометр;
- 4 — переносна ротаційна установка типу ПРУ-4.



Рис. 3.10 Пилозабірна трубка з внутрішньою фільтрацією.

Для відбору пилових проб застосовувалася установка (рис. 3.9), що складалася з переносної ротаційної установки, реометра, пилозабірної трубки з електрообігрівачем конструкції НПОГАЗу із зовнішньою фільтрацією та спеціального патрона з фільтрами АФА-В-18, виготовленими з синтетичного матеріалу ФПП-15.

Під час відбору проб дотримувалася умова рівності швидкостей запиленого потоку в повітроводі та швидкості повітря, що надходило у вхідний отвір пилозабірної трубки.

Витрата повітря, що всмоктується, для забезпечення рівності швидкостей у вхідному отворі пилозабірної трубки та в повітроводі, визначалася за формулою:

$$L_{\text{в}} = 0.0471 \cdot v \cdot d^2, \text{л/хв} \quad (3.15)$$

де 0,0471 - постійний коефіцієнт;

v - швидкість потоку повітря в повітроводі, м/сек;

d - діаметр вхідного отвору пилозабірної трубки, мм.

Тривалість взяття проби визначалася за формулою:

$$\tau_{\text{min}} = \frac{a \cdot 1000}{Z_{\text{к}} \cdot L_{\text{в}}}, \text{хв} \quad (3.16)$$

де a - мінімально необхідна навішування пилу на фільтрі, мг;

$Z_{\text{к}}$ - концентрація пилу в повітрі, мг;

$L_{\text{в}}$ - витрати повітря через фільтр, л/хв.

Відбір проб запаленого повітря здійснювали на вертикальній ділянці повітроводу (див. рис. 3.7) при рівномірному переміщенні пилозабірної трубки вздовж двох взаємно перпендикулярних осей у перерізі повітроводу.

Після завершення відбору проби фільтр витягували з патрона, повертали у пакет, в якому він зберігався до взяття проби, та укладали у спеціальний ящик із гніздами.

Зважування фільтрів до та після відбору проб проводилося на аналітичних вагах ВЛА-200М з точністю до 10^{-7} кг.

Запиленість повітря після пиловловлювача визначалася за формулою:

$$Z_K = \frac{1000(m_2 - m_1)}{L_j \cdot \tau}, \text{мг/нм}^3 \quad (3.17)$$

де m_1 - маса чистого фільтра, мг;

m_2 - маса фільтра з пилом, мг;

τ - час відсмоктування запиленого повітря через фільтр, хв;

L^0 - об'єм відсмоктувального через фільтр повітря в л, приведений до нормальних умов.

Об'єм відсмоктуваного повітря визначався за формулою:

$$L_o = L_v \frac{P_6}{760} \cdot \frac{273}{T}, \text{нм}^3 \quad (3.18)$$

де L_v - обсяг відсмоктуваного повітря в л при температурі T °К та атмосферному тиску P (мм рт.ст.) у місці відбору проби.

Атмосферний тиск замірявся барометром.

3.2.5. Методи визначення дисперсного складу пилу

Для гігієнічної оцінки повітря виробничих приміщень і повітря, що викидається в атмосферу пиловловлювальними апаратами, окрім загального показника запиленості, необхідно знати дисперсний склад пилу.

З цією метою пил просіювали через набір сит із дротяних сіток, зазначених у ТУ У 28.7-32564661-001:2008 «Сітки дротяні ткані з квадратними чарунками» [115], і зважували з точністю до 10^{-7} кг.

Пил, що пройшов через сито з комірками 60 мкм, піддавався седиментометричному аналізу на приладі з підйомною піпеткою згідно з методикою [116].

З відібраної проби пилу на аналітичних вагах ВЛА-200М визначали масу, обчислену виходячи з прийнятої концентрації та об'єму рідини в циліндрі.

Концентрація пилу в рідині в піпетковому приладі становила 1%. Як дисперсійне середовище використовували воду та мета-ксилол.

Відповідно до методики [117], для кварцового та каолінового пилу застосовували дистильовану воду, а для пилу обпаленого доломіту - мета-ксилол.

Як стабілізатор для дистильованої води при визначенні дисперсного складу каолінового пилу використовували аміак, а для доломітового пилу - олеїнову кислоту (60 мг/л).

Для забезпечення достовірних результатів дисперсного аналізу особливу увагу приділяли приготуванню суспензії.

Приготування суспензії здійснювали суворо відповідно до інструкцій [118].

Зазвичай проводили два аналізи однієї й тієї ж проби пилу. Якщо отримані результати суттєво відрізнялися між собою, виконували третій аналіз.

Відсотковий вміст частинок, розмір яких менший за заданий гідравлічно еквівалентний діаметр, обчислювали як відношення маси пилу у відповідній пробі до маси пилу, розрахованої для цього ж об'єму проби, виходячи із середньої початкової концентрації.

У випадках, коли застосовували дисперсійну рідину без стабілізуючої добавки, маса пилу у випареній пробі дорівнювала масі сухого залишку. Якщо до рідини вводили стабілізатор, маса пилу у випареній пробі визначали як різницю між масою сухого залишку та масою стабілізатора в об'ємі проби.

Усі дані аналізів та розрахунків зведено в таблиці додатків.

Результати аналізу дисперсного складу експериментального пилу подано на рис. 3.11 у логарифмічно-ймовірних координатах.

За графіком (рис. 3.11) визначено параметри розподілу експерименту.

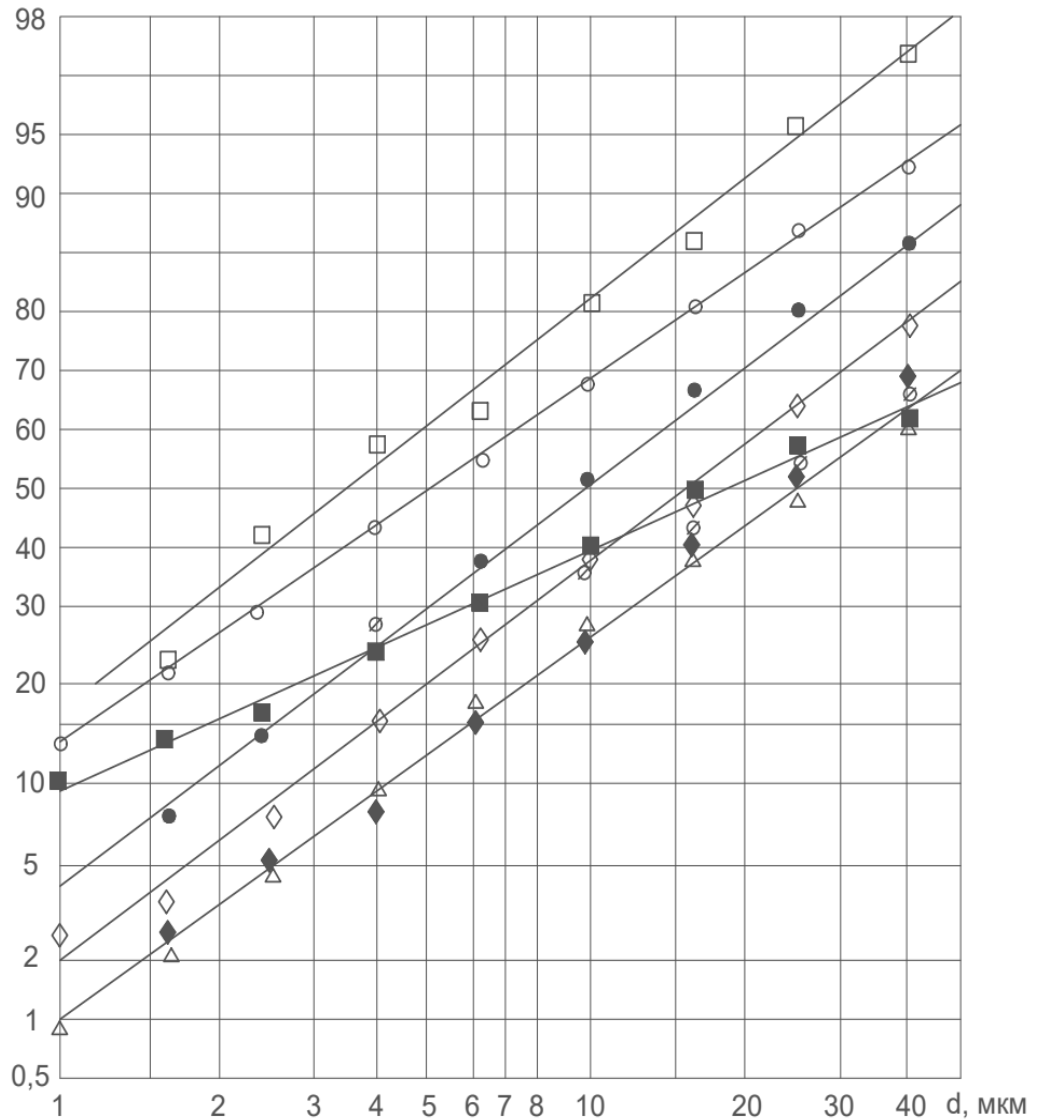


Рис. 3.11 Дисперсний склад експериментального пилу.

- - пил кварцу ($\sigma_{50}=5$ мкм при $G=4,5$);
- - пил кварцу ($\sigma_{50}=10$ мкм при $G=3,85$);
- ◇ - пил кварцу ($\sigma_{50}=15$ мкм при $G=3,8$);
- ◆ - пил кварцу ($\sigma_{50}=22$ мкм при $G=3,7$);
- △ - кварц ($\sigma_{50}=25$ мкм при $G=4,0$);
- ▲ - пил ливарни (з дробоструйних камер);

- - каолін ($b_{50}=3,5$ мкм при $G=3,6$);
- - доломіт (обожений) ($b_{50}=18$ мкм при $G=9,5$);
- ⊠ - молочний цукор ($b_{50}=18$ мкм при $G=9,5$).

Для експериментального пилу кварцового піску:

№1 – $b_{50} = 10 \cdot 10^{-6}$ м та $\sigma=3.1$;

№2 – $b_{50} = 16 \cdot 10^{-6}$ м та $\sigma=3.7$;

№3 – $b_{50} = 20 \cdot 10^{-6}$ м та $\sigma=3.5$.

Медіанний діаметр розмеленого обпаленого доломіту складав $b_{50} = 18 \cdot 10^{-6}$ м, а число $\sigma=10.3$.

Параметри, каолінового пилу складали $b_{50} = 4 \cdot 10^{-6}$ м та $\sigma=1.3$.

На рис. 3.13 подано функції розподілу в класифікаційній номограмі згідно [119-121], Пил №1, №2 та №3 кварцового піску й доломіту розташований у 4-й зоні, тобто належить до середньодисперсного. Пил каоліну та пил №4 кварцового піску є дрібнодисперсними.

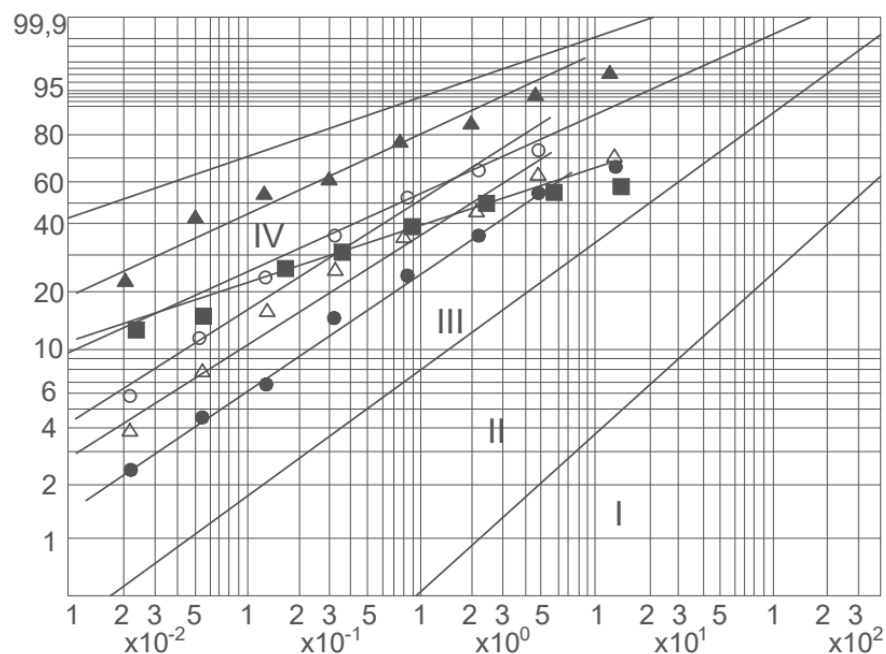


Рис. 3.12 Класифікаційна номограма кварцового піску.

- △● - пил кварцового піску;
- ▲ - каолін;
- - обожений доломіт.

Експериментальний пил кварцового піску та горілої землі ливарного виробництва отримували шляхом розмелювання піску у вібромліні ВМ-10, пил доломіту - у кульовому млині. Пил каоліну доставлений з Глуховецького каолінового комбінату.

Тривалість помелу визначали експериментально і контролювали перед проведенням седиментаційного аналізу за допомогою приладу ПСХ-4 для контролю питомої поверхні пилу. Подрібнений матеріал з млина перевантажували в спеціальну скриню для зберігання. Для рівномірного розподілу матеріалу перевантаження здійснювали через сито з комірками 0,5 мм, після чого масу перемішували протягом 10 хвилин. Висота шару пилу в скрині не перевищувала 0,35 м.

Для визначення розміру та форми частинок дисперсного складу пилу після пиловловлювача застосовували метод мікроскопії препаратів, отриманих шляхом відбору проб пилу на фільтр ДП-3 або АФА-В-18.

Після уловлювання частинок пилу фільтри АФА-В-18 або ДП-3 просвітлювали у спеціальному пристрої (рис. 3.13) під дією парів ацетону.

Процедура просвітлення полягала в наступному:

1. Фільтри з пробамі укладали на предметне скло так, щоб пилинки розташовувалися між фільтром і предметним склом.
2. Краї фільтра, що виступали за межі скла, обрізали.
3. На предметному склі тушшю позначали номер проби та дату її відбору.
4. У скляну склянку 2 наливали воду та розміщували в ній меншу склянку 3, на дні якої знаходився ацетон.
5. Воду підігрівали на електроплитці 7 до температури приблизно до 60 °С, при цьому склянку з ацетоном закривали.
6. Після прогріву предметне скло 4 з фільтрами розміщували на металевій підставці 1, яку поміщали в склянку з ацетоном.

Під дією парів ацетону фільтри перетворювалися на прозору плівку, завтовшки кілька десятків мікрон, у якій залишалися уловлені частинки пилу.

Для підвищення довговічності та можливості багаторазового використання препаратів на них наносили краплю кедрового бальзаму і накривали покривним склом.

Підготовка препаратів із фільтрів АФА-В-18 з багат шаровим накопиченням пилу:

1. Відрізали 1/8 частину фільтра АФА-В-18 і поміщали її в пробірку "Віцалю".
2. Додавали 10 крапель розчинника (суміш ксилолу 94% і трикрезилфосфату 65%).
3. Після повного розчинення тканини фільтра суміш ретельно перемішували.
4. Отриману суспензію піпеткою Пастера наносили на чисте предметне скло у вигляді крапель.
5. Краплі спеціальним склом розтягували тонким шаром.
6. На препарат наносили кедровий бальзам і накривали покривним склом.

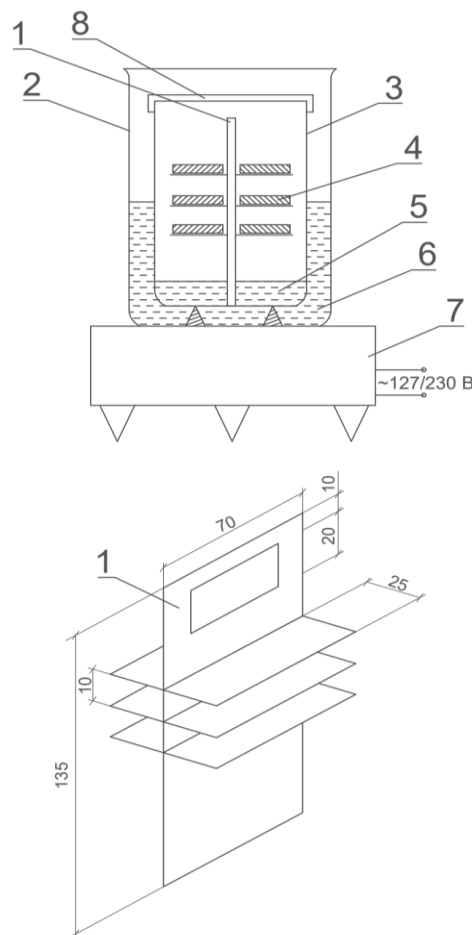


Рис. 3.13 Пристрій для просвічування фільтрів типу АФА-В-18.

На кожному предметному склі було розміщено два препарати, які дублювали один одного.

Досліджуваний препарат встановлювали на предметний столик мікроскопа МБІ-1 таким чином, щоб розмір частинки, що аналізується, збігався зі шкалою окулярного мікрометра. Підраховували кількість поділок, яку займає частинка, і, помноживши це значення на масштабний коефіцієнт, визначали її розмір.

Для вивчення відносно великих частинок застосовували невелике збільшення - (100-250 крат), а для частинок розміром 10-20 мкм використовували збільшення 600 крат.

Для визначення дисперсного складу полідисперсного пилу підраховували кількість частинок у полі зору мікроскопа, що потрапляють у певний розмірний інтервал (фракцію). Оскільки пил був полідисперсним, вимірювання проводили на вибірці не менше 1000 частинок.

На основі отриманих даних будували розподіл частинок за розмірами в рахунковому вираженні. Для переведення цих даних у масове відсоткове вираження використовували методику, розроблену в ЛІОТ.

Середній розмір (діаметр) частинок для кожної фракції визначали за формулою [122]:

$$b_{\text{ср}} = \sqrt[3]{\frac{b_a^3 + b_b^3}{2}}, \text{мкм} \quad (3.19)$$

де b_a, b_b - граничні розміри частинок фракції.

Відсотковий вміст по масі кожної фракції визначався за формулою [122]:

$$\frac{b_{\text{ср}k}^3 \cdot n_k \cdot 100}{\sum_{i=1}^i b_{\text{ср}i}^3 \cdot n_i}, \% \quad (3.20)$$

де n -відсотковий вміст частинок, що складає фракцію;

k - номер фракції;

i - число фракцій, на яке розбито аналізований пил.

Отримані результати використовували для визначення фракційного ступеня вловлення пилу, що є важливою характеристикою ефективності пиловловлювача.

Пофракційний ступінь очищення визначався за формулою:

$$\eta_{\text{фр}} = \frac{\Delta N'_1 - \Delta N'_2 (1 - \eta_{\text{заг}})}{\Delta N'_1}, \% \quad (3.21)$$

де $\Delta N'_1$, $\Delta N'_2$ - відповідно вміст пилу даної фракції в повітрі до і після пиловловлювача, %.

Загальний коефіцієнт пиловловлення визначається за формулою:

$$\eta_{\text{заг}} = \frac{Z_{\text{н}} - Z_{\text{к}}}{Z_{\text{н}}} \cdot 100, \% \quad (3.22)$$

де $Z_{\text{н}}$, $Z_{\text{к}}$, - концентрація пилу до і після пиловловлювача, які визначаються експериментально, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для отримання мікрознімків використовували установку мікрофотографування.

3.2.6. Оптимізація роботи циклонного пиловловлювача з дисковим розпилювачем

На першому етапі дослідження ставилася мета визначити оптимальний режим роботи пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем. Оптимізація передбачала досягнення мінімального вмісту мінерального пилу в очищених газах за умови забезпечення мінімального гідравлічного опору апарата та, по можливості, максимальної його продуктивності. Подальшим завданням було отримання критеріального рівняння, що дозволило б поширити отримані результати на промисловий зразок.

Оскільки поставлене завдання є явно екстремальним, пошук оптимальних параметрів здійснювався за допомогою активного експерименту.

На початковому етапі, використовуючи невелику кількість дослідів, встановлювали характер впливу окремих факторів на ступінь очищення газів. Результати цих досліджень подано на рис. 3.16 – 3.18.

Аналіз експериментальних даних показав, що питома витрата води має суттєвий вплив на ефективність пиловловлення в межах до $0,25 \text{ кг/м}^3$ повітря. Враховуючи цей фактор, основні дослідження проводили при питомій витраті води $0,27 \text{ кг/м}^3$, і в подальшому цей параметр вважався некерованим фактором.

На основі інформації, отриманої в ході попередніх експериментів на лабораторному стенді (див. рис. 3.7), було прийнято рішення відмовитися від проміжних етапів дослідження, зокрема від відсіювального експерименту та отримання математичної моделі у вигляді полінома першого порядку для спрощеного пошуку екстремуму. Замість цього відразу було використано експериментальний план [122] для побудови математичної моделі у вигляді полінома другого порядку в області передбачуваного екстремуму.

Метою цього етапу дослідження було визначення оптимального режиму роботи пиловловлювача, який забезпечує кінцеву запиленість:

- мг/м^3 при початковій запиленості $Z_{\text{н}}=1000 \text{ мг/м}^3$;
- мг/м^3 при $Z_{\text{н}}=2000 \text{ мг/м}^3$.

При цьому необхідно було мінімізувати гідравлічний опір установки ($Y_2 \rightarrow \min$).

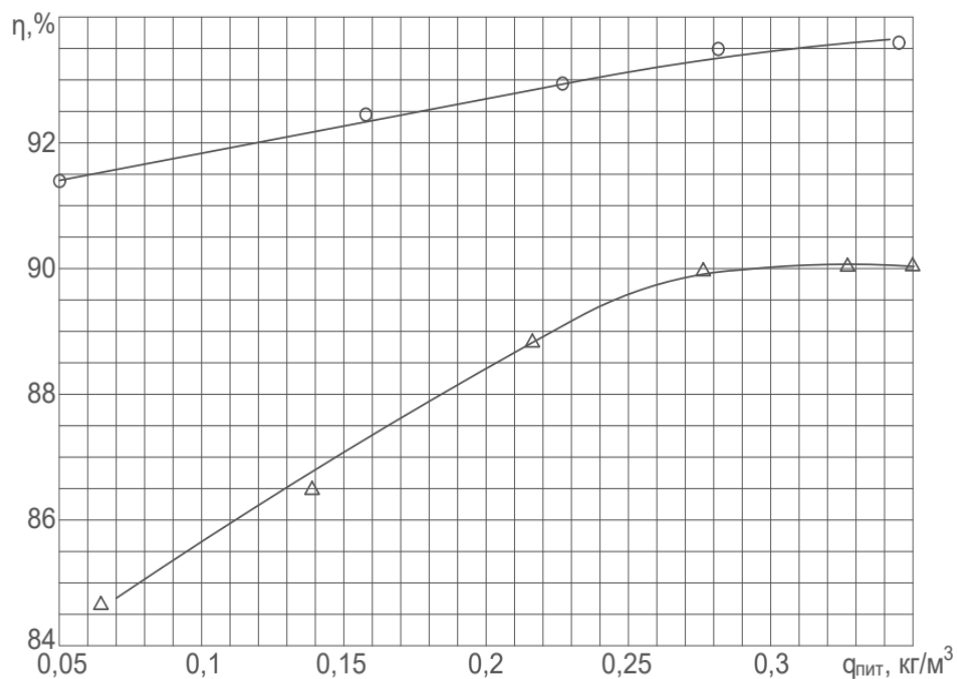


Рис. 3.16 Залежність ефективності від питомої витрати води та температури повітря при:

- кварцевий пил з $b_{50}=10$ мк;
- температурі розпилення води $v=25$ °С;
- 3-х дисковому розпилювачі з $D_g=300$ мм та $n=2820$ об/хв;
- початковій запиленості $Z_{поч}=1000$ мг/м³;
- вологовмісту $d=10$ г/кг.

Позначення:

- - повітря з температурою $t=17$ °С;
- Δ - повітря з температурою $t=150$ °С.

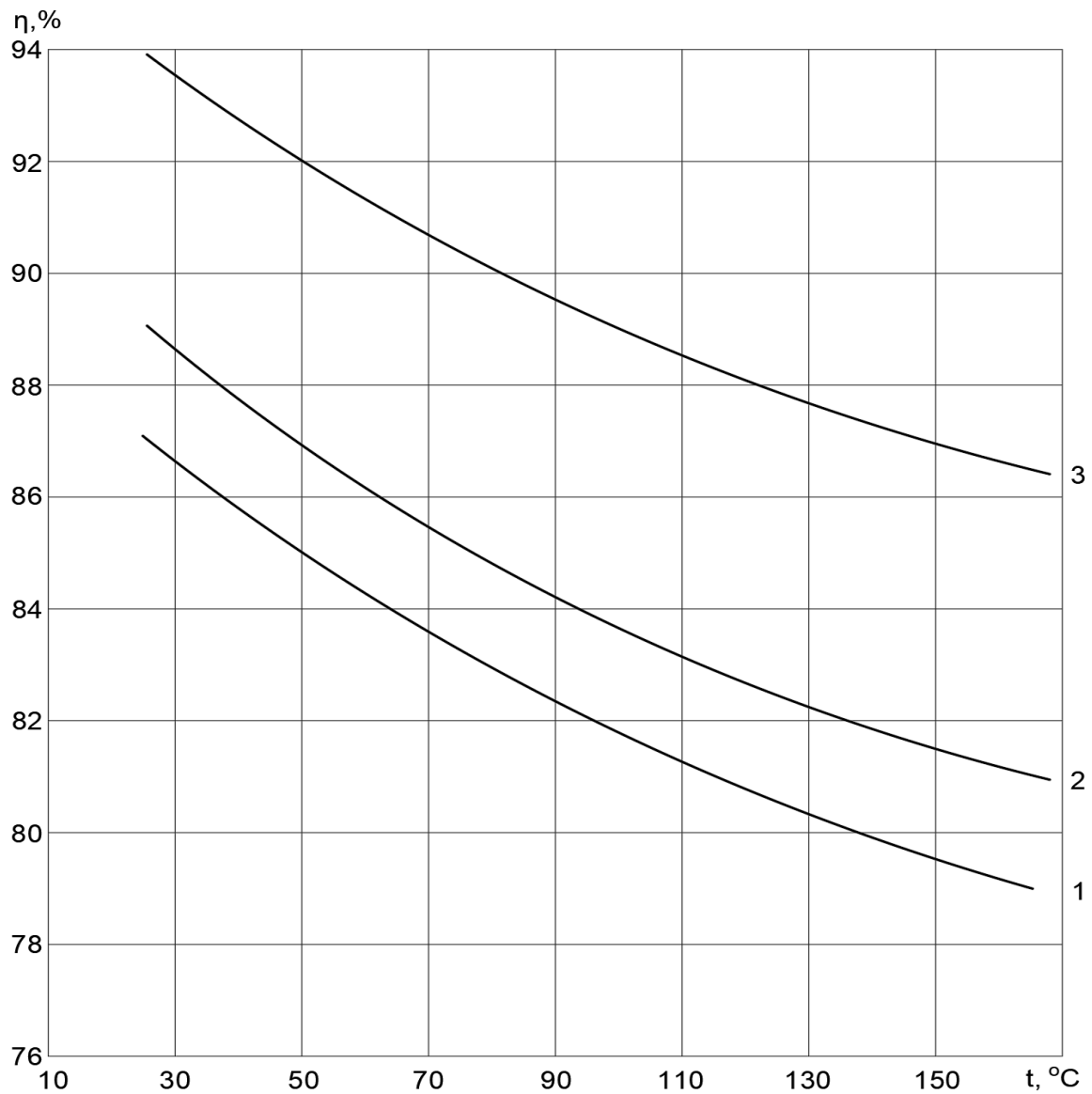


Рис. 3.17 Залежність ефективності пиловловлювача від температури запиленого потоку при:

- швидкості входу $v_{\text{вх}}=19$ м/с;
- температурі води $t^{\circ}\text{C}=25$ о/С;
- питомій витраті води $q_{\text{пит}}=0,28$ кг/м³;
- 3-х дисковому розпилювачі з $D_g=300$ мм та $n=2820$ об/хв;
- вологовмісту $d=10$ г/кгс.

Позначення:

- 1 - краплі з $b_{50}=4$ мк при $Z_{\text{поч}}=200$ мг/м³;
- 2 - краплі з $b_{50}=6$ мк при $Z_{\text{поч}}=300$ мг/м³;
- 3 - краплі з $b_{50}=8$ мк при $Z_{\text{поч}}=400$ мг/м³.

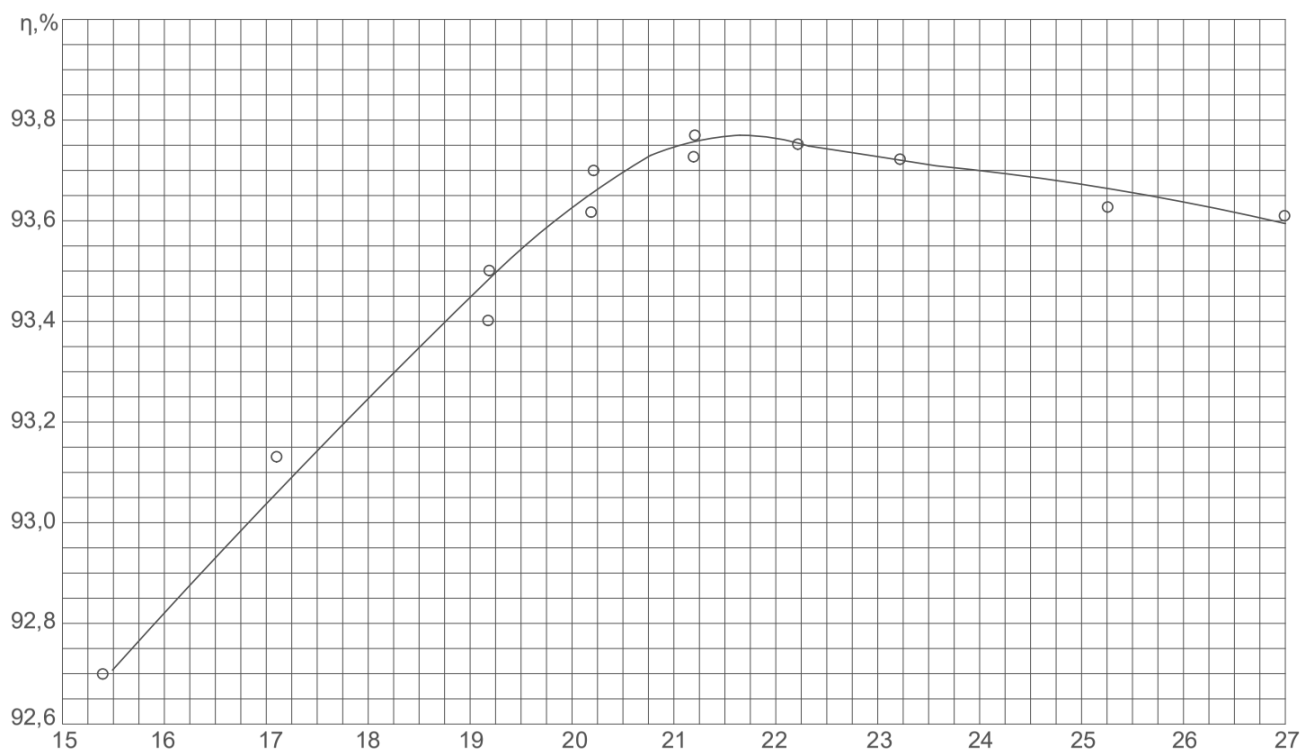


Рис. 3.18 Залежність ефективності пиловловлювача від швидкості входу газів в апарат при питомій витраті води $q_{\text{пит}}=0,25$ кг/м³; початковій запиленості $Z_{\text{поч}}=1000$ мг/м³; температурі потоку $t=21$ °С; температурі води $v=25$ °С; 3-х дисковим розпилювачем з $D_g=300$ мм та $n=2820$ об/хв на кварцовому пилу з $b_{50}=10$ м.

Було вирішено провести два окремі дослідження для початкової запиленості $Z_n=1000$ мг/м³ і $Z_n=2000$ мг/м³, оскільки така різниця у вмісті пилу може вимагати різних оптимальних режимів роботи пиловловлювача.

При розробці математичної моделі, що описує функціональну залежність параметра оптимізації (Y_1) від основних факторів процесу, були обрані такі керовані змінні:

X_1 - температура запилених газів на вході в апарат, °С;

X_2 - дисперсність пилу в газах, що характеризується медіанним діаметром b_{50} мкм;

X_3 - діаметр дисків розпилювача, м;

X_4 - кількість дисків, шт;

X_5 - швидкість газів на вході в апарат, м/с;

X_6 - температура води, що розпилюється. °С.

Некерованим фактором є початкова запиленість газів, X_7 (Z_n), мг/м³.

Для точного визначення координат екстремуму необхідно побудувати адекватну математичну модель процесу в заданій області. Точність цієї моделі значною мірою залежить від достовірності отриманих експериментальних даних. Тому на першому етапі дослідження було проведено аналіз рівня "шуму" установки, що дозволило визначити необхідну кількість повторних експериментів для забезпечення статистичної надійності.

На основі попередніх експериментів, виконаних на цій установці, було визначено два режими роботи пиловловлювача:

- "Гарний" (ефективний режим роботи);
- "Поганий" (режим з низькою ефективністю).

Для кожного з цих режимів було проведено по два повторні експерименти, результати яких наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Результати експериментів двох режимів

Режим	Параметри							Y_1	Y_2	$Y_{cp,j}$	S^2
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7				
Гарний	20	20	160	3	20	10	1000	86.6	87.7	87.15	0.605
Поганий	150	10	115	1	10	45	2000	132	129	130.5	4.5

Найбільший розкид у результатах спостерігався за Y_1 , тому кількість повторних (дублюючих) експериментів визначалась відповідно до його значень Y_1 у паралельних дослідах.

Для перевірки відтворюваності експериментів різниця між середніми значеннями в режимах "Гарний" та "Поганий" порівнювалися з дисперсією середніх значень у паралельних дослідках.

Середнє значення для паралельних дослідів обчислювали за формулою:

$$y_{\text{ср.}j} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (3.23)$$

Рядкова дисперсія середнього визначалась як:

$$S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{\text{ср.}j})^2}{N(n-1)}, \quad (3.24)$$

Для перевірки значущості відмінностей між середніми значеннями використовувався t - критерій Стюдента, який обчислювався за формулою:

$$t_{\text{розрах}} = \frac{(y_{\text{ср1}} - y_{\text{ср2}})}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} = \frac{(87.15 - 130.5)}{\sqrt{0.605^2 + 4.5^2}} = 19.19$$

Для ступенів свободи $f=N(n-1)$ та рівня значущості $\alpha=0,005$ табличне значення t -критерію $t_{\text{т}}=9,92$ (де n - число паралельних дослідів).

Оскільки $t_{\text{розрах}} > t_{\text{табл}}$, можна зробити висновок, що різниця між середніми значуща, тобто процес добре керований. Таким чином, для наступних експериментів достатньо двох паралельних дослідів.

Другий етап дослідження полягав у постановці експерименту в області екстремуму. Оскільки оптимізаційний пошук мав певні обмеження, досліджувався локальний екстремум.

При повному факторному експерименті (з 6 керованими факторами) для побудови рівняння регресії (полінома другого порядку) необхідно виконати: $N=3^6=729$ дослідів.

З метою зменшення обсягу експериментальних досліджень без втрати необхідної інформації було використано план Хартлі [123], який має таку уількість експериментів:

$$N=(1/e)2^k+2k+1,$$

де e - ступінь дробності; K -кількість факторів.

При використанні напіврепліки загальна кількість експериментів скорочувалися до: $N=1/2 \cdot 2^6+2 \cdot 6+1=29$ дослідів.

Відповідно до стандартних методик планування експериментів та побудови матриці планування [123] було обрано й інтервали варіювання факторів. Для безперервних змінних ці інтервали визначалися за допомогою відповідного перетворення:

$$X_j = \frac{\bar{x}_j - \bar{x}_{j0}}{I_j}, \quad (3.25)$$

де X_j - кодоване значення фактора;

$\bar{x}_j$ - натуральне значення фактора;

$\bar{x}_{j0}$ - натуральне значення основного рівня;

I_j - інтервал варіювання;

j - номер фактора.

Рівні факторів та інтервали їх варіювання зведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Умови планування експериментів

Рівні та інтервал варіювання	Натуральне значення факторів					
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
Основний (0)	77.5	16	180	2	19	25
Інтервал варіювання	47.5	6	20	1	4	15
Верхній (+)	125	22	200	3	23	40
Нижній (-)	30	10	160	1	15	10

Враховуючи вимоги до матриці планування, було складено матрицю плану Хартлі при використанні напівреплики (табл. 3.4).

Щоб виключити вплив систематичних помилок, викликаних зовнішніми умовами, було здійснено рандомізацію дослідів, які представлені матрицею плану (див. табл. 3.4).

Обробка таблиць у кодованих змінних дозволяє оцінювати ступінь впливу факторів за їх коефіцієнтами регресії. Для фактора X_1 замість основного рівня, що відповідає значенню 77.5, у дослідях встановлювалося значення 73, що в кодованих змінних має значення 0,095.

Для отримання математичної моделі результати експерименту були оброблені методом регресійного аналізу за допомогою ЕОМ з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel (США). Математична модель отримана у вигляді полінома 2-го ступеня.

Аналіз рівнянь у стандартизованому вигляді показав, що значення коефіцієнтів регресії при квадратних членах і парних взаємодіях є того ж порядку, що і при лінійних членах. Із цього було зроблено висновок про те, що система перебуває в нелінійній області.

Спрощення отриманих рівнянь проводилося шляхом послідовного відкидання малозначущих членів рівнянь з подальшою перевіркою їхньої значущості за критерієм ефективності F.

Таблиця 3.4

План та результати експерименту при $Z_H=1000$ мг/м³.

Номер дослід	Матриця плану X						y ₁	y ₂
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆		
1	-	+	-	-	+	-	84.7	81.6
2	-	+	+	+	+	-	55.6	90.0
3	+	-	-	-	+	-	123.0	45.6
4	-0.095	0	0	0	0	-	104.0	46.8
5	-0.095	0	0	0	-	0	115.1	30.3
6	-	-	-	-	+	+	84.4	74.0
7	-	+	-	+	-	-	85.0	33.0
8	+	0	0	0	0	0	127.1	36.4
9	+	+	-	-	+	+	114.0	47.1
10	+	+	+	-	-	+	141.5	25.8
11	+	+	-	+	-	+	127.5	17.6
12	-	-	+	-	-	+	85.1	36.9
13	-	+	+	-	-	-	83.2	37.5
14	-0.095	-	0	0	0	0	105.0	46.0
15	-	-	-	+	-	+	91.5	34.8
16	+	-	+	-	-	-	76.5	24.9
17	-0.095	0	+	0	0	0	87.0	54.4
18	-0.095	0	0	+	0	0	101.6	47.4
19	+	-	-	+	-	-	110.2	18.0
20	-0.095	0	0	0	0	+	110.1	47.4
21	+	+	+	+	+	+	113.4	61.2
22	-0.095	0	0	-	+	0	98.0	71.1
23	-	0	0	-	0	0	101.5	59.2

24	+	-	+	+	+	-	81.1	57.3
25	-0.095	0	0	-	0	0	109.5	51.6
26	-0.095	0	0	0	0	0	103.5	45.6
27	-	-	+	+	+	+	66.0	93.6
28	-0.095	0	-	0	0	0	117.8	52.0
29	-0.095	+	0	0	0	0	101.8	45.6

Розкодовані спрощені рівняння процесу мають наступний вигляд:

а) для кінцевої запиленості

$$y_1 = -216.5 - 0.64 \cdot x_1 - 0.56 \cdot x_2 + 4.93 \cdot x_3 + 19.05 \cdot x_4 - 0.67 \cdot x_5 - 3.35 \cdot x_6 + 0.002 \cdot x_1^2 - 0.17 \cdot x_2^2 - 0.02 \cdot x_3^2 - 3.97 \cdot x_4^2 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.03 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0.009 \cdot x_1 \cdot x_5 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_6 + 0.04 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.26 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0.15 \cdot x_2 \cdot x_5 + 0.03 \cdot x_2 \cdot x_6 - 0.24 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.02 \cdot x_3 \cdot x_6 + 1.96 \cdot x_4 \cdot x_5 - 0.06 \cdot x_5 \cdot x_6; \quad (3.26)$$

б) для гідравлічного опору

$$y_2 = 514.66 + 0.24 \cdot x_1 + 2.62 \cdot x_2 - 4.84 \cdot x_3 - 17.23 \cdot x_4 - 8.90 \cdot x_5 - 0.18 \cdot x_6 - 0.09 \cdot x_2 + 0.01 \cdot x_3^2 + 0.11 \cdot x_5^2 - 0.11 \cdot x_5^2 - 0.01 \cdot x_6^2 - 0.02 \cdot x_1 \cdot x_5 - 0.13 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.03 \cdot x_2 \cdot x_5 + 0.05 \cdot x_3 \cdot x_5 + 0.003 \cdot x_3 \cdot x_6 + 0.88 \cdot x_4 \cdot x_6 - 0.01 \cdot x_1 \cdot x_4. \quad (3.27)$$

Рівняння адекватно описують досліджуваний процес, оскільки значення критерію F - ефективності для $Z_n = 1000 \text{ мг/м}^3$ $F_{y1} = 16.8$ та $F_{y2} = 262.0$ перевищують 10.

Наявність математичних моделей, які адекватно описують процес у нелінійній області, дозволяє продовжити дослідження на електронній обчислювальній машині.

Оскільки на область пошуку екстремуму критерію оптимізації (кінцевої концентрації пилу в очищеному повітрі) накладено обмеження, виникла потреба у розв'язанні компромісної задачі для знаходження локального екстремуму.

Через те, що початкове запилення є некерованим фактором, було сформульовано шість умов для розв'язання компромісних задач із пошуку оптимальних режимів роботи пиловловлювача:

1. $Z_H=1000$; $x_2=10$; $y_1 \leq 60$; $y_2 \rightarrow \min$
2. $Z_H=1000$; $x_2=16$; $y_1 \leq 60$; $y_2 \rightarrow \min$
3. $Z_H=1000$; $x_2=22$; $y_1 \leq 60$; $y_2 \rightarrow \min$
4. $Z_H=1000$; $x_2=10$; $y_1 \leq 100$; $y_2 \rightarrow \min$
5. $Z_H=1000$; $x_2=16$; $y_1 \leq 100$; $y_2 \rightarrow \min$
6. $Z_H=1000$; $x_2=22$; $y_1 \leq 100$; $y_2 \rightarrow \min$

При цьому на керуючі фактори були накладені наступні обмеження:

$$25 \leq x_1 \leq 60$$

$$180 \leq x_3 \leq 210$$

$$2 \leq x_4 \leq 3$$

$$19 \leq x_5 \leq 23$$

$$10 \leq x_6 \leq 30$$

Пошук проводився методом сканування на ЕОМ з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel (США). Оскільки математичні моделі добре узгоджуються з емпіричними даними, при вирішенні компромісних завдань було здійснено часткову екстраполяцію результатів.

На підставі аналізу залежностей коефіцієнтів регресії стандартизованого рівняння було виявлено суттєвий вплив діаметра диска (X_3) на кінцеву запиленість y_1 , причому із вираженою тенденцією до зниження запиленості зі збільшенням діаметра диска. Тому при вирішенні компромісної задачі верхню межу параметра X_3 було підвищено до значення 210 (для моделі пиловловлювача діаметром 0,3 м).

У результаті розв'язання компромісної задачі були отримані наступні оптимальні значення керуючих факторів:

1. $x_1=30$; $x_3=210$; $x_4=3$; $x_5=22.5$; $x_6=10$; $y_1 \leq 60$; $y_2=99.75$ при $Z_H=1000$.
2. $x_1=30$; $x_3=210$; $x_4=22.5$; $x_5=22.5$; $x_6=10$; $y_1 \leq 60$; $y_2=108.0$ при $Z_H=1000$.
3. $x_1=30$; $x_3=210$; $x_4=3$; $x_5=22.5$; $x_6=10$; $y_1 \leq 60$; $y_2=98.49$ при $Z_H=1000$.

4. $x_1=30$; $x_3=210$; $x_4=3$; $x_5=23$; $x_6=26$; $y_1 \leq 100$; $y_2=98.2$ при $Z_H=1000$.

Умови задач 4 та 5 виконати не вдалося: для 4-ї задачі $y_1 \leq 120$, для 5-ї $y_1 \leq 115$.

Проведення контрольних досліджень дало такі результати (проте значення x_1 та x_2 не було витримано):

1. $x_1=26$; $x_2=10$; $x_4=34$; $x_6=30$; при цьому $y_1=60.2$; $y_2=105.6$; $Z_H=1000$.

2. $x_1=26$; $x_2=16$; $x_3=3$; $x_5=23$; $x_6=30$; при цьому $y_1=55.8$; $y_2=108$; $Z_H=1000$.

3. $x_1=26$; $x_2=22$; $x_3=210$; $x_4=3$; $x_5=23$; $x_6=30$; при цьому $y_1=52.6$; $y_2=98.6$; $Z_H=1000$.

Ці дослідження дозволили побудувати математичну модель процесу очищення аспіраційних викидів підвищеної температури у пиловловлювачі циклонного типу з дисковим розпилювачем. Визначено оптимальні режими роботи лабораторного зразка пиловловлювача при мінімальному гідравлічному опорі. На основі отриманих даних розроблено промисловий зразок, дослідження якого наведені у четвертому розділі.

3.2.7. Експериментальне дослідження впливу вологості аспіраційних викидів на ефективність циклону

При взаємодії аспіраційних викидів з підвищеною температурою з факелом диспергованої рідини відбувається процес тепло- і масообміну, в результаті якого водяні пари, які містяться в газах, конденсуються на поверхні крапель і частинках пилу. Маса пилу внаслідок конденсації на них вологи збільшується, тому інтенсивність їхнього виділення з потоку газів підвищується.

Вплив вологовмісту запилених газів на ступінь очищення в пиловловлювачі циклонного типу вивчався на експериментальному стенді (див. рис. 3.1).

Під час дослідження як експериментальнийпил використовували два типи пилу: погано змочуванийпил кварцового піску з $b_{50}=10$ мкм і $b_{50}=17$ мкм, а також змочуваний доломітнийпил з $b_{50}=20$ мкм (див. рис. 3.11).

У першій серії дослідів параметри запиленого потоку варіювалися: t_r від 92 до 140°C, Z_H від 1200 до 2100 мг/м³, вологовміст - від 10 до 60 г/кг сухого газу. Витрата запиленого повітря, при якій швидкість входу в апарат становила 20 м/с, залишалася сталою. Коефіцієнт зрошення дорівнював 0,2 кг/м³. Кутова швидкість обертання розпилювача становила 305 рад/с.

Експериментальні дослідження впливу вологовмісту та температури на ступінь очищення дозволили виявити як якісні, так і кількісні особливості процесу. Графічні залежності, що виражають вплив вмісту вологи запиленого повітря на ефективність пиловловлення, представлені на рис. 3.19.

Характер отриманих залежностей дозволяє констатувати, що зі зменшенням медіанного діаметра частинок пилу і підвищенням температури запиленого потоку, ефективність пиловловлювання знижується.

Встановлено, що при збільшенні вмісту вологи від 10 до 60 г/кг сухого газу ефективність пиловловлення гідрофобного пилу зростає на 1%. При наявності гідрофільного пилу в повітрі, що очищається, зі збільшенням вологовмісту ефективність підвищується на 1,5%. Це пояснюється різними фізико-хімічними характеристиками пилу.

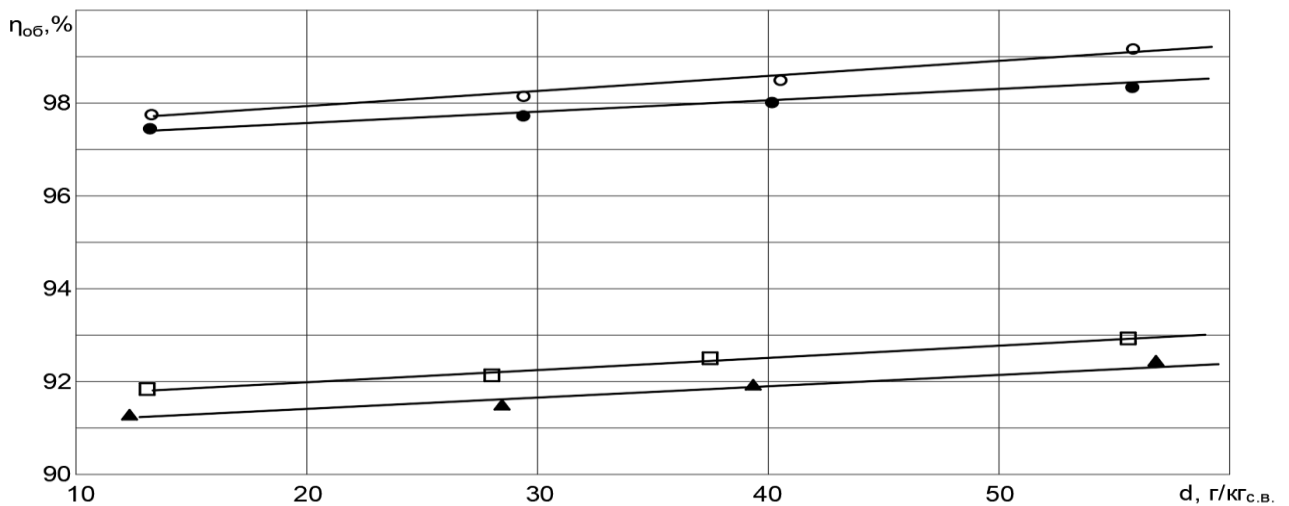


Рис. 3.19 Залежність ефективності пилоловлення від вологовмісту в запиленому повітрі.

- - доломіт з $b_{50}=20$ мкм, $t_b=92$ °C, $Z_{поч}=1950$ мг/нм³;
- - доломіт з $b_{50}=20$ мкм, $t_b=140$ °C, $Z_{поч}=2020$ мг/нм³;
- - кварцевий пил з $b_{50}=17$ мкм, $t_b=93$ °C, $Z_{поч}=1230$ мг/нм³;
- ▲ - кварцевий пил з $b_{50}=17$ мкм, $t_b=130$ °C, $Z_{поч}=1280$ мг/нм³.

3.2.8. Вплив концентрації механічних домішок в оборотній воді на ефективність очищення

Для вирішення питання про вплив механічних домішок, що містяться в оборотній воді, проведено експериментальні дослідження на лабораторному стенді (див. рис. 3.1). У період проведення досліджень температура запиленого потоку підтримувалася на одному рівні та становила 20 °C. У водопровідну воду вводили пил кварцу з $b_{50}=10$ мкм. Концентрація механічних домішок у воді варіювалася від 0,3 до 10,7 кг/м³.

Результати досліджень подано на рис. 3.20. Аналіз отриманих даних показує, що зі збільшенням концентрації механічних домішок в оборотній воді з 0,3 до 2,5 кг/м³ ступінь очищення повітря зростає. При концентрації зведених речовин (C_n) понад 2,5 кг/м³ ефективність пилоловлення знижується настільки, що вже не дозволяє здійснювати рециркуляцію води.

Це пояснюється тим, що частинки кварцового пилю, які містяться в оборотній воді, розташовуються на поверхні крапель (див. рис. 3.6). Зі збільшенням концентрації більша частина поверхні краплі вкривається частинками. Отже, при зіткненні частинок пилю з поверхнею крапель, яка вже вкрита іншими частинками, затримання пилю не відбувається. Тому осадження пилю відбувається тільки на вільній від частинок поверхні каплі. Таким чином, концентрація механічних домішок у воді на рівні $2,5 \text{ кг/м}^3$ або нижче гарантує підтримання досить високої ефективності роботи пиловловлювача.

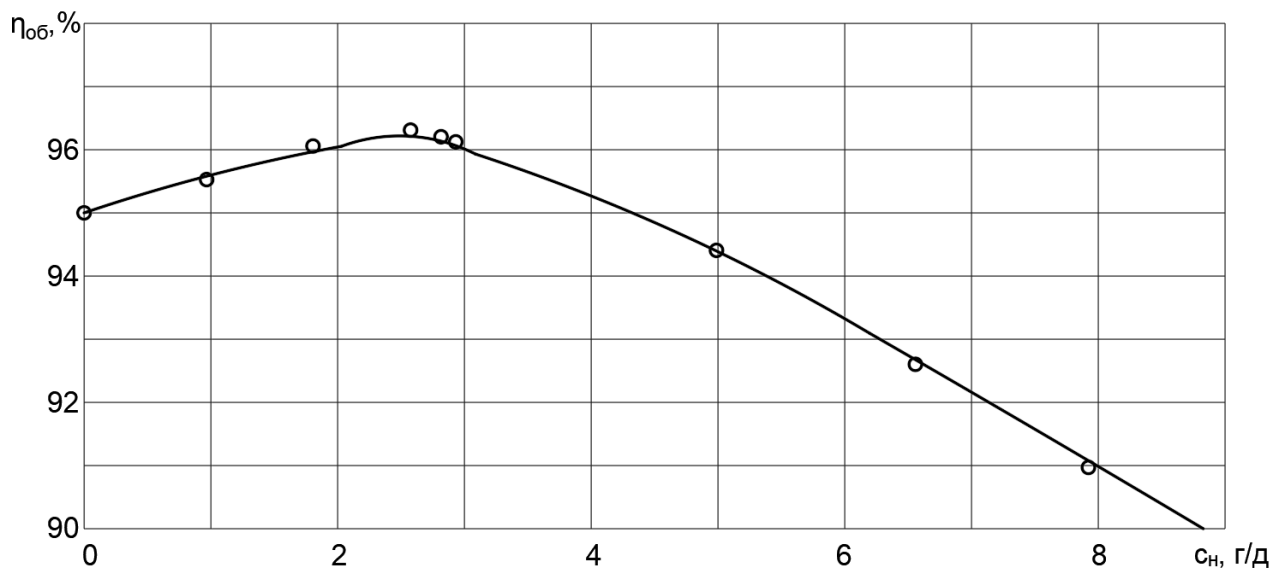


Рис. 3.20 Залежність ефективності пиловловлення від концентрації механічних домішок в оборотній воді при трьохдисковому водорозпилювачу з $D_d=300 \text{ мм}$, швидкості входу повітря 20 м/с , температурі повітря $20 \text{ }^\circ\text{C}$, початковій запиленості $2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ з медіанним діаметром часточок 10 мкм .

3.2.9. Порівняльне дослідження виносу крапель у циліндричних та V-подібних кільцевих циклонних камерах мокрих пиловловлювачів

У всіх мокрих пиловловлювачах тією чи іншою мірою відбувається краплевинос, інтенсивність якого залежить від багатьох факторів. В апаратах,

в яких використовується осадження аерозолів на краплях рідини, розмір крапель, що виносяться, визначається дисперсністю розпилю рідини.

При роботі на оборотній воді з великим вмістом механічних домішок може відбутися зниження ступеня очищення аспіраційних викидів від пилу внаслідок наявності краплевиносу.

Отже для оцінки впливу краплевиносу на ступінь очищення необхідно встановити залежність величини винесення крапель рідини з пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем від геометричних та експлуатаційних факторів.

Залежність величини краплевиносу в циклонних камерах можна подати у вигляді:

$$q=f(v_{\text{вх}}, d_{3,2}, v_{\text{к}}, D_{\text{а}}, h_{\text{ф}}, \rho_{\text{г}}, \mu_{\text{г}}, W) \quad (3.28)$$

Методом аналізу розмірностей було отримано рівняння у безрозмірному вигляді:

$$\frac{q}{\rho_{\text{г}}} = f\left(\frac{v_{\text{вх}} \cdot D_{\text{а}} \cdot \rho_{\text{г}}}{\mu_{\text{г}}}; \frac{v_{\text{к}} \cdot d_{3,2} \cdot \rho_{\text{г}}}{\mu_{\text{г}}}; \frac{W}{h_{\text{ф}} \cdot \mu_{\text{г}}}\right), \quad (3.29)$$

Для знаходження залежності величини краплевиносу проведено експериментальні дослідження на експериментальному стенді за планом, представленим у додатку.

В результаті обробки експериментальних даних отримані рівняння:

а) для циклонної циліндричної камери

$$\frac{q}{\rho_{\text{г}}} = 3.033 \cdot 10^{-7} (7.28 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Re}_{\text{а}} + 0.94) (1.2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Re}_{\text{к}} + 0.82) \left(\frac{W}{h_{\text{ф}} \cdot \mu_{\text{г}}} \right)^{0.87}, \quad (3.30)$$

б) для апарата з кільцевою V-подібною камерою

$$\frac{q}{\rho_{\text{г}}} = 7.29 \cdot 10^{-3} \left(\frac{284.6}{\text{Re}_{\text{к}}} - 1 \right) (1.67 - 0.9 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Re}_{\text{а}}) \left(1.11 - \frac{4324.1}{\frac{W}{h_{\text{ф}} \cdot \mu_{\text{г}}}} \right), \quad (3.31)$$

$$\text{де } \text{Re}_{\text{к}} = \frac{v_{\text{к}} \cdot d_{3,2} \cdot \rho_{\text{г}}}{\mu_{\text{г}}}; \quad \text{Re}_{\text{а}} = \frac{v_{\text{вх}} \cdot D_{\text{а}} \cdot \rho_{\text{г}}}{\mu_{\text{г}}}.$$

Встановлено, що за наявності V-подібної кільцевої камери в пиловловлювачі циклонного типу величина краплевиносу зменшується більш ніж удвічі порівняно з циліндричною камерою (рис. 3.21).

Дані досліджень показують, що зі зростанням витрати рідини, що розпилюється, збільшенням об'ємно-поверхневого діаметра крапель і швидкості газу на вході в апарат величина каплевиносу зменшується.

Підвищення температури рідини спричиняє збільшення каплевиносу. Це пояснюється тим, що з підвищенням температури зменшується динамічна в'язкість і поверхневий натяг, а також зменшується об'ємно-поверхневий діаметр крапель.

Як видно із рис. 3.21, у циліндричних камерах зі збільшенням витрати зрошувальної рідини винесення зростає, що пов'язано з утворенням крапель вторинного розпилу.

За наявності V-подібної кільцевої камери вторинний розпил знижується до нуля, оскільки краплі ударяються об похилу поверхню.

У міру збільшення ωR кінетична енергія водяної плівки на диску розпилювача зростає, що призводить до формування більшої кількості дрібнодисперсних крапель і, відповідно, до підвищення винесення.

Оскільки частина крапель, швидкість осідання яких є меншою за швидкість газу в перерізі апарата, підхоплюється газовим потоком і виноситься у повітропровід.

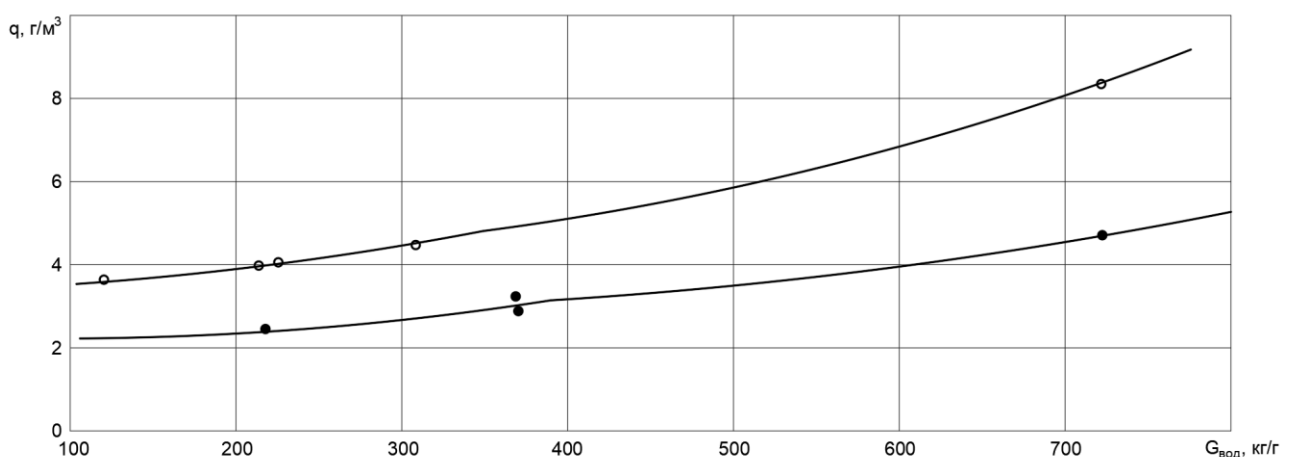


Рис. 3.21 Залежність каплевиноса q від витрати води $G_{\text{вод}}$, розпилюємої 3-х дисковим водорозпилювачем (при $D_g=300$ мм, швидкості обертання

розпилювача $n=2820$ об/хв та швидкості входу повітря в пиловловлювач $U_{ex}=20$ м/сек).

- - краплевинос в пиловловлювачі з циліндричною стінкою;
- - краплевинос в пиловловлювачі з кільцевою V-подібною камерою.

3.2.10. Вплив взаємодії фаз на гідравлічний опір пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем

Гідравлічний опір пиловловлювача визначався за формулою (3.11).

Вимірювання статичного тиску за пиловловлювачем проводили згідно з методикою І.Є. Ідельчика [124] щодо визначення гідравлічного опору циклонів.

Відцентровий ефект у пиловловлювачі циклонного типу з дисковим розпилювачем створюється як за рахунок конструктивного виконання корпусу пиловловлювача, так і за рахунок обертання розпилювача.

Залежно від напрямку обертання дискового розпилювача втрати в апараті можуть зменшуватися (при збігу напрямків руху повітряного потоку та розпилювача) або збільшуватися у разі протитечійного обертання. Результати вимірювань гідравлічного опору залежно від взаємодії контактуючих фаз наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Порівняльні дослідження пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем з визначення гідравлічного опору апарату залежно від взаємодії контактуючих фаз (при щільності зрошення $0,21 \text{ л/м}^3$, температурі повітря $18,8 \text{ }^\circ\text{C}$, барометричному тиску $99\,725 \text{ Па}$, відносної вологості 87% , швидкості входу $21,2 \text{ м/с}$).

Найменування параметрів	Режим взаємодії контактуючих фаз	
	Прямоток	Протитечія
Аеродинамічний опір без вмикання дискового розпилювача, Па	403.8	403.8
Аеродинамічний опір апарату з ввімкненим розпилювачем без подачі води, Па	399.9	427.3
Аеродинамічний опір апарату з ввімкненим розпилювачем та при подачі води, Па	415.6	531.3

Результати гідравлічного опору при різних режимах роботи пиловловлювача подано на графіку (рис. 3.22)

Дані досліджень показують, що при співпадінні напрямку обертання розпилювача з напрямом повітряного потоку опір апарату зменшується на 12% порівняно з величиною гідравлічного опору без обертання розпилювача.

При протитечійному русі гідравлічний опір збільшується на 10% .

Також встановлено, що зі збільшенням щільності зрошення як при односпрямованому русі, так і при протитечії, гідравлічний опір зростає.

Це пов'язано з тим, що краплі диспергованої рідини вносять кінетичну енергію, а також відбуваються витрати енергії внаслідок тертя повітря об поверхню крапель.

В результаті математичної обробки даних досліджень було запропоновано залежності для визначення гідравлічного опору пиловловлювача з дисковим розпилювачем:

а) при прямотоці

$$Eu = 74.1 \left(1 + \frac{6190.8}{Re_g} \right) (1 + 0.22 \cdot K) (1 + 85.1 \cdot B) (1 + 2.29 \cdot 10^{-6} \cdot Re_a) (1 + 1.04 \cdot 10^{-6} \cdot Re_\phi), \quad (3.32.)$$

б) для протитечії

$$Eu = 349.33 (1 - 1.36 \cdot K) (B)^{0.11} (1 - 0.21 \cdot 10^{-6} \cdot Re_a) (1 + 0.675 \cdot 10^{-5} \cdot Re_\phi) (1 + 0.121 \cdot 10^{-7} \cdot Re_g), \quad (3.33.)$$

де $Eu = \frac{\Delta P}{\rho_r \cdot v_{a,3}^2}$; $Re_g = \frac{v_{a,3} \cdot D_g \cdot \rho_r}{\mu_r}$ - критерій Рейнольдса для диска;

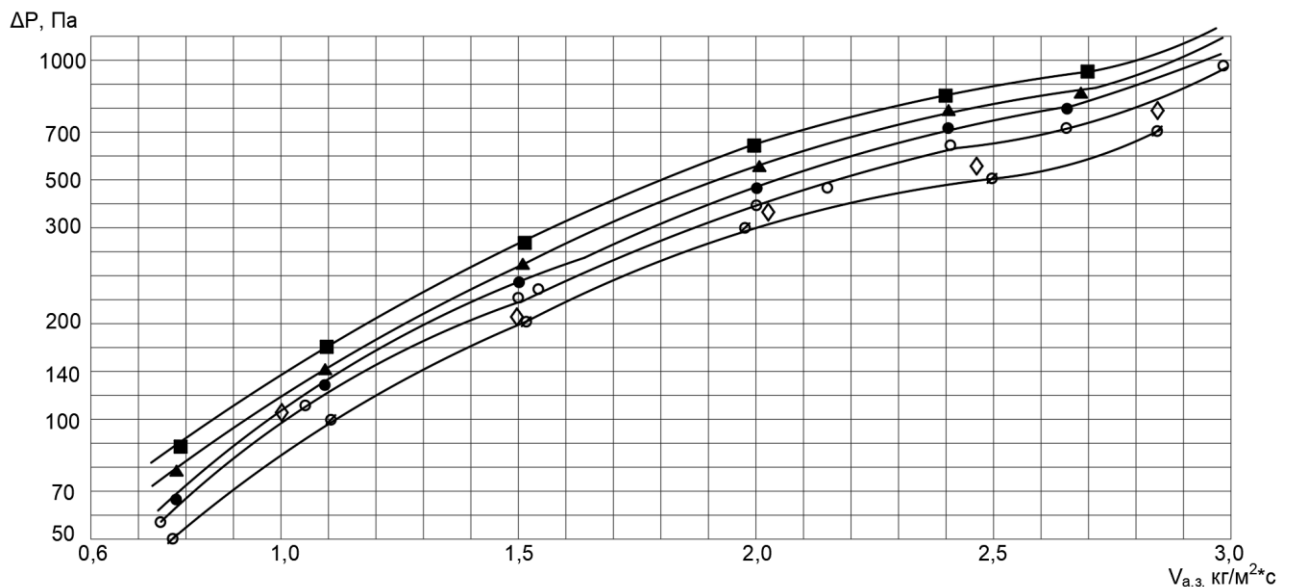


Рис. 3.22 Залежність гідравлічного опору ΔP від масової питомої витрати газу $V_{a,3}$ при різному складу пилу.

- - пил кварцу ($\sigma_{50}=5$ мкм при $G=4,5$);
- - пил кварцу ($\sigma_{50}=10$ мкм при $G=3,85$);
- ◇ - пил кварцу ($\sigma_{50}=15$ мкм при $G=3,8$);
- ◆ - пил кварцу ($\sigma_{50}=22$ мкм при $G=3,7$);
- △ - кварц ($\sigma_{50}=25$ мкм при $G=4,0$);
- ▲ - пил ливарни (з дробоструйних камер);
- - каолін ($\sigma_{50}=3,5$ мкм при $G=3,6$);
- - доломіт (обожений) ($\sigma_{50}=18$ мкм при $G=9,5$);
- ⊠ - молочний цукор ($\sigma_{50}=18$ мкм при $G=9,5$).

3.3. Вплив основних факторів на ефективність процесу пиловловлення в пиловловлювачах з дисковими розпилювачами

При взаємодії запилених газів з факелом диспергованої рідини температура газів знижувалася. Це пояснюється тим, що при контакті з дрібнодисперсним факелом розпиленої рідини, за рахунок надлишку тепла ненасичених запилених газів, відбувалося випаровування крапель і зменшення їх діаметра.

При зниженні температури парогазового середовища нижче 100 °С відбувалася конденсація. Пара конденсувалася на ядрах конденсації (краплях води, частинках пилу).

Результати досліджень (див. рис. 3.16) показують, що оптимальна витрата води, що розпилюється, становить 0,15 кг/м³ при очищенні газів з температурою 70 °С та 0,25 кг/м³ - при температурі газів 100 °С.

Ступінь очищення газоповітряного потоку від пилу в мокрих пиловловлювачів залежить від змочуваності частинок.

Добре змочувані (гідрофільні) частинки (див. рис. 3.12), потрапивши на поверхню крапель або водяної плівки, занурюються в неї, і тому виключена можливість їхнього здування газовим потоком.

Погано змочувані (гідрофобні) частинки залишаються на поверхні крапель або плівці рідини, утворюючи на ній шар. Частки, що знову наближаються, відштовхуються від шару, повертаються в газоповітряний потік і виносяться ним в атмосферу.

Постійне надходження твердих частинок в оборотну воду сприяє їхньому накопиченню до значної концентрації. При цьому процес уловлювання гідрофобних частинок краплями диспергованої води, що містить механічні домішки, покращується зі збільшенням концентрації домішок до 2,5 кг/м³. Це пояснюється тим, що при диспергуванні води з механічними домішками, зі зростанням концентрації домішок збільшується

кількість крапель меншого діаметра, а отже, ймовірність зіткнення з частинками пилу.

Крім того, чим менше краплі, що утворюються при диспергуванні рідини дисковими розпилювачами, тим менша їх кінетична енергія, коротший шлях у газовому середовищі та гірше забезпечується рівномірне змішування з газом.

Одночасно зменшення діаметра крапель тягне за собою зниження ефективності відцентрової сепарації внаслідок зростання краплєвиносу.

З іншого боку, як показують фотографії (див. рис. 3.6), збільшення концентрації домішок у воді призводить до зменшення вільної від частинок поверхні краплі.

Дослідженнями встановлено, що дисперсністю крапель потрібно керувати, змінюючи окружну швидкість дискового розпилювача, концентрацію механічних домішок, витрату та фізико-хімічні властивості рідини.

Підсумовуючи отримані результати, можна зазначити, що експериментальні дані підтверджують доцільність очищення аспіраційних викидів дисперговою водою, яка містить механічні домішки (див. рис. 3.20).

3.4. Висновки по третьому розділу

1. Досліджено дисковий розпилювач з конусною насадкою для диспергування оборотної води, яка містить механічні домішки.

Встановлено, що дисперсність розпилу крапель рідини, яка містить механічні домішки, залежить від гідродинамічних та конструктивних параметрів дискового розпилювача, фізичних властивостей рідини та концентрації механічних домішок.

Отримано рівняння в критеріальному вигляді для визначення середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель суспензії та водопровідної води у факелі розпилу.

Виявлено, що за однакових режимів середній об'ємно-поверхневий діаметр крапель дистильованої води на 5-8% більший, ніж у крапель чистої водопровідної води.

2. Досліджено нову конструкцію пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем у лабораторних умовах з використанням статистичних методів планування та обробки результатів експериментів, що дозволило отримати математичну модель процесу очищення у вигляді полінома другого порядку та обґрунтувати оптимальний режим роботи апарату.

3. Експериментально підтверджено оптимальні значення факторів, що сприяють найбільшому ступеню очищення. При цьому отримано, що збільшення вмісту вологи в аспіраційних викидах і наявність механічних домішок в оборотній воді (до $2,5 \text{ кг/м}^3$ води) підвищують ступінь очищення. Натомість підвищення температури запиленого потоку знижує ефективність очищення.

4. Встановлено залежність краплевиносу від технологічних та конструктивних факторів.

5. Отримано розрахункові залежності у критеріальному вигляді для визначення гідравлічного опору пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем рідини.

6. Отримані розрахункові залежності для визначення середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель рідини, ефективності пиловловлення та гідравлічного опору дозволили перейти до розробки промислового зразка пиловловлювача.

РОЗДІЛ IV. ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ З УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЦИКЛОННОГО ПИЛОВЛОВЛЮВАЧА З ДИСКОВИМ ВОДОРОЗПИЛЮВАЧЕМ

4.1. Аналіз впливу конструктивних параметрів дискового розпилювача на дисперсність розпилювальної рідини

Для дослідження ефективності пиловловлення в натурних умовах були виготовлені дослідно-промислові зразки пиловловлювача з дисковим водорозпилювачем [125].

Промисловий зразок пиловловлювача (рис. 4.1) являє собою циклон, циліндричний корпус якого обладнано кільцевою V-подібною камерою та конічним дном, що закріплюється до підставки за допомогою опор. Діаметр циліндричної частини становить 1,05 м. У кришці корпусу є люк діаметром 0,45 м, через який монтується дисковий водорозпилювач з електродвигуном потужністю 1,1 кВт при $\omega=148,6$ об/с.

У верхній частині чаші робочої рідини влаштовані радіальні планки, що запобігають обертанню рідини.

Одночасно з подачею в апарат запиленого повітря, за допомогою трифазного електродвигуна 15, розміщеного в кожусі 14 конічної форми, приводиться в обертання дисковий розпилювач 2, по конусній насадці якого вода піднімається вгору і диспергується на краплі, утворюючи фільтруючий факел.

Запилене повітря надходить знизу через тангенціально розташований, вхідний патрубок 1. Великі фракції пилу під дією відцентрових сил осідають на змочені стінки нижньої частини корпусу 12 пиловловлювача і змиваються водою в шламозбірник 3. Дрібний пил, долаючи високошвидкісну фільтруючу завісу розпиленої води, стикається з краплями води та

виноситься з повітряного потоку в кільцеву камеру, звідки разом із водою стікає по стінках корпусу в шламозбірник.

Подача води в чашу 5 до розпилювача здійснюється з водопроводу підприємства (при роботі на постійному потоці) або циркуляційним насосом (при роботі на освітленій воді). При роботі пиловловлювача на освітленій воді підживлення чистою водою здійснюється через бак 9 із регулятором рівня.

Патрубок 4 для відведення шламу, залежно від місцевих умов, обладнується зливним пристроєм або виводиться в шламовідстійник нижче рівня дзеркала освітленої води на 100-150 мм.

Очищене повітря видаляється з апарата через вихідний патрубок 18.

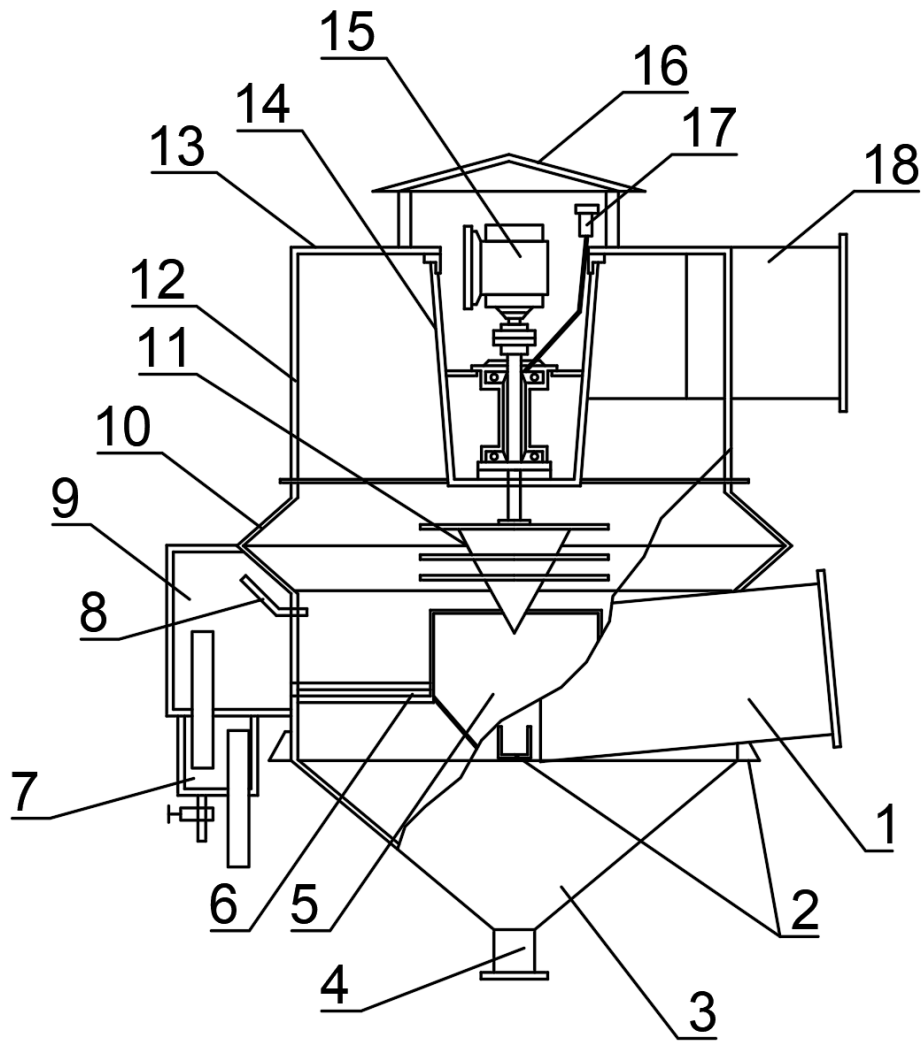


Рис. 4.1 Схема пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем
 1 - вхідний патрубок; 2 - опори; 3 - шламозбірник; 4 - штуцер; 5 - чаша; 6 - з'єднувальний трубопровід; 7 - гідрозатвор; 8 - трубопровід для вирівнювання тиску; 9 - бак; 10 - кільцева камера; 11 - дисковий водорозпилювач; 12 - корпус; 13 - кришка; 14 - кожух; 15 - електродвигун; 16 - зонтик; 17 - маслянка; 18 - вихідний патрубок.

4.2. Оптимізація параметрів процесу пиловловлення на основі експериментальних досліджень та математичної моделі

Оскільки на виробничій установці неможливо здійснити дослідження у великому діапазоні режимів, то лабораторне дослідження промислових зразків є доцільним і необхідним.

Дослідження промислових зразків проводилися на експериментальному стенді, схема якого представлена на рис. 4.2.

Експеримент проводився у вузькому інтервалі значень керуючих чинників. Найбільш важливими факторами, які значною мірою визначають вплив інших факторів, є: швидкість газового потоку ($U_{\text{вх}}$); дисперсність пилу (b_{50}), що міститься в повітрі, яке очищається; питома витрата суспензії (m) та концентрація механічних домішок в оборотній воді ($C_{\text{т}}$).

Основний рівень, інтервал варіювання та межі області дослідження факторів наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Умови планування експериментів

Рівні та інтервал варіювання	Натуральні значення факторів			
	$X_1 (U_{\text{вх}})$	$X_2 (b_{50})$	$X_3 (m)$	$X_4 (C_{\text{т}})$
Основний рівень (0)	19	15	0.15	1.7
Інтервал варіювання	4	10	0.07	1.1
Верхній рівень (+1)	23	25	0.22	2.8
Нижній рівень (-1)	15	5	0.08	0.6
Розмірність	м/с	мкм	кг/м ³	кг/м ³

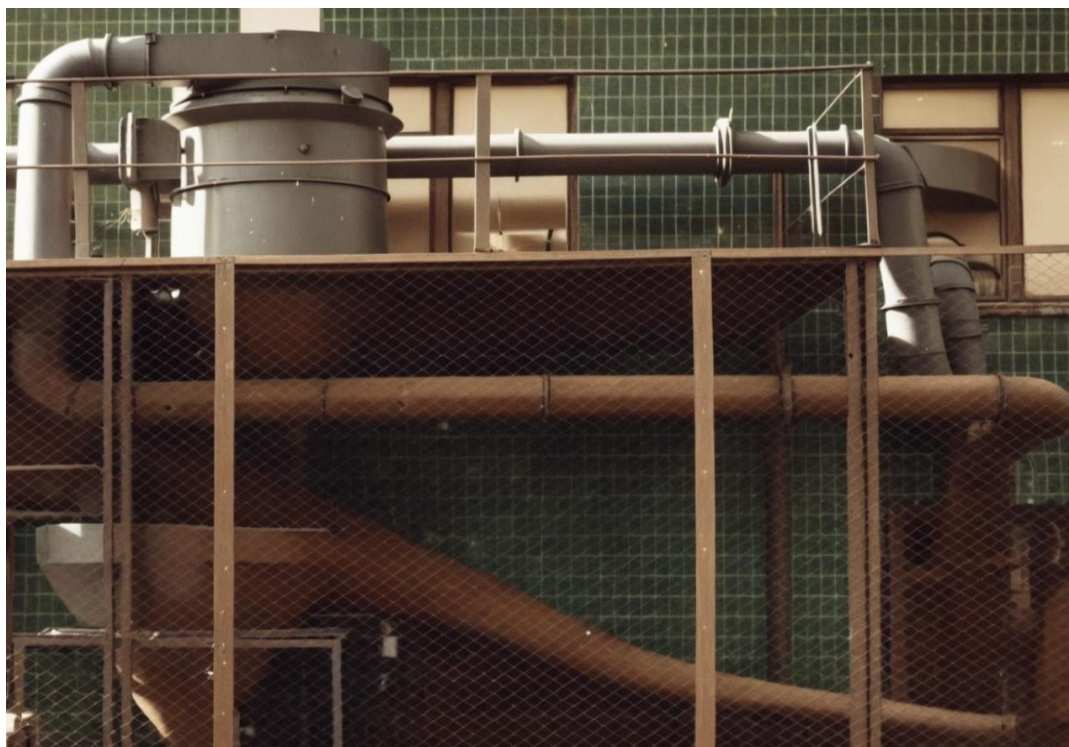


Рис. 4.2 Експериментальний стенд по дослідженню дослідно-промислових зразків пиловловлювачів

Для проведення експериментів було складено план-матрицю точного плану V_n , близького до D -оптимального, для квадратної моделі, побудованої на гіперкубі та такої, що містить відносно невелику кількість дослідів. План V_n [92] містить вершини n -мірного куба з координатами ± 1 . Ці точки утворюють повний факторний експеримент. Їх кількість - 2^n . Крім того, в план V_n входять центри $(n-1)$ - мірних граней. Це точки з координатами $0, 0, \dots, \pm 1, 0, \dots, 0$. Ці точки мають плече, що дорівнює одиниці. Кількість таких точок становить $2n$. Загальна кількість дослідів при кількості факторів 4 становитиме [92]:

$$N = 2^n + 2n = 2^4 + 2 \cdot 4 = 24 \text{ дослідів}$$

План-матриця та результати досліджень представлені в табл. 4.2.

У результаті математичної обробки даних досліджень (див. табл. 4.2) отримано емпіричну залежність для визначення загального ступеня очищення:

$$\eta_{\text{общ}} = 6.412 \left(13.122 - \frac{Z_H}{C_T} \right) \cdot \text{Stk}^{0.03}, \% \quad (4.1)$$

де $\text{Stk} = \frac{d_{3,2}^2 \cdot \rho_4 \cdot v_{a,3}}{18 \mu_r d_{3,2}}$ - критерій Стокса;

$d_{3,2}$ - об'ємно-поверхневий діаметр крапель суспензії, що визначається по залежності (3.1).

Таблиця 4.2

План та результати експерименту (прямоток)

Номер досліджу	Матриця плану Х				Ступінь очистки $Y_1, \%$	Гідрравлічний опір, Па
	$X_1 (U_{\text{вх}})$	$X_2 (b_{50})$	$X_3 (m)$	$X_4 (C_T)$		
1	+1	+1	+1	+1	96.1	645.5
2	-1	+1	+1	+1	94.2	279.6
3	+1	-1	+1	+1	91.05	647.5
4	-1	-1	+1	+1	84.35	279.6
5	+1	+1	-1	+1	94.3	647.5
6	-1	+1	-1	+1	93.8	279.6
7	+1	-1	-1	+1	84.25	647.5
8	-1	-1	-1	+1	83.1	279.6
9	+1	+1	+1	-1	95.85	647.5
10	-1	+1	+1	-1	94.0	279.6
11	+1	-1	+1	-1	89.9	647.5
12	-1	-1	+1	-1	84.0	276.6

13	+1	+1	-1	-1	94.0	647.5
14	-1	+1	-1	-1	93.5	276.6
15	+1	-1	-1	-1	86.4	643.5
16	-1	-1	-1	-1	83.0	276.6
17	+1	0	0	0	95.6	441.5
18	-1	0	0	0	94.65	441.5
19	0	+1	0	0	95.15	441.5
20	0	-1	0	0	87.8	432.6
21	0	0	+1	0	92.0	441.5
22	0	0	-1	0	90.4	432.6
23	0	0	0	+1	89.1	441.5
24	0	0	0	-1	90.2	439.5

4.3. Розробка рекомендацій щодо вдосконалення конструкції дискового водорозпилювача для підвищення ефективності пиловловлення

У цеху Київського заводу скловиробів було змонтовано аспіраційні системи сушильних установок (рис. 4.2 та рис. 4.3).

Запилені гарячі гази із сушильного барабана 1 і верхньої частині елеватора 2 по газопроводу 3 надходять до першого ступеня очищення 4 (сухий циклон Вентурі №5), де відбувається осадження великих фракцій пилу, дисперсний склад яких наведено в табл. 4.3.

Після першого ступеня очищення газу, що містять дрібнодисперсний пил, подаються на другий ступінь очищення 5 (пиловловлювач циклонного типу з дисковим водорозпилювачем). Очищені аспіраційні викиди видаляються в атмосферу за допомогою вентилятора типу ЦП7-40 №5.

Система оборотного водопостачання мокрого пиловловлювача включає вертикальний відстійник 8, у який по трубопроводу надходить забруднена вода після пиловловлювача. Освітлена вода збирається у приймальному кільцевому відсіку у верхній частині шламовідстійника, звідки насосом 7 типу ПА-22 подається до розпилювача пиловловлювального апарата 5.

Підживлення чистою водою, необхідною для компенсації втрат на випаровування та винос зі шламом, здійснюється з водопроводу через бак із регулятором рівня.

Шлам із відстійника періодично видаляється через штуцер.

Вивантаження пилу з першого ступеня очищення здійснюється через пиловий затвор до елеватора піску.

На рис. 4.4 представлена схема аспіраційної системи, в якій перший ступінь очищення (Вентурі №5) встановлено до вентилятора, а другий ступінь очищення - пиловловлювач циклонного типу з дисковим водорозпилювачем - розташований на нагнітанні.

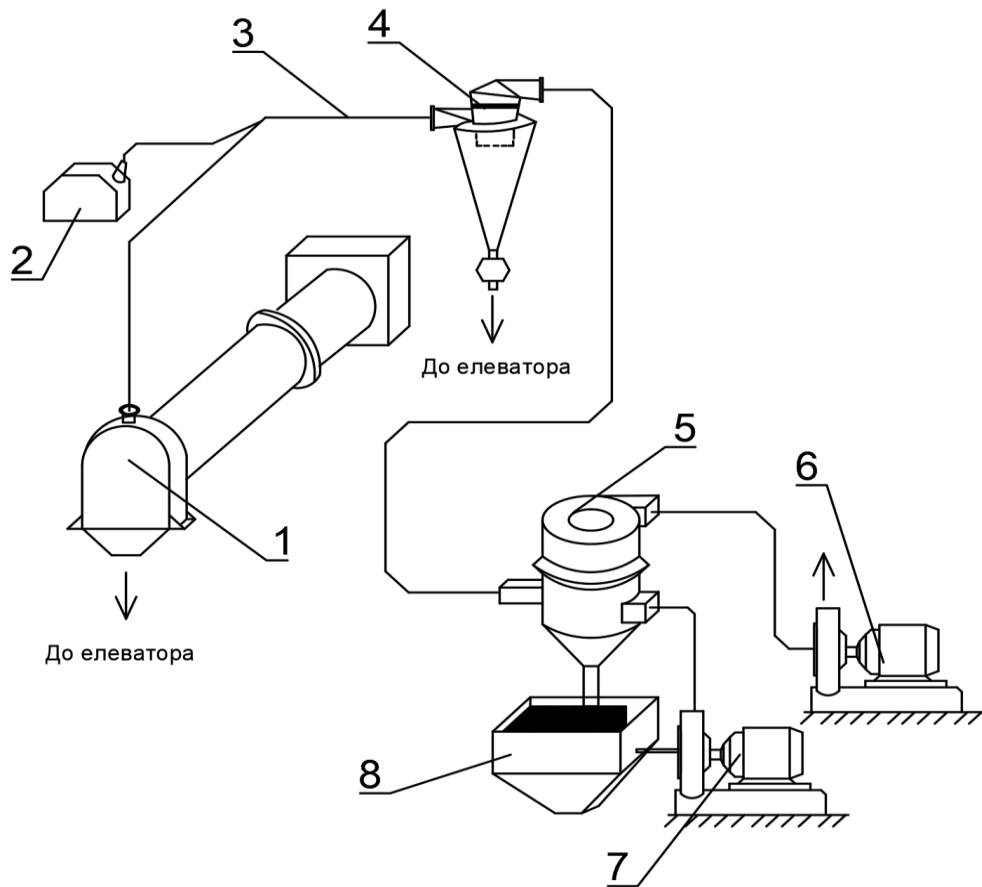


Рис. 4.2 Схема аспіраційної системи з встановленням пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем

1 - сушильний барабан; 2 - місцевий відсмоктувач; 3 - газохід; 4 - сухий циклон Вентурі №5; 5 - пиловловлювач циклонного типу з дисковим водорозпилювачем; 6 - відцентровий насос; 7 - відцентровий вентилятор; 8 - шламовісбірник.

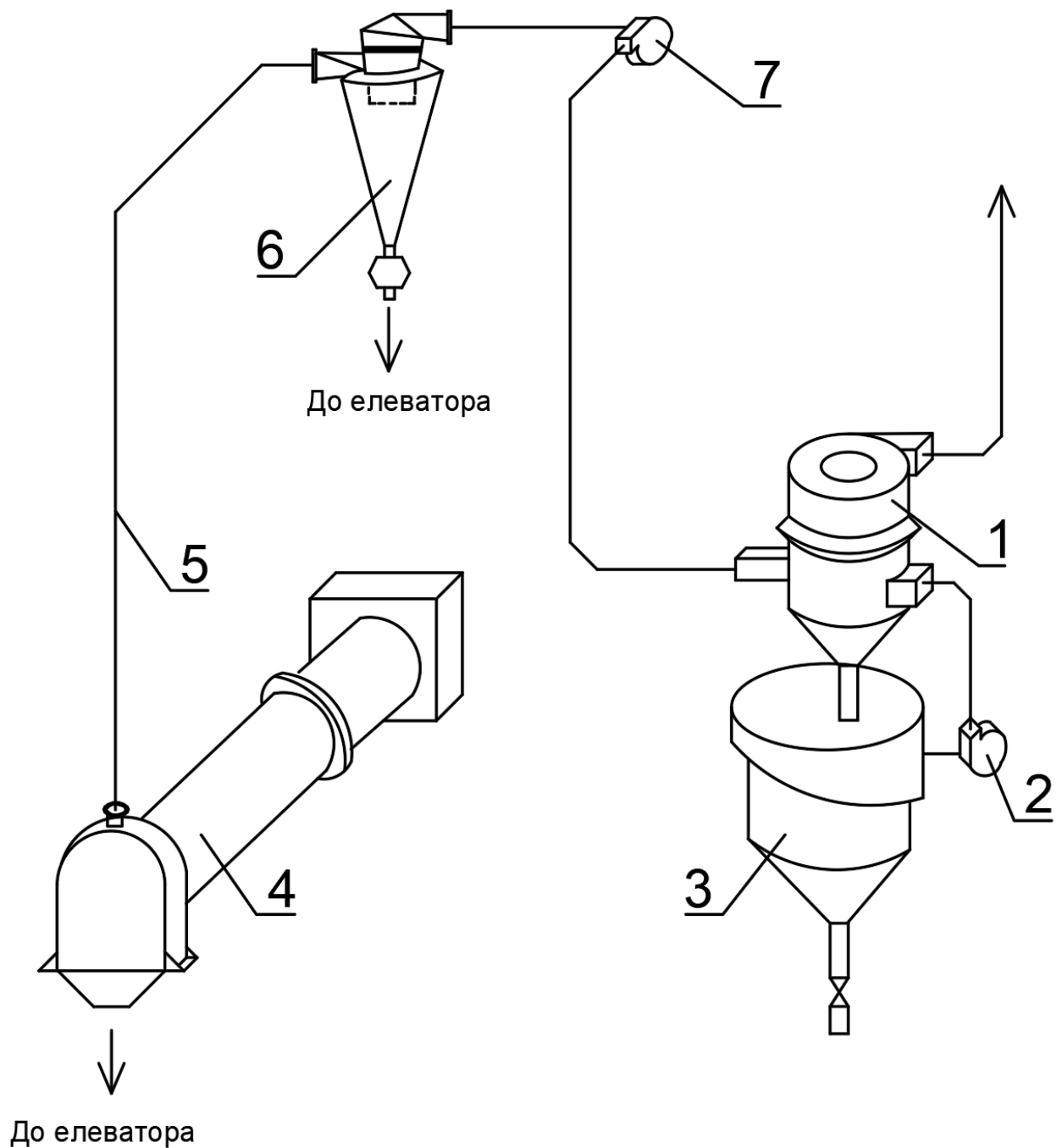


Рис. 4.3 Схема аспіраційної системи з встановленням пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем на нагнітанні

1 - пиловловлювач циклонного типу з дисковим водорозпилювачем; 2 - відцентровий насос; 3 - шламовісбірник вертикального типу; 4 - сушильний барабан; 5 - газохід; 6 - сухий циклон Вентурі №5; 7 - відцентровий вентилятор.

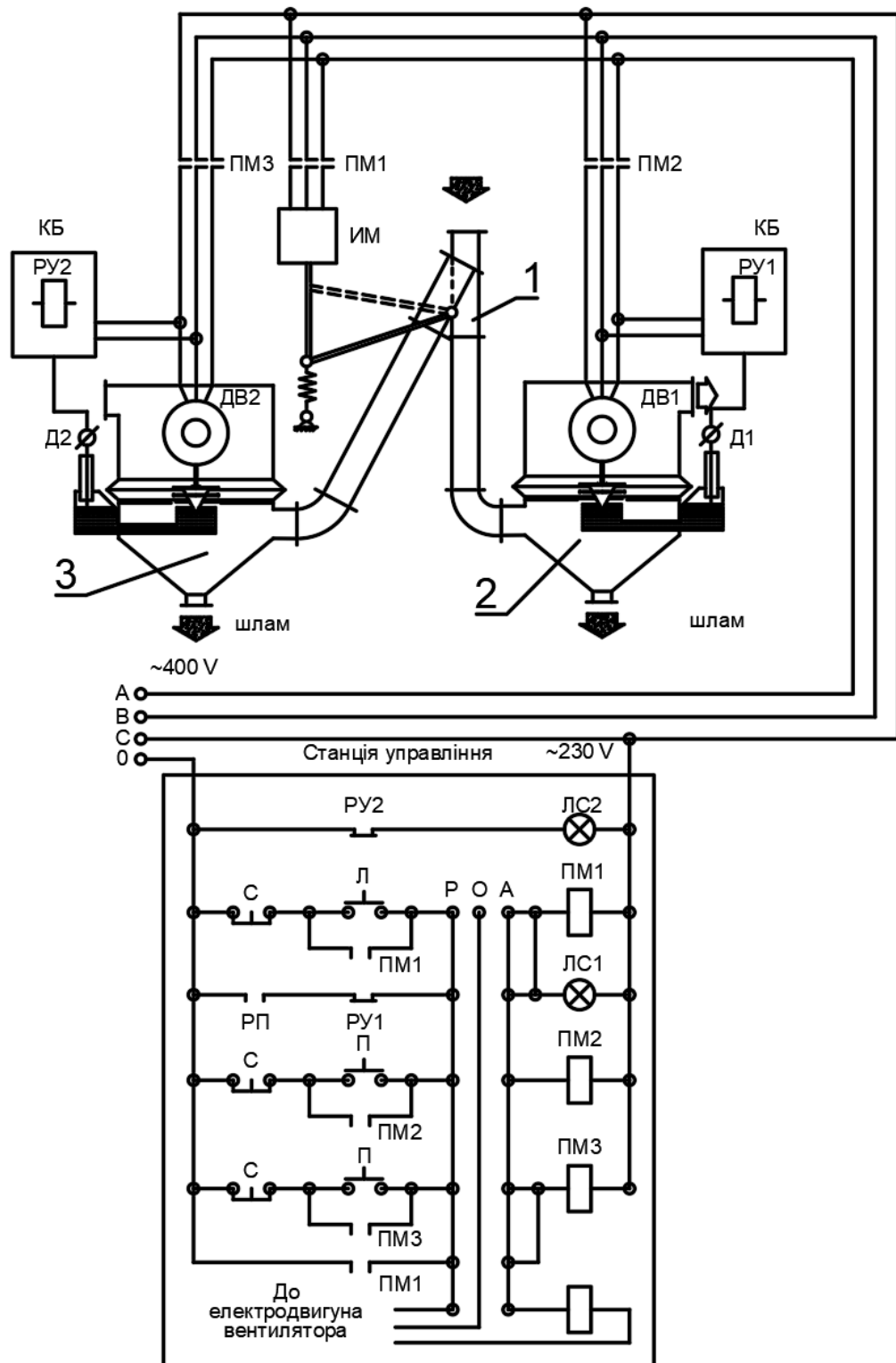


Рис. 4.4 Принципова схема системи автоматичного перемикання газового потоку на другому ступені пиловловлення.

1 - з'єднувальний патрубков; 2 - основний пиловловлювач циклонного типу з дисковим водорозпилювачем; 3 - резервний пиловловлювач циклонного типу з дисковим водорозпилювачем.



Рис. 4.5 Загальний вигляд компонування пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем з зовнішньою рециркуляцією очищеної води, в сушильному відділенні цеху Київського заводу скловиробів

У багатьох випадках для забезпечення безперервності роботи технологічного обладнання та очищення технологічних газів від пилу виникає необхідність автоматичного перемикання з потоку газів на резервний пиловловлювач. Розроблено робочі креслення системи автоматичного перемикання, принципову схему якої наведено на рис. 4.4.

Система автоматичного перемикання пройшла дослідно-промислову перевірку в умовах роботи аспіраційної системи сушильного відділення Київського заводу скловиробів (рис. 4.5).

4.4. Характеристика аспіраційних викидів сушильних установок на прикладі процесу сушіння піску

При сушінні піску (одного з компонентів шихти для скломаси) з сушильних барабанів типу СМ-45 виводяться запилені гази температурою до 200 °С. Обсяг аспіраційних викидів змінюється залежно від технологічного режиму сушіння і становить від 3800 до 6000 м³/год.

Кількість пилу, що захоплюється газами із сушильного барабана, змінюється у часі та досягає $17,0 \cdot 10^{-3}$ кг/м³.

Як видно з даних дисперсного складу пилу, поданого в табл. 4.3, пил кварцового піску є полідисперсним.

Мінералогічний склад пилу (табл. 4.4), що міститься в аспіраційних викидах, свідчить про те, що пил є силікозонебезпечним.

За даними лабораторних досліджень щільність пилу піску становить 2,566 т/м³.

Крім того, вміст води в аспіраційних викидах змінюється від 70 до 173,8 г/кг сухого повітря залежно від вологості піску, що надходить зі складу.

4.5. Виробничі дослідження пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем

Всебічні дослідження пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем (див. рис. 4.1) було проведено в складі аспіраційних системах (див. рис. 4.2 та 4.3).

У процесі досліджень продуктивність пиловловлювальної установки за обсягом аспіраційних викидів змінювалася від 3856 до 5622 м³/год, залежно від технологічного процесу сушіння піску.

Під час проведення промислових досліджень здійснювали вимірювання температури взаємодіючих середовищ, витрати води на другий ступінь

очищення, запиленості газів, концентрації механічних домішок в оборотній воді та вмісту пилу в запиленому потоці.

Результати виробничих досліджень аспіраційних систем у зимовому та літньому режимі наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Дисперсний склад пилу, що міститься в аспіраційних викидах сушильного барабану піску

Розмір фракцій пилу, мкм	Вміст частинок по масі, %	Розмір фракцій пилу, мкм	Вміст частинок по масі, %
<1	0.4	16–25	13.1
1–1,6	0.2	25–40	20.7
1,6–2,5	0.3	40–60	40.8
2,5–4	0.6	60–75	8.9
4–6,3	0.4	75–90	4.9
6,3–10	2.5	90–100	2.0
10–16	4.4	>100	0.8

Таблиця 4.4

Мінералогічний склад пилу піску, що міститься в аспіраційних викидах сушильного барабану

Компоненти	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	Втрати при прожарюванні
Вміст частинок по масі, %	98,0	1,1	0,25	0,18	0,07	0,15	0.25

У результаті досліджень з визначення дисперсного складу пилу встановлено, що в першому ступені очищення вловлюється пил з медіанним діаметром частинок 26 мкм.

Аналіз даних дисперсного складу пилу виявив, що на другий ступінь очищення надходили гази, які містили частинки пилу з $b_{50}=10$ мкм.

При взаємодії пилогазової суміші з факелом диспергової рідини відбувається інтенсивна коагуляція і винесення твердих частинок з газового потоку на стінки корпусу з подальшим видаленням в шламовідстійник.

За даними досліджень встановлено, що концентрація механічних домішок в освітленій воді, яка повторно використовується у процесі пиловловлювання, змінювалася від 0,2 до 2,865 г/л при медіанному діаметрі частинок 4 мкм.

Ефективність пиловловлення, як показали дослідження, залежить від багатьох факторів і у другому ступені очищення становить від 90% до 98,9% за різних режимів.

В результаті математичної обробки даних досліджень наведених у табл. 4.3, отримано емпіричну залежність ефективності пиловловлювання в пиловловлювачі циклонного типу з дисковим водорозпилювачем:

$$\eta=100-0.131\left(\frac{W}{L}\right)^{-0.49}\cdot Z_{\text{н}}^{0.48}\cdot(1.06-2.36\cdot C_{\text{н}})\cdot\left(8.61-\frac{2251.7}{\theta}\right)\cdot\left(\frac{423.2}{T}-0.072\right),\% \quad (4.2)$$

де W – витрата води на пиловловлення, кг/год;

L – об'єм запилених газів, м³/год;

$Z_{\text{н}}$ — початкова запиленість на вході в мокрий пиловловлювач, кг/м³;

$C_{\text{н}}$ — остаточна концентрація твердих частинок в освітленій воді, що надходить на розпилення, кг/кг води;

θ — температура освітленої води, що надходить на пиловловлення, К;

T — температура запилених газів на вході в мокрий пиловловлювач, К.

Залежність справедлива для умов, за яких температура запилених газів становить 375-475 К, розпилення води з температурою від 283 до 320 К

здійснюється дисковим водорозпилювачем, а газовий потік містить дрібнодисперсний пил з медіанним діаметром частинок 10 мкм.

У результаті тривалої експлуатації пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем встановлено, що нова конструкція апарата, крім підвищеної ефективності, характеризується високою надійністю при роботі на оборотній воді з вмістом механічних домішок до 2,0 кг/м³. У процесі експлуатації визначено оптимальні умови процесу пиловловлювання. Досвідченим шляхом встановлено періодичність вивантаження шламу з шламовідстійника, яка становить 2 місяці.

4.6. Схеми аспіраційних систем з дослідно-промисловими зразками пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем на Заводі імені В. О. Малишева

4.6.1. Конструктивні особливості пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем при внутрішній рециркуляції робочої рідини

Відмінною особливістю конструкції пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем при внутрішній рециркуляції робочої рідини (рис. 4.6) є його компактність.

Для запобігання обертанню робочої рідини в апараті передбачені радіальні планки - гасники хвиль. Зрив плівки рідини, яка піднімається по конічній насадці обертового розпилювача під дією газового потоку, запобігається за допомогою захисного кільця.

З метою зменшення виносу частинок розпиленої рідини в місці контакту фільтрувальної завіси з корпусом апарата у верхній частині V-подібної кільцевої камери встановлений кільцевий виступ.

Уловлений пил змивається по стінках апарата у шламовісбірник. Тверді частки осідають на дно шламовідстійника і періодично видаляються з нього через штуцер.

Освітлена рідина (вода) перекачується до дискового розпилювача та багаторазово використовується в процесі пиловловлення.

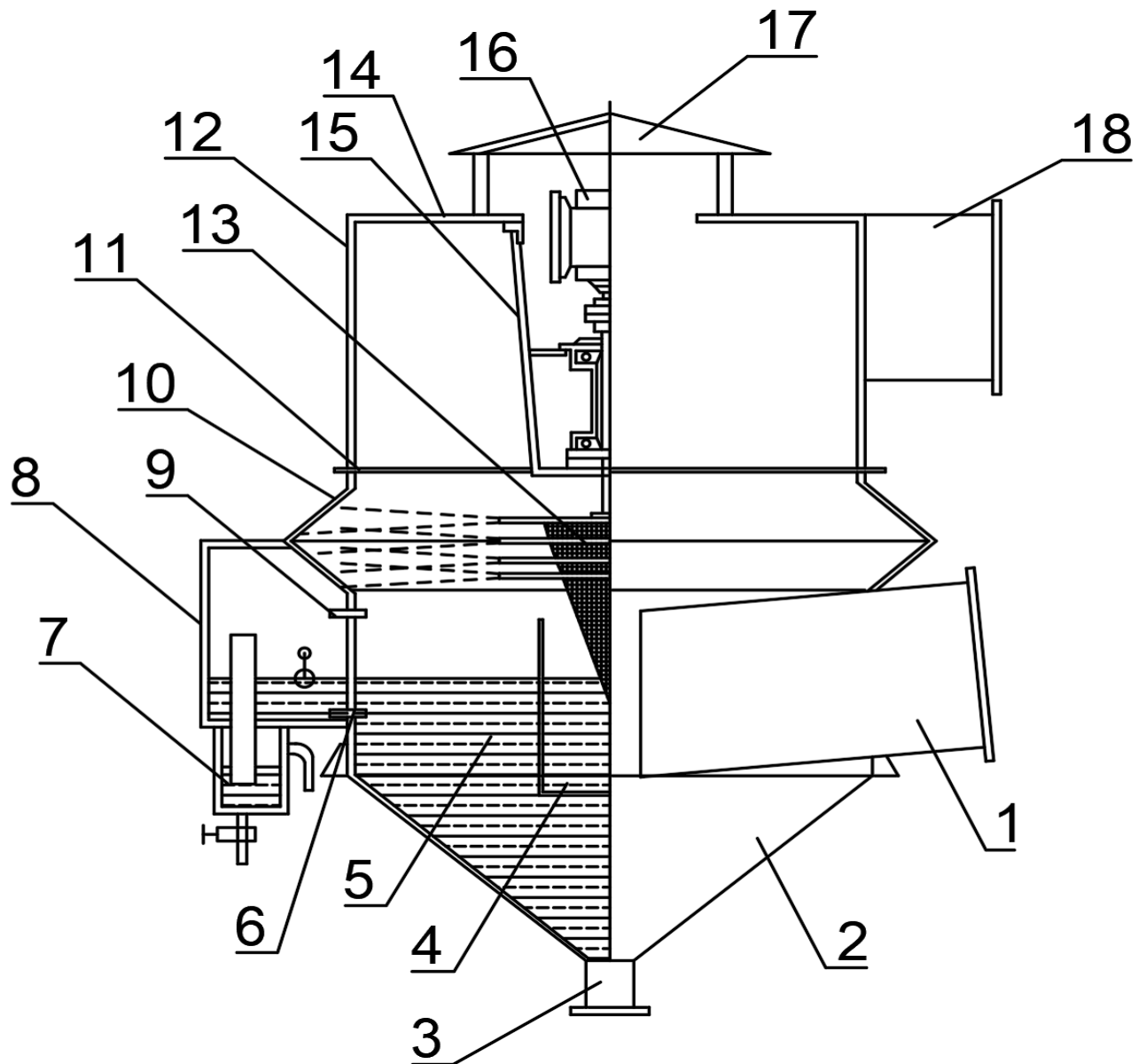


Рис. 4.6 Схема пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем при рециркуляції робочої рідини всередині апарату
 1 - вхідний патрубок; 2 - шламозбірник; 3 - штуцер; 4 - захистне кільце; 5 - планки-хвилегсники; 6 - з'єднувальний трубопровід; 7 - гідрозатвор; 8 - підживлювальний бак; 9 - отвір для вирівнювання тиску; 10 - кільцева V-подібна камера; 11 - кільцевий козирок; 12 - циліндричний корпус; 13 - дисковий розпилювач рідини; 14 - кришка; 15 - кожух; 16 - електродвигун; 17 - зонт; 18 - вихідний патрубок.

4.6.2. Аспіраційні системи з циклонним пиловловлювачем і внутрішньою рециркуляцією робочої рідини

Для дослідження ефективності пиловловлення в даному апараті були виготовлені з нержавіючої сталі три зразки пиловловлювача діаметром 1,0 м, висотою 1,32 м, продуктивністю до 5000 м³/год.

Маса кожного зразка становила 105 кг. Потужність електродвигуна розпилювача дорівнювала 0,6 кВт при $\omega=293$ об/с.

Дослідно-промислові зразки пиловловлювача встановлено в двох аспіраційних системах (рис. 4.7 та 4.8) термічного цеху Заводу імені В. О. Малишева.

Для запобігання потраплянню дрібних крапель води у газохід до вентилятора аспіраційної системи соляних ванн (рис. 4.7) встановлено сепаратор.

В аспіраційній системі селітрових ванн (рис. 4.8) паралельно змонтовано два зразки пиловловлювача, що забезпечують ефективне очищення запиленого повітря.

4.6.3. Виробничі дослідження ефективності пиловловлювача циклонного типу при рециркуляції робочої рідини

Дослідження ефективності пиловловлення в даному апараті проводилися при номінальному навантаженні технологічного обладнання.

Під час дослідження роботи пиловловлювача в аспіраційній системі соляних та лужних ванн (див. рис. 4.7) ефективність пиловловлювання визначалась при двох режимах технологічного процесу термічної обробки дрібних деталей:

Режим 1: робота однієї соляної ванни з температурою середовища 830 °С та двох лужних ванн з температурою 185 °С. Дві ванни перебували в ремонті.

Режим 2: робота однієї соляної ванни з температурою середовища 1100 °С і трьох лужних ванн з температурами 210, 300 і 360 °С. Одна соляна ванна не працювала (температура середовища 100 °С).

Аспіраційна система селітрових ванн досліджувалася при термічній обробці деталей з температурою 600 °С.

Під час виробничих досліджень здійснювали заміри запиленості аспіраційних викидів шляхом відбору проб на аналітичні фільтри АФА-В-18, витрати запилених газів, температури взаємодіючих середовищ та витрати води.

Результати досліджень пиловловлювача з дисковим розпилювачем при внутрішній рециркуляції робочої рідини в аспіраційних системах термічного цеху Заводу імені В. О. Малишева наведено в таблиці додатку.

Натурними дослідженнями встановлено, що концентрація пилу в аспіраційних викидах соляних ванн на вході в пиловловлювач досягала 200 мг/м³. Об'єм запилених газів становив 5130 м³/год.

Згідно з даними дисперсного складу пилу (табл. 4.5), пил є розчинним, дрібнодисперсним, з медіанним діаметром частинок 6 мкм.

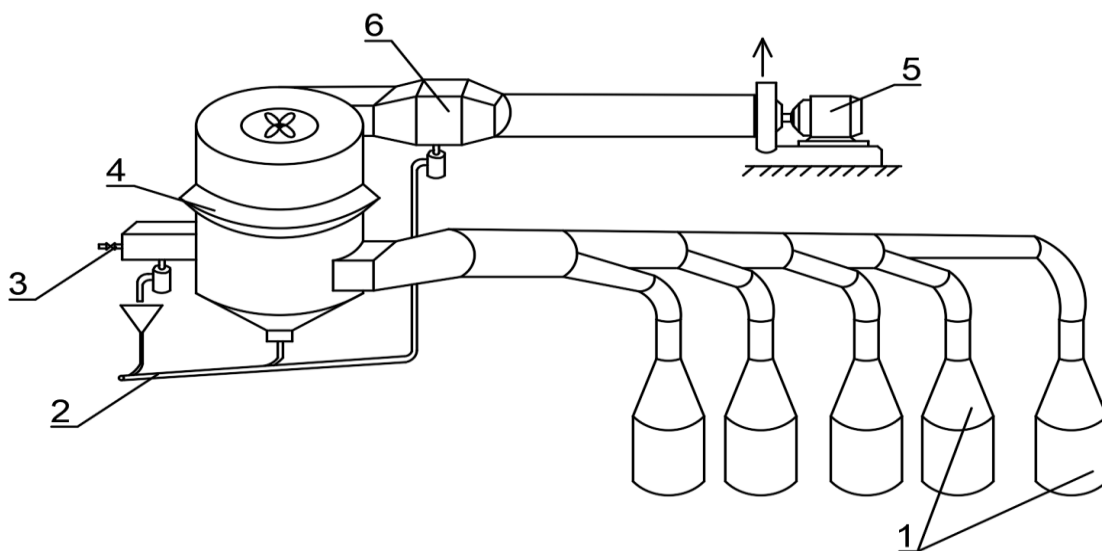


Рис. 4.7 Схема аспіраційної системи соляних ванн Заводу імені В. О. Малишева

1 - соляні ванни; 2 - шламопровід; 3 - водопровід; 4 - пиловловлювач циклонного типу з дисковим водорозпилювачем; 5 - центробіжний вентилятор типу Цб-46 №6; 6 - сепаратор.

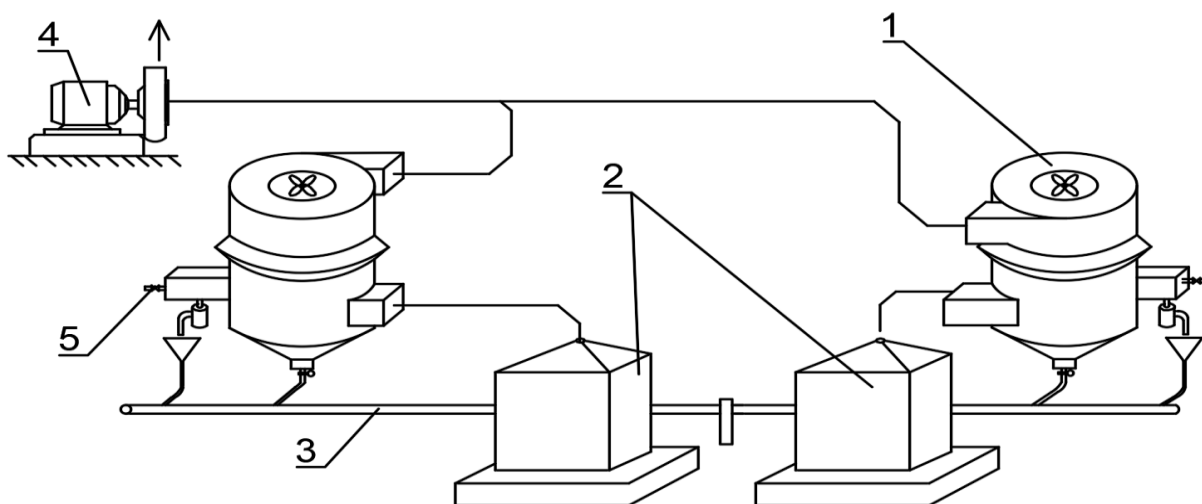


Рис. 4.8 Схема аспіраційної системи селітрових ванн Заводу імені В. О. Малишева

1, 6 - пиловловлювач циклонного типу з дисковим водорозпилювачем; 2 - селітрові ванни; 3 - шламопровід; 4 - відцентровий вентилятор; 5 - водопровід.

Таблиця 4.5

Дисперсний склад пилу в технологічних газах, що поступають у
пиловловлювач

Найменування пилу	Розмір частинок, мкм						
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-15
Пил, що міститься в газах від соляних та лужних ванн, % за масою	0.5	13.7	25.6	33.1	8.6	16.5	2.0
Пил, що міститься в газах від селітрових ванн, % за масою	0.3	9.3	22.8	34.4	18.9	10.7	3.6

Кінцева запиленість газу після очищення не перевищувала 5 мг/м^3 . Гідравлічний опір апарату становив 520 Н/м^2 . Ефективність пиловловлення досягала 97,4%.

Під час досліджень пиловловлювачів в аспіраційній системі селітрових ванн об'єм запилених газів, що надходив на кожен пиловловлювач, становив $3950 \text{ м}^3/\text{год}$ при концентрації пилу від 170,5 до $212,0 \text{ мг/м}^3$ з медіанним діаметром частинок 6 мкм. Температура газів дорівнювала 45°C . Ефективність пиловловлення становила 92,7%. Гідравлічний опір апарату становив 450 Н/м^2 .

Пиловловлювач циклонного типу з дисковим розпилювачем при внутрішній рециркуляції робочої рідини досліджували також в аспіраційній системі ключового цеху Київського заводу скловиробів (рис. 4.9).

Результати промислових досліджень наведено в табл. 4.6.

Ефективність пиловловлювання доломітового пилу з медіанним діаметром частинок 10 мкм досягала 97,4%.



Рис. 4.9 Загальний вигляд компонування пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем з внутрішньою циркуляцією очищеної води, в цеху Київського заводу скловиробів.

4.7. Виробничі дослідження пиловловлювача із зовнішньою рециркуляцією води при очищенні аспіраційних викидів від органічного пилу

Промислову перевірку пиловловлювача при очищенні аспіраційних викидів від органічного пилу проведено в аспіраційній системі цеху лактози сирзаводу на ПП «Чагівське». Пиловловлювач циклонного типу з дисковим розпилювачем було встановлено після сушильної установки молочного цукру з киплячим шаром. Аспіраційні викиди об'ємом 3200 м³/год, при температурі 40-60 °С та запиленості до 1455 мг/м³ з медіанним діаметром частинок $b_{50}=10$ мкм, надходили у пиловловлювач. Щільність пилу молочного цукру становила 1200 кг/м³.

Результати дослідження подано в табл. 4.6. Отримані дані свідчать про високу ефективність очищення, що становить 99,7%.

Таблиця 4.6.

Результати виробничих досліджень пиловловлювача РЗ-ППТ в цеху лактози сировиробничого заводу ПП «Чагівське» (очищення повітря, що містить пил молочного цукру).

Порядковий номер дослідження	Об'єм повітря на вході в пиловловлювач, м ³ /год	Температура повітря, °С	Витрата води, м ³ /год	Температура розпилювальної води, °С	Концентрація пилу у повітрі, мг/м ³		Ступінь очищення повітря, %	Гідравлічний опір, Па
					На вході в апарат	На виході з апарату		
№1	3600	40.0	0.36	10.0	268.0	7.4	97.3	402.2
№2	3600	40.0	0.36	10.0	480.0	8.3	98.4	412.0
№3	3730	42.0	0.40	9.6	384.0	4.0	98.9	421.8
№4	3700	30.0	0.40	9.6	283.2	8.3	97.2	421.0

№5	3220	37.0	0.32	9.0	1180.0	9.9	99.1	421.8
№6	3220	38.0	0.32	9.0	785.0	9.1	98.9	421.8
№7	3220	37.0	0.32	9.0	217.5	5.5	97.6	421.8
№8	3220	39.5	0.32	9.0	396.0	7.3	98.3	421.8
№9	3260	46.0	0.33	10.5	194.2	5.0	97.5	412.0
№10	3260	45.0	0.33	10.5	104.0	2.5	97.6	412.0
№11	3280	60.0	0.33	10.5	1455.0	5.0	97.7	412.0
№12	3200	40.0	0.32	10.0	194.0	5.0	97.5	421.8

4.8. Узагальнення результатів досліджень та аналіз ефективності пиловловлювача з дисковим розпилювачем

Дослідження пиловловлювача з дисковим розпилювачем здійснено як у лабораторних, так і у виробничих умовах.

У процесі дослідження встановлено, що суттєвий вплив на ступінь очищення мають дисперсність та природа пилу. Так, при очищенні повітря від гідрофільного пилу ефективність підвищується на 35% порівняно з гідрофобним пилом. Найважче вловлювати дрібнодисперсний ливарний пил з включенням сажових частинок. Це пояснюється насамперед тим, що вода насилу витісняє газову плівку з поверхні таких високодисперсних частинок, як сажа. Крім того, погана змочуваність сажі пов'язана з вмістом в ній олії.

Під час зіткнення аерозолі з краплями води, температура яких вища за температуру частинок, пилові частинки відштовхуються від них. Навпаки, взаємодія з краплями холодної води призводить до їхнього притягування до крапель. Це пояснюється тим, що молекули газу, стикаючись з більш гарячою перешкодою, набувають вищої швидкості та спрямовують частинки

в протилежний бік. Таким чином, холодні краплі діють як ефективніші «пастки» для пилу.

Ефективність зіткнення частинок кварцу з краплями води залежить від багатьох факторів, зокрема й від запиленості поверхні крапель. Як показали дослідження, при диспергуванні рідини з механічними домішками частинки кварцу осідають колоніями на поверхні крапель, зменшуючи ефективність зіткнення. Водночас зростає дисперсність розпилу (тобто кількість крапель у факелі), що збільшує кількість зіткнень з частинками. Зростання ефективності пиловловлення при цьому спостерігається до концентрації механічних домішок у рідині $2,5 \text{ кг/м}^3$ (див. рис. 3.21).

Згідно із загальними експериментальними даними з дослідження пиловловлювача на мінеральному пилу, отримано емпіричну залежність для визначення ступеня очищення аспіраційних викидів у такому вигляді:

а) для прямого потоку

$$\eta_{об} = 87.22 \cdot Stk^{0.02} \left(1 + 0.35 \frac{Z_H}{C_T}\right) \left(1 + 0.27 \frac{d_r}{\rho_r}\right) (1 - 1.363 \cdot 10^{-6} \cdot Re_K) \left(1 + 0.95 \cdot 10^{-4} \frac{h_\Phi}{l_\Phi}\right), \quad (4.3)$$

б) для протитечі

$$\eta_{об} = 72.62 \cdot Stk^{0.02} \left(1 + 0.665 \frac{Z_H}{C_T} + 342.4 \frac{Z_H}{C_T}\right)^2 \left(1 + 0.126 \frac{d_r}{\rho_r}\right) \left(1 + \frac{10.34}{Re_K} + 8.3 \cdot 10^{-4} Re_K\right) \times \\ \times \left(1 - 51.23 \cdot 10^{-4} \frac{h_\Phi}{L_\Phi}\right), \quad (4.4)$$

У тих випадках, коли концентрація механічних домішок для перевищує $2,5 \text{ кг/м}^3$, для визначення загальної ефективності очищення можна скористатися формулою Лебедюка:

$$\eta_{об} = \eta_{2.5} - \frac{q}{Z_H} C_T, \quad (4.5)$$

де:

$\eta_{2.5}$ — ефективність очищення при рециркуляції рідини з вмістом 2.5 кг/м^3 механічних домішок;

q - величина краплевиносу, розрахована за залежністю (3.31).

4.9. Методика розрахунку ефективності та конструктивних параметрів пиловловлювача з дисковим розпилювачем

I. Визначення ступеня очищення повітря від пилу.

Вихідні дані:

1. Об'єм газів, що очищаються, L , м³/год.
2. Температура газів, t_r , °C.
3. Вологовміст газів, d_r , кг/кг сухого газу.
4. Початкова запиленість, Z_H , кг/м³.
5. Фізико-хімічні властивості пилу (дисперсний склад, щільність та вид пилу).
6. Витрата води, W м³/год.
7. Температура води, що надходить у пиловловлювач, θ , °C.
8. Концентрація механічних домішок у воді, що надходить для пиловловлення, C_T .

Приймається:

1. Тип пиловловлювача з дисковим розпилювачем з продуктивністю, L , м³/год.
2. Схема водопостачання пиловловлювача.
3. Частота обертання дискового розпилювача, ω , 1/с.
4. Напрямок руху контактуючих фаз.

Визначається:

1. Середня швидкість газів активної зони, $U_{a,3}$, м/с.
2. Об'ємно-поверхневий діаметр краплі суспензії (води), $d_{3,2}$ м.
3. Критерій Стокса

$$Stk = \frac{d_4^2 \cdot \rho_4 \cdot v_{a,3}}{18 \mu_r d_{3,2}} \quad (4.6)$$

4. Критерій Рейнольдса для краплі,

$$Re_k = \frac{v_k \cdot d_{3,2} \cdot \rho_r}{\mu_r}; \quad (4.7)$$

5. Критерій Рейнольдса для газового потоку,

$$Re_r = \frac{v_r \cdot l \cdot \rho_r}{\mu_r}; \quad (4.8)$$

6. Критерій Рейнольдса для апарату

$$Re_a = \frac{v_{вх} \cdot D_a \cdot \rho_r}{\mu_r}; \quad (4.9)$$

7. Ступінь очищення викидів в залежності від типу розподілення

а) для прямого потоку

$$\eta_{об} = 87.22 \cdot Stk^{0.02} \left(1 + 0.35 \frac{Z_H}{C_T}\right) \left(1 + 0.027 \frac{d_r}{\rho_r}\right) (1 - 1.363 \cdot 10^{-6} \cdot Re_K) \left(1 + 95.07 \cdot 10^{-4} \frac{h_\Phi}{l_\Phi}\right), \quad (4.10)$$

б) для протитечії

$$\eta_{об} = 72.62 \cdot Stk^{0.02} \left[1 + 0.665 \frac{Z_H}{C_T} + 342.42 \left(\frac{Z_H}{C_T}\right)^2\right] \left(1 + 0.126 \frac{d_r}{\rho_r}\right) \left(1 + \frac{10.34}{Re_K} + 8.3 \cdot 10^{-4} Re_K\right) \times \\ \times \left(1 - 51.23 \cdot 10^{-4} \frac{h_\Phi}{l_\Phi}\right), \% \quad (4.11)$$

8. Гідравлічний опір пиловловлювача визначається за рівнянням:

а) для прямого потоку

$$\Delta p = 74.1 \cdot \rho_r \cdot v_{a,з}^2 \left(1 + \frac{6190.8}{v_{a,з} \cdot D_g \cdot \rho_r}\right) \left(1 + 0.22 \frac{\mu}{\rho_r}\right) \left(1 + 85.1 \frac{\mu_r \cdot \omega}{v_{a,з}^2 \cdot \rho_r}\right) \left(1 + 2.29 \cdot 10^{-6} \frac{v_{a,з} \cdot D_a \cdot \rho_r}{\mu_r}\right) \times \\ \times \left(1 + \frac{1.04 \cdot 10^{-6} \cdot v_{a,з} \cdot h_\Phi \cdot \rho_r}{\mu_r}\right) \quad (4.12)$$

б) для протитечії

$$\Delta p = 349.33 \cdot \rho_r \cdot v_{a,з}^2 \left(1 - 1.36 \cdot \frac{m}{\rho_r}\right) \left(\frac{\omega \cdot \mu_r}{v_{a,з}^2 \cdot \rho_r}\right)^{0.11} \left(1 - 0.21 \cdot 10^{-6} \frac{v_{a,з} \cdot D_a \cdot \rho_r}{\mu_r}\right) \times \\ \times \left(1 + 0.121 \cdot 10^{-7} \frac{v_{a,з} \cdot D_g \cdot \rho_r}{\mu_r}\right) \quad (4.13)$$

II. Визначення конструктивних параметрів пиловловлювача з дисковим розпилювачем:

Вихідні дані - ті самі.

Приймається:

1) Допустима концентрація пилу в газах, що викидаються в атмосферу згідно ДСП 201-97 [126] та ДСТУ 7303:2013 [127] при $L \leq 15$ тис. м³/год [128]:

$$Z_{\text{в}} = (160 - 4L) \cdot k \quad (4.14)$$

де k – коефіцієнт, що приймається по табл. ДСТУ в залежності від ГДК у робочій зоні;

2) Частота обертання дискового розпилювача (ω)

$$25 \leq \omega \leq 50, 1/\text{с};$$

3) Радіус диску розпилювача (R_g), $0.125 \leq R_g \leq 0.175$, м;

4) Центральний кут конусної насадки розпилювача ($50-70^\circ$);

5) Швидкість газів у вхідному патрубку ($U_{\text{вх}}$)

$$16 \leq U_{\text{вх}} \leq 26, \text{ м/с};$$

6) Швидкість газів в активній зоні ($U_{\text{а.з}}$), $2.0 \leq U_{\text{а.з}} \leq 3.0$, м/с.

Визначається:

1) Необхідний ступінь очищення аспіраційних викидів

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{Z_{\text{н}} - Z_{\text{в}}}{Z_{\text{н}}} \cdot 100, \% \quad (4.15)$$

2) Діаметр циліндричного корпусу апарату

$$D_a = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{L}{\pi \cdot v_{\text{а.з}}}}, \text{ м} \quad (4.16)$$

3) Кількість дисків розпилювача

$$n = 23.6 - \frac{(1 - \eta_{\text{тр}}) \left(\frac{W}{\pi \cdot v_{\text{г}} (R_a + R_g)} \right)^{0.44}}{0.256 \cdot 10^{-5} \left(\frac{R_g^4 \omega^2 \rho_{\text{ж}}}{d_4 \cdot \sigma_{\text{ж}}} \right)^{0.37}}, \text{ шт} \quad (4.17)$$

4) Висота кільцевої камери

$$h = 0.025(n - 1) + 0.085, \text{ м} \quad (4.18)$$

5) Діаметр кільцевої камери

$$D_{\text{к}} = D_a + \frac{h}{\text{tg} \alpha} \quad (4.19)$$

де $\alpha = 40^\circ$ — кут між конічною частиною кільцевої камери та площиною до вертикальної осі апарату;

6) Відстань між верхньою стіною вхідного патрубка і кришкою пиловловлювача

$$l = \pi \cdot D_f \cdot t_g \beta, \text{ м} \quad (4.20)$$

де $\beta = 12^\circ$ — кут підйому потоку газу по гвинтовій лінії;

7) Висота конічного шламовзбірника

$$h_{\text{шл}} = \frac{D_a}{2} \cdot \text{ctg} \gamma - 0.03, \text{м} \quad (4.21)$$

де $\gamma=50^\circ$ — кут між конічним шламовзбірником та вертикальною віссю апарату;

8) Висота вхідного патрубка

$$h_{\text{вх}} = \sqrt{\frac{1.4 \cdot L}{3600 \cdot v_{\text{вх}}}}, \text{м} \quad (4.22)$$

9) Висота вихідного патрубка

$$h_{\text{вих}} = \sqrt{\frac{1.68 \cdot L}{3600 \cdot v_{\text{вих}}}}, \text{м} \quad (4.23)$$

10) Висота корпусу пиловловлювача

$$H = l + h_{\text{вх} \cdot \text{п}} + \frac{D_a}{2} \cdot \text{tg} 8^\circ + h_{\text{шл}}, \quad (4.24)$$

11) Діаметр трубопроводу, що з'єднує бак з чашею робочої рідини

$$d_{\text{тр}} = \frac{1.13 \sqrt{\frac{W}{3600}}}{\sqrt{\varphi (2g \cdot h_y)^{0.25}}} \quad (4.25)$$

де $\varphi = \frac{0.61}{\sqrt{\varphi_{\text{п}} + 1}}$ - коефіцієнт витрати;

$\varphi_{\text{п}}=0.06$ — приведений коефіцієнт місцевих опорів;

$h_y=0.025$ м — різниця рівнів в підживлювальному баці і чаші;

$g=9.81$ м/с.

12) Діаметр трубопроводу для подавання води в бак

$$d_{\text{тр}}^I = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{W}{\pi \cdot \omega_{\text{в}}}} \quad (4.26)$$

де $\omega_{\text{в}}$ — швидкість води в трубопроводі (1.5-2.0 м/с).

4.10. Практичне впровадження пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем

Пиловловлювач циклонного типу з дисковим водорозпилювачем був успішно впроваджений і досліджений у реальних виробничих умовах на низці українських підприємств.

Зокрема, апарат ефективно експлуатується в аспіраційній системі сушильної установки на Київському склотарному заводі, де зафіксовано стабільну ефективність очищення на рівні 97–98,5 % при гідравлічному опорі до 600 Па. Проведені заміри підтвердили зниження концентрації пилу у викидах до рівня, нижчого за нормативно допустимий, що дозволяє підприємству відповідати сучасним екологічним вимогам.

На Державному підприємстві «Завод імені В. О. Малишева» (м. Харків) проведено дослідне впровадження в умовах теплоутворюючого виробництва. Було підтверджено можливість ефективного очищення гарячих аспіраційних викидів при повторному використанні зрошувальної води з механічними домішками.

На підприємстві ПП «Чагівське», що спеціалізується на виробництві молочної продукції, розглянуто результати досліджень, проведено попередню оцінку можливості впровадження апарата в технологічний процес на етапі реконструкції вентиляційної системи. Представлені результати було визнано такими, що можуть бути адаптовані для потреб харчової промисловості.

Крім того, технічну документацію на пиловловлювач циклонного типу з дисковим водорозпилювачем передано до ТОВ «БМК «ЕНЕРГОМОНТАЖВЕНТИЛЯЦІЯ» та ТОВ «ІТЦ «ІВІК», де результати дослідження рекомендовані до врахування в майбутніх проектах систем аспірації та вентиляції. Обидві організації підтвердили готовність до подальшого застосування запропонованої технології в умовах реконструкції чи нового будівництва промислових об'єктів.

Після апробації та підтвердження технічних характеристик, технічну документацію на пиловловлювач було актуалізовано та зареєстровано під номером ОВ 226.00.00.00. Результати практичного впровадження свідчать про високий потенціал використання апарата у різних галузях промисловості, включаючи скляну, машинобудівну, харчову та будівельну.

4.11. Розрахунок річного економічного ефекту від впровадження пиловловлювача циклонного типу з дисковим водорозпилювачем

Місце впровадження: складальний цех Київського заводу скловиробів.

Розрахунок виконано відповідно до "Основних методичних положень щодо визначення економічної ефективності науково-дослідних робіт", за формулою:

$$E=A[C_1 - C_2 - E_n(K_1 - K_2)] \quad (4.27)$$

де А — обсяг впровадження;

C_1 , C_2 - собівартість одиниці виробленої продукції до впровадження нової техніки і після впровадження;

K_1 , K_2 - питомі капітальні вкладення за існуючим та впроваджуваним варіантами;

E_n - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Відповідно до «Методичних рекомендацій щодо оцінки результатів наукової і науково-технічної діяльності», затверджених Міністерством освіти і науки України, приймається, що $E_n=0,12$.

Одиницею обсягу впровадження вважається пиловловлююча установка.

Таблиця 4.7

Розрахункові технічні показники

Найменування показників	База порівняння — циклон Вентурі		Нова техніка — пиловловлювач з дисковим розпилювачем	
	Кількість нормативів	Підстава	Кількість нормативів	Підстава
1. Продуктивність апарату по повітрю, м ³ /год	6000	Вказівки по застосуванню і підбору циклонів з водяною плівкою, вип. 3.	6000	Робочі креслення ОВ
2. Гідравлічний опір, кгс/м ²	137	Те саме рис. 20	60	Експериментальні дані.
3. Витрата води на а) зрошення стінок, м ³ /год	0.504 проточною	Те саме лист 12	1.2 оборотної	Дані досліджень.
б) промивання, м ³ /год	0.18 проточною	Те саме лист 12		
в) Витрата води з видаленням шламу, м ³ /год			63.0	
г) Підживлення для поповнення втрат при випаровування та крапливності, м ³ /год			0.056	Дані досліджень, звіт по темі
4. Маса апарату, кг	237	Вказівки по застосуванню і підбору циклонів з водяною плівкою,	165	Робочі креслення
5. Маса шламовідст., кг			568.0	Робочі креслення

Таблиця 4.8

Розрахунок капітальних витрат

Список обладнання	База порівняння				Нова техніка			
	Кількість	Ціна	Сума	Підстава	Кількість	Ціна	Сума	Підстава
1. Пиловловлювач циклон ЛЮТ з водяною плівкою при підвищеній швидкості ЦВП-6, шт	1	156 тис. грн	156 тис. грн	ПР. 23-69 поз. 1-012 з перерахунком на масу апарату				
2. Пиловловлювач циклонного типу з дисковим водорозпилювачем 1050, шт.					1	108 тис. грн	108 тис. грн	ПР. 23-09 поз. 1-012 з перерахунком на масу
3. Шламовідстійник (маса 568 кг) шт.					1	171 тис. грн	171 тис. грн	ПР. 23-03 дод. 33, ч. 1, перерахунком на масу
4. Вентилятор без електродвигуна, тип. ЦП 7-40 №8, шт.	1	145 тис. грн	145 тис. грн	Пр. 23-08 поз. 1-030				
5. Електродвигун тип АО-062-4 для привода вентилятора ЦП7-40, №8, шт	1	72 тис. грн	72 тис. грн	Пр. 15-01 поз. 0-168				
6. Вентилятор без					1	68 тис.	68 тис.	Пр. 23-08 поз.

електродвигун а, тип ЦП7-40 №6, шт.						грн	грн	1-029
7. Електродвигу н тип АО-052- 4 для привода вентилятора ЦП7-40, №6, шт.					1	49 тис. грн	49 тис. грн	Пр. 23-08 поз. 1-029
8. Електродвигу н АОЛ2-21 (N=1.1 кВт, n=1500 об/хв) для приводу водорозпилюв ача, шт.					1	22 тис. грн	22 тис. грн	Пр. 15-01 поз. 01-691
9. Насос відцентровий					1	44 тис. грн	44 тис. грн	Пр. 23-01 поз. 09-009
Разом			373 тис. грн	Укрупне ні норми			463 тис. грн	
10. Монтажно- транспортні витрати	5.0		18 тис. грн		15		69 тис. грн	
Разом			392 тис. грн				532 тис. грн	
11. Невраховане обладнання (від обладнання), %	10.0		37 тис. грн		10		46 тис. грн	
Всього			429 тис. грн				579 тис. грн	
Прийнято	K ₁ =430 тис. грн				K ₂ =580 тис. грн			

Таблиця 4.9

Результати розрахунків

Показники	Еталон	Нова техніка	Підстава
1. Річні експлуатаційні витрати, тис. грн/уст.	$C_1=1446$	$C_2=795$	Розрахунок в табл. 4.7
2. Капітальні вкладення, тис. грн/уст.	$K_1=430$	$K_2=580$	Розрахунок в табл. 4.8
3. Приведені витрати, тис. грн/уст.	$\Pi_1=1497.$ 6	$\Pi_2=864.6$	$C+E_nK$
4. Об'єм впровадження, шт.		$A=2$	
5. Річний економічний ефект, тис. грн		1266	$A (\Pi_1-\Pi_2)$

Загальні висновки з дисертаційної роботи

1. Розгляд фізичної взаємодії крапель рідини з частинками пилу дозволив з'ясувати особливості протікання процесу пиловловлювання краплями розпиленої рідини.

Встановлено, що введення вискодиспергованої рідини в обертовий запилений газовий потік в центрі апарату забезпечує високий ступінь кінематичної коагуляції пилових частинок при порівняно невеликих швидкостях газового потоку. Доведено можливість ефективного очищення аспіраційних викидів з підвищеною температурою до значень, що не перевищують гранично допустимі концентрації.

2. Встановлена залежність для визначення об'ємно-поверхневого діаметра краплі суспензії у факелі розпилу, що формується дисковим розпилювачем з конусною насадкою.

3. Встановлено, що зі збільшенням концентрації механічних домішок в оборотній воді зростає дисперсність утворюваних крапель на 10-15% у порівнянні з чистою водою.

4. Доведено, що за однакових умов диспергування середній об'ємно-поверхневий діаметр крапель дистильованої води становить на 5-8% більше, ніж у крапель звичайної водопровідної води.

5. На підставі аналізу процесу осадження аерозолів мокрим способом і закономірностей диспергування рідини обертовими розпилювачами розроблено апарат для очищення аспіраційних викидів з підвищеною температурою та повторного використання оборотної води з механічними домішками - пиловловлювач циклонного типу з дисковим розпилювачем.

6. Експериментальне дослідження розробленого пиловловлювача, проведене методом статичного моделювання, дозволило отримати математичну модель процесу пиловловлення, що встановлює залежність ефективності апарату від основних факторів: швидкості газу, питомого зрошення, дисперсності пилу, об'ємно-поверхневого діаметра крапель,

фізичних властивостей рідини, початкової концентрації пилу, вмісту вологи в очищеному газі та концентрації механічних домішок в оборотній воді.

7. Встановлено залежність інтенсивності краплевиносу від технологічних та конструктивних факторів.

8. Отримано розрахункові залежності у критеріальному вигляді для визначення гідравлічного опору пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем рідини.

9. Пиловловлювач продуктивністю 5000 м³/год досліджено в умовах промислової експлуатації на Київському заводі скловиробів. Експериментально підтверджено, що ефективність очищення аспіраційних викидів з підвищеною температурою становить 97-98,5% при гідравлічному опорі не більше 600 Па.

10. Доведено доцільність використання пиловловлювача для очищення аспіраційних викидів з підвищеною температурою із повторним застосуванням оборотної води, що містить до 2,5 кг/м³ механічних домішок.

11. Виявлено наступні переваги пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем рідини: ефективність роботи на оборотній воді з механічними домішками до 2,5 кг/м³, низька витрата води, стійкість до засмічення розпилювача, простота конструкції та економічність у виробництві й експлуатації.

12. Розроблено методику розрахунку пиловловлювача, яка дозволяє вирішувати різні завдання щодо його застосування.

13. Розроблені пиловловлювачі продуктивністю 4000-7000 м³/год впроваджено на промислових підприємствах у системах аспірації технологічних ліній. Запропонована методика розрахунку пиловловлювача може бути використана при проектуванні вентиляційних та аспіраційних систем на виробничих об'єктах. Технічна документація передана п'яти підприємствам та організаціям за їхніми запитами.

14. Економічний ефект від впровадження однієї установки пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем рідини на

підприємстві Київського заводу скловиробів становить 356 тис. грн на рік при використанні проточної води та 633 тис. грн - при оборотному водозабезпеченні.

Крім зазначеного економічного ефекту, переваги пиловловлювача включають зниження екологічної шкоди та покращення умов праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балтернас П. Б. Обезпилювання повітря на підприємствах будматеріалів. М.: «Будвидат», 1991. 184 с.
2. Любарець, О. П., Микитенко М. Р., «Аналіз складових чинників, що впливають на стан знепилення аспіраційних викидів». Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, т. 46, 2023, с. 89-108, doi:10.32347/2409-2606.2023.46.89-108.
3. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc. Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Operation and Maintenance, 2nd Edition. Cincinnati, Ohio, USA, 2020.
4. Спінов В. М., Афтанюк В. В. Експериментальне дослідження кінетики мокрого пиловловлювача. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» № 2 (84), с. 32-46, 2011.
5. Розпилювач рідини: авторське свідоцтво СРСР № 266182. Н. І. Петриченко, А. Я. Ткачук, С. І. Приємов, П. М. Сенько; заявл. 01.02.1968; опубл. Бюл. винах. № 11, 1970. – МПК F24F; УДК 697.932.6. – Заявник: Науково-дослідний інститут санітарної техніки і обладнання будівель і споруд (НДІСТ).
6. Ратушняк, Г. С., Лялюк, О. Г. Пристрої для очищення газових викидів. Київ, ІВКП "Укреліотех", 180 с., 2009.
7. Зінич, П. Л., та ін. Дослідження мокрих скрубєрів у промислових аспіраційних системах. Журнал промислової вентиляції, 18(2), с. 101–113, 2009.
8. Коузов П. А. Очищення від пилу газів та повітря в хімічній промисловості. Л., 1982. 255 с.
9. Зіняк В. В., Ткачук А. Я. Технологія очищення пилу в мокрих скрубєрах. Технологічний розвиток вентиляційних систем. Випуск 13. 2001. С. 145–151.

10. Гаджієв, Е. Н., Варламов, Є. М. Аналіз дисперсії пилу в аспіраційних системах при виробництві теплоізоляційних матеріалів. Український науково-дослідний інститут екологічних проблем, Харків, 192 с., 2017.
11. Jeon Tae-Yeong, Kim Jae-Yong. Characterization of fine dust collection using a filter ventilation. Department of Environmental Engineering, Applied Chemistry for Engineering Volume 26 Issue 2, Pages 229-233, 2015. <https://doi.org/10.14478/ace.2015.1022>
12. Industrial Ventilation News Digest. Applied Industrial Hygiene. Т. 1, № 1. С. F-40-F-43, 1986. <https://doi.org/10.1080/08828032.1986.10390454>.
13. MacIntyre, N. R., Branson, R. D. Mechanical ventilation. Elsevier Canada, 352. <http://doi.org/10.1016/j.vent.2008.02.009>.
14. Шелюх Ю. Є. Дослідження впливу гідравлічного опору на продуктивність роботи вихрових пиловловлювачів нового покоління. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, 13, 137-143, 2016.
15. Фукс Н. А., Сутугін А. Г. Фізична хімія: високодисперсні аерозолі // Підсумки науки: сер. хімія. – М. : ВИНІТИ, 1969. – 82 с.
16. Jiang Zhong-An, Zhang Yi-Kun, Wang Ming. Study and practice on dust control technology in fully mechanized excavation face. Hydraulic Engineering IV - Proceedings of the 4th International Technical Conference on Hydraulic Engineering, CHE 2016, Pages 231-238. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85016767139&partnerID=40&md5=94d605a202bc1365106dc68ef2d760a7>
17. Уайт П., Сміт С. (ред.) Високоєфективне очищення повітря / пер. з англ. Б.І. Мягкова, В.Г. Лапенка. – М. : Атомиздат, 1967. – 311 с. – Ориг.: White P.A.F., Smith S.E. (Eds.). High-Efficiency Air Filtration. – London : Butterworths, 1964.
18. Барботажно-вихровий пиловловлювач: авторське свідоцтво СРСР № 174938 / І. З. Лондон, С. В. Морозов; заявл. 15.02.1964; опубл. Бюл. винах. № 18, 1965. – МКІ В01 ; УДК 621.928.9.

19. Jinchao Zhao, Guijun Gao, Xinqi Gao. Study on the Influence of Dust Removal Fan Structure Parameters on Dust Removal Performance. Appl. Sci. 2024, 14(8), 3405. <https://doi.org/10.3390/app14083405>
20. Солодовникова Є. М., Семенов В. С., Сенько П. М. Щодо доцільності застосування контактних водяних економайзерів на підприємствах будівельних матеріалів. Санітарна техніка: зб. наук. пр. – Київ: Будівельник, 1969. – Вип. 8. – С. 86–89.
21. Jin Zijong, Hu Shengyong, Zhu Xiaotong, Feng Guorui, Sun Jian. Research on wet-type swirl dust collection technology and its application in underground excavation tunnels. Advanced Powder Technology Volume 33, Issue 12, December 2022, Article number 103851. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.103851>
22. Афтанюк В. В., Кіріс О. В., Даниленко Д. В., Афтанюк А. В. Розробка інтегрованої конструкції скрубера для суднових енергетичних установок. Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 45-Одеса: НУ «ОМА», 2022.-201 с.
23. Мокрий пиловловлювач: авторське свідоцтво СРСР № 233634 / Н. Ф. Дулоладов; заявл. 16.02.1966; опубл. у Бюл. винах. № 3, 1969. – МКІ В01; УДК 66.074.511.
24. Ляшеник А. В., Тисовський Л. О., Дорундяк Л. М., Дадак Ю. Р. Обґрунтування конструкції циклона для очищення повітря на підприємствах деревообробної галузі. Лісівництво і агролісомеліорація : зб. наук. праць. – Харків : Вид-во УкрНДІЛГА. – 2011. – Вип. 21-09. – С. 119-125.
25. Chen, Building and environment. United Kingdom, 2009.
26. Type W. Roto-Clone Dynamic Precipitator, American Air Filter Bulletin 274-F, Louisville, Kentucky, 1965.
27. Rice O.R., Bigelow C.G. Desintegrators for Fine Cleaning Blast Furnace Gas. Am. Inst. Mining Memall.,Feb., 1950.
28. Bahloul Ali, Djebara Abdelhakim, Saidi Mohamed N. and Songmene Victor. Simulating grinding dust dispersion and assessment of the efficiency of local

capture ventilation. Ventilation 2015 - Proceedings of the 11th International Conference on Industrial Ventilation, Volume 2, 2015, Pages 598-605.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84987971010&partnerID=40&md5=cbade28442174a38505b8bca34d09dec>

29. Ordonez A. et al. Distribution of heavy metals in the street dusts and soils of an industrial city in Northern Spain. Archives of Environmental Contamination and Toxicology. V. 44. №. 2. 2003.

30. Howard D. Goodfellow, Yi Wang. Industrial Ventilation Design Guidebook, Academic Press, Canada 2021.

31. Gairola, R., Rao, D. V. Design of industrial ventilation systems for dust control. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 10(1), 43–50, 2013.
<http://doi.org/10.1080/15459624.2012.731131>.

32. Hadzhiev E., Varlamov E. Dispersion analysis of dust in aspiration systems in the production of thermal insulation materials using advanced experimental equipment. Ecological Sciences. 2019. T. 1, № 2. C. 27–31.
<https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-1-24-2-6>.

33. Kateusz Przemysław. Estimation of uncertainty of mean velocity of flue gas in a conduit as determined by the traverse method within the gravimetric measurement of particulate concentration. Silesian University of Technology, Department of Heating, Ventilation and Dust Removal Technology, ul. Konarskiego 20, Gliwice, 44-100, Poland, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2015.07.014>

34. Arya Sampurna, Sottile Joseph, Novak Thomas. Development of a flooded-bed scrubber for removing coal dust at a longwall mining section. Safety Science Volume 110, December 2018, Pages 204-213.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.003>

35. Sateri J., Heikkinen J. and Pallari M., "Feasibility of Ventilation Heat Recovery in Retrofitting Multi-Family Buildings", in Proceedings: Implementing the Results

of Ventilation Research, 16 th, Air Infiltration and Ventilation Centre Conference, Palm Springs, USA, September 19-22, 1995

36. Приемов С. І. Дослідження роботи мокрого пиловловлювача з дисковим розпилювачем в очищенні вентиляційних викидів : Дисертація кандидата технічних наук. Київ, Київський національний університет будівництва і архітектури, 1971 р. 196 с.

37. Ткачук, А. Я., Любарець, П. А., Петриченко, М. І., Степчук, І. Д. Пиловловлювач. Патент № 1044317 СРСР. Б.І. 1983, № 36, с. 19.

38. Пиловловлювач: авторське свідоцтво СРСР № 599829 / П. А. Любарець, І. І. Прилуцький; заявл. 16.02.1976; опубл. Бюл. винах. № 12, 1978. – МКІ В01 47/06; УДК 621.928.97. – Заявник: Всесоюзний НДІ цукрової промисловості.

39. Любарець П. А., Прилуцький І. І. Мокрий пиловловлювач: інформ. листок № 6-78, серія І9А-02. – М. : ЦНДІТЕПІЩЕПРОМ, 1978. – 4 с.

40. Центробіжний мокрий пиловловлювач: патент ФРН № 1232178. – Опубл. 1970.

41. Скрубер: патент ФРН № 1287042. – Опубл. 1969. – № 3. – МПК В01; УДК 66.074.511(088.8).

42. Пристрій для уловлювання пилу: авторське свідоцтво СРСР № 584880 / Л. М. Чесноков та ін ; заявл. 13.08.1976 ; опубл. Бюл. винах. № 47, 1977. – МКІ В01 47/10; УДК 621.928.97. – Заявник: Держ. респ. ін-т з проєктування газопостачання і комплексного благоустрою міст і селищ.

43. Ужов В. М., Вальдберг А. Ю. Очищення газів мокрими фільтрами. – Л. : Хімія, 1972. – 248 с.

44. Ніколаєв А. М., Овчинніков А. О., Ніколаєв М. О. Високоєфективні вихрові апарати для комплексного очищення великих обсягів промислових газових викидів // Промисловість. – 1992. – № 9. – С. 540–544.

45. Меньшов М. В. Про математичну модель міграції осадження полідисперсного аерозольного утворення // Вісн. Природничо-наук. серія. – 2006. – № 6/1(46). – С. 114–122.

46. Леженін А. О., Мальбахов В. А., Шличков В. А. Чисельна модель міграції аерозолів, що утворюються в зоні лісових пожеж // Оптика атмосфери і океану. – 2003. – Т. 16, № 5–6. – С. 485–488.
47. Zhao Haiming, Xie Xin, Xia Yimin, Liao Xiaole. Research on operation parameters of three-phase flow in wet dust collecting fan. Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology) Volume 48, Issue 6, 26 June 2017, Pages 1505-1512. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85026837770&doi=10.11817%2fj.issn.1672-7207.2017.06.013&partnerID=40&md5=6c72ea27bb02307ad39dc991f0415ddd>
48. Ніколаєв А. М., Овчинніков А. О., Ніколаєв М. О. Високоєфективні вихрові апарати для комплексного очищення великих обсягів промислових газових викидів // Хімічна промисловість. – 1992. – № 9. – С. 540–544.
49. Petty M. C. Langmuir–Blodgett Films: an Introduction. – Cambridge : Cambridge University Press, 1996. – 252 p.
50. Hussain S. A. (ред.). Langmuir–Blodgett Films: Fundamentals to Applications. – Amsterdam : Elsevier, 2025. – 350 p.
51. Голоудіна С. І., Лучинін В. В. Технологія Ленгмюра–Блоджетт // Журнал колоїдної хімії. – 2005. – Т. 78, № 9. – С. 1499–1503.
52. Ковальчук М. В., Клечковська В. В., Фейгін Л. А. Молекулярний конструктор Ленгмюра–Блоджетт // Природа. – 2003. – Т. 72, № 12. – С. 45–48.
53. Hussain S.A., Dey B., Mehta N. Унікальна надмолекулярна архітектура через техніку Ленгмюра–Блоджетта // Heliyon. – 2019. – Т. 4. – Стаття e01038. – 48 с.
54. Goldudina S.I., Luchinin V.V. Технологія Ленгмюра–Блоджетта: сучасні нанотехнологічні застосування // Матеріали конференції. – 2008. – С. 43–46.
55. Товажнянський Л. Л., Моїсєєв В. Ф., Байрачний В. П., Шапорєв В. П. Інтенсивні апарати зі стабілізованим шаром піни для очищення відхідних газів: монографія. – Харків : НТУ «ХПІ», 2003. – 228 с.

56. Александров І. А. Ректифікаційні та абсорбційні апарати. – М. : Хімія, 1967. – 280 с.
57. Picknett R. G. Коефіцієнти захоплення водяними краплями в повітрі // *International Journal of Air Pollution*. – 1960. – Т. 3. – С. 160–167.
58. Коузов П. А. Основи аналізу дисперсного складу промислових пилів та подрібнених матеріалів. – Л. : Хімія, 1987. – 264 с.
59. Telford J. W., Thorndike N. S., Bowen E. G. Злиття між малими водяними краплями // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 1955. – Т. 81. – С. 241–250.
60. Духін С. С., Каганер В. М. Електрокінетичні властивості дисперсних систем. – К. : Наукова думка, 1972. – 320 с.
61. Dukhin S. S., Kaganer V. M. Electrokinetic properties of aerosols // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 1971. – Vol. 1, Iss. 3. – P. 321–347.
62. Dukhin S. S., Kaganer V. M., Derjaguin B. V. Kinetic and electrokinetic properties of particles at interfaces // *Progress in Surface Science*. – 1976. – Vol. 7. – P. 119–181.
63. Dukhin S. S., Goetz P. J. Characterization of liquids, nano- and microparticulates, and porous bodies using ultrasound. – Amsterdam : Elsevier, 2002. – 327 p.
64. Нечаєва Є. С., Попов Д. М. Дослідження дисперсного складу пилу та факела розпилю рідини в роторному розпилювальному пиловловлювачі // *Техніка і технологія харчових виробництв*. – 2013. – № 2. – С. 1–5.
65. Sager T. M., Porter D. W., Robinson V. A., Lindsley W. G., Schwegler-Berry D., Castranova V. Покращений метод диспергування наночастинок для *in vitro* та *in vivo* дослідження токсичності // *Nanotoxicology*. – 2007. – Т. 1, № 2. – С. 118–129.
66. Теверовський Є. Н., Зайцев М.М. Пиловловлюючі, абсорбційні й теплообмінні апарати з високошвидкісним потоком газу // *Труди НДІОГаз*. – 1955. – Вип. 1. – С. 32–45.

67. Dépée A., Lemaitre P., Gelain T., Monier M., Flossmann A. Лабораторне дослідження ефективності захоплення субмікронних аерозолей краплями хмари — Частина I: вплив відносної вологості // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2021. – Т. 21. – С. 6945–6962.
68. Gelain T., Flossmann A. Experimental study of aerosol capture by cloud droplets // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2021. – Vol. 21. – P. 6945–6962.
69. Beard K.V., Grover S.N. Scavenging of aerosol particles by a falling water droplet // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 1971. – Vol. 28. – P. 1520–1529.
70. Technical note: Retrieval of dust aerosol optical depth over oceans // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2019. – Vol. 19. – P. 15583–15586.
71. Hamamoto Y., Christy J.R.E., Sefiane K. Особливості потоку при випаровуванні краплі суміші етанол–вода на скляній підкладці // *Journal of Thermal Science and Technology*. – 2012. – Т. 7, № 3. – С. 425–436.
72. Абрамзон Б., Сіріньяно В.А. Модель випаровування крапель для розрахунків горіння паливного розпилу // *Міжнародний журнал тепломасообміну*. – 1989. – Т. 32, № 9. – С. 1605–1618.
73. Бірд К.В., Гровер С.Н. Захоплення аерозольних частинок падаючою краплею води // *Журнал атмосферних наук*. – 1971. – Т. 28. – С. 1520–1529.
74. Рой С., Сіонг Х. та ін. Еволюція температури та тривалості життя хмарних крапель у ненасичених умовах // *Атмосферна хімія і фізика*. – 2024. – Т. 24. – С. 11653–11677.
75. Fedoseev V.A., Polishchuk D.I. Експериментальні дослідження випаровування крапель палива в потоці гарячого повітря // *Труди Одеського держуніверситету ім. Мечникова. Серія «Фізика наук»*, № 7 (150), 1960. – С. 85–96.
76. Blinov V.I., Dobrovol'skaya L.P. Вплив температури на випаровування вільно підвішеної краплі у потоці повітря // *Journal of Engineering Physics*, 1972. – Т. 23. – С. 1285–1289.

77. Амелін А.Г. Теоретичні основи утворення туману при конденсації пари // Успіхи хімії та хімічної інженерії. – 1969. – Вип. 38, № 1. – С. 178–187.
78. Фукс, Н.А. Випаровування і зростання крапель у газовому середовищі / Н.А. Фукс. – Оксфорд: Пергамон Прес, 1959. – 89 с.
79. Бьорд, Р.Б., Стюарт, В.Є., Лайтфут, Е.Н. Процеси переносу / Р.Б. Бьорд, В.Є. Стюарт, Е.Н. Лайтфут. – 2-ге вид. – Нью-Йорк: Вілей, 2002. – 905 с.
80. Левич В.Г. Фізико-хімічна гідродинаміка. У 2-х т. – К.: Наук. думка, 1981. – Т. 1. – 784 с.
81. Фукс Н.А. Випаровування і зростання крапель у газовому середовищі / Н.А. Фукс. – Оксфорд: Пергамон Прес, 1959. – 89 с.
82. Ужов В.М., Вальдберг А.Ю. Дослідження процесу охолодження вологого газу в пиловловлювачах з обертальним зрошенням // Хімічна промисловість. – 1974. – № 7. – С. 32–37.
83. Міхельсон М.Л. Дослідження ролі пилових частинок у процесах конденсації водяної пари в повітрі // Вісник атмосферної фізики. – 1962. – № 2. – С. 59–64.
84. Духін С.С., Дерягін Б.В. Електрокінетика і коагуляція. – М.: Наука, 1976. – 360 с.
85. Литвинов А.Т. Влияние подачи водяного пара на эффективность мокрого обеспыливания // Газоочистка. – 1976. – № 3. – С. 21–24.
86. Литвинов А.Т. Уловлювання пилу з водяною парою в апаратах з трубками Вентурі // Промислова екологія. – 1981. – № 5. – С. 28–32.
87. Литвинов А.Т. Оптимізація волого-теплових параметрів при зрошувальному пиловловленні // Хімічна промисловість. – 1982. – № 6. – С. 42–45.
88. Литвинов А.Т. Дослідження впливу температури точки роси на ефективність очищення газу у скруберах Вентурі // Проблеми охорони атмосферного повітря. – 1983. – № 4. – С. 10–13.
89. Кузенков Б.А. Уловлювання пилу в ПВМ-пиловловлювачах за рахунок конденсації пари // Хімічна промисловість. – 1985. – № 9. – С. 33–36.

90. Литвинов А.Т. Вплив розміру частинок на ефективність конденсаційного пиловловлення // Вісник інженерних наук. – 1987. – № 1. – С. 15–18.
91. Лебедюк Г.К. Розпилювання рідин у промислових апаратах. – К.: Наукова думка, 1982. – 240 с.
92. Паж Д.Г. Розпилювальні пристрої та їх застосування. – М.: Хімія, 1980. – 215 с.
93. Клячко Л.А. Динаміка рідин при розпилюванні: Монографія. – Л.: Машинобудування, 1978. – 180 с.
94. Ластовцев А.М. Теорія та практика диспергування рідин. – М.: Енергія, 1981. – 198 с.
95. Долінський А.А. Скрабери та пиловловлювачі з дисковими розпилювачами. – К.: Будівельник, 1985. – 176 с.
96. Чакчір, Я. А., Петров, М. І., Петриченко, М. І., Сенько, П. М., Любарець, О. П. Пиловловлювач для мокрого очищення вентиляційних викидів. Патент № 1389825 СРСР. Б.І. 1988, № 15, с. 41.
97. Hinds W.C. Технологія аерозолів: властивості, поведінка та вимірювання частинок у повітрі. – Нью-Йорк: Wiley, 1999. – 483 с.
98. Baruah P.J., Sahu R.K. Порівняльне дослідження розпилення сумішей етанолу з водою // International Journal of Multiphase Flow. – 2005. – Т. 31. – № 7. – С. 932–945.
99. Friedman S.J. Improved method to disperse nanoparticles for in vitro and in vivo investigation of toxicity // Nanotoxicology. – 2007. – Т. 1, № 2. – С. 118–129.
100. Roth S., Zeng Y., Albrecht H.E. Вплив властивостей рідини на характеристики розпилю // Atomization and Sprays. – 2010. – Т. 20. – № 4. – С. 303–317.
101. Левіч В.Г. Фізико-хімічна гідродинаміка. У 2 т. Т. 1. – М.: Видавництво іноземної літератури, 1962. – 916 с.
102. Мещерський І.В. Динаміка тіла змінної маси. – М.: Наука, 1967. – 454 с.

103. Фукс Н.А. Випаровування і зростання крапель в газоподібному середовищі. – Оксфорд: Pergamon Press, 1959. – 89 с.
104. Моїсєєв Н.Н. Теоретические основы пылеулавливания. – М.: Госэнергоиздат, 1953. – 286 с.
105. Микитенко М. Р., «Математичне моделювання та аналіз ефективності руху частинок у циклонних розпилювальних апаратах». Просторовий розвиток, зб. 11, 2025, с. 456-463, doi:10.32347/2786-7269.2025.11.456-463.
106. Нукіяма С., Танасава Й. Експериментальні дослідження розпилення рідини у повітряному потоці // Праці Товариства механіків Японії. – 1938. – Т. 4. – С. 62–71.
107. Елькотб М. М. Розпилення та аерозолі // Прогрес у науці про енергію та згоряння. – 1982. – Т. 8. – С. 61–91.
108. Лефевр А. Х. Розпилення та аерозолі. – Нью-Йорк : Hemisphere Publishing, 1989. – 421 с.
109. Таннер Ф. Х. Моделювання розпилення струменя рідини та руйнування крапель у процесах згоряння аерозолів : дис. ... д-ра філософії. – Стенфордський університет, 1997. – 235 с.
110. Грабовський Є.І., Костенко В.Я., Бабич І.І. Пристрій для визначення розмірів крапель, що утворюються в процесі розпилення рідини // Прилади та методи вимірювання. – 2005. – № 1. – С. 32–35.
111. Einstein A. Теорія в'язкості розведених суспензій / A. Einstein – Журнал «Nature». – 1906. – Т. 155. – № 3929. – С. 364–366.
112. Кривошеєв Н.П. Теоретичні і практичні основи визначення щільності суспензій: методика / Н.П. Кривошеєв – Журнал «Прилади та методи вимірювання». – 2007. – № 3. – С. 45–51.
113. Любарець, О. П., Микитенко М. Р., «Дослідження впливу конструкції дискового розпилювача на ефективність пиловловлення в умовах високотемпературних потоків». Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, т. 52, 2025, с. 69-84, doi: 10.32347/2409-2606.52.69-84.

114. Кудряшов В.П. Аеродинаміка вентиляційних і аспіраційних установок / В.П. Кудряшов. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
115. ТУ У 28.7 32564661 001:2008. Сітки дротяні ткані з квадратними чарунками. – К.: ДП «ХРЦ Стандарт», ТОВ «Тетра», 2008. – 10 с.
116. Головка Л.Г. Методика визначення гранулометричного складу пилу методом седиментометрії / Л.Г. Головка, І.І. Ткаченко. – К.: Ін-т гігієни праці, 2001. – 25 с.
117. Методика визначення дисперсного складу аерозольних частинок у водних і органічних середовищах. – К.: Держстандарт України, 2004. – 18 с.
118. Інструкція з приготування суспензій для дисперсного аналізу пилу. – Харків: УкрНДІ інженерної екології, 2002. – 12 с.
119. ДСТУ Б В.2.7-32:2001. Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Технічні умови. – [Чинний від 2002-07-01]. – К.: Держбуд України, 2001. – 10 с.
120. ДСТУ Б В.2.7-233:2010. Матеріали будівельні. Методи визначення гранулометричного складу мінеральних порошків. – [Чинний від 2011-01-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 18 с.
121. ДСТУ 8736:2017. Суміші бетонні. Технічні умови. – [Чинний від 2018-01-01]. – К.: Мінрегіон України, 2017. – 16 с.
122. Тисовський Л. О., Дорундяк Л. М., Ляшеник А. В., Дадак Ю. Р. Побудова математичної моделі для задачі про рух повітря в циклоні. Всеукраїнський науково-технічний журнал ПГіП. – 2010. – Вип. 2(28). – С. 57-62, 2010.
123. Хартлі Г. Основи статистики та планування експерименту / пер. з англ. – М.: Наука, 1972. – 368 с.
124. Ідельчик І.Є. Довідник з гідравлічного опору. – М.: Машинобудування, 1969. – 456 с.
125. Oleksandr Liubarets, Maksym Mykytenko, «EVALUATION OF EFFICIENCY AND OPTIMISATION OF CYCLONE-TYPE DUST COLLECTORS WITH A CIRCULAR SPRAY OF REVERSIBLE SUSPENSION

FOR GAS PURIFICATION UP TO 250 °C», Innovative Solutions In Modern Science № 3(67), 2025, New York “ТК Meganom LLC”, p. 5-54, doi:10.26886/2414-634X.3(67)2025.1.

126. ДСП 201-97. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць. – Київ: МОЗ України, 1997. – 52 с. (Втратив чинність з 31.07.2014).

127. ДСТУ 7303:2013. Викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря. Класифікація і вимоги до нормування. – [Чинний від 01.01.2014]. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. – 18 с.

128. N. Maksuita, Yu. Golik. Comparative analysis of pollution of atmospheric air in Cities (an Example of Leipzig and Poltava). Proceedings of CEE 2019. Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering, 2019. P. 260-267. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_33

Список опублікованих праць за темою дисертації. Особистий внесок здобувача

За результатами досліджень опубліковано сім наукових праць, у тому числі: чотири статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б» та три тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Любарєць О.П., Микитенко М.Р., «Аналіз складових чинників, що впливають на стан знепилення аспіраційних викидів». *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, т. 46, 2023, с. 89-108.
<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.46.89-108>

Особистий внесок здобувача: проведено порівняльний аналіз конструкцій та принципів роботи основних типів мокрих пиловловлювачів із класифікацією за способом диспергування та станом рідинної фази; систематизовано їх переваги й недоліки у контексті очищення аспіраційного повітря від дрібнодисперсного пилу.

2. Микитенко М.Р., «Математичне моделювання та аналіз ефективності руху частинок у циклонних розпилювальних апаратах». *Просторовий розвиток*, зб. 11, 2025, с. 456-463. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.11.456-463>

3. Oleksandr Liubarets, Maksym Mykytenko, «EVALUATION OF EFFICIENCY AND OPTIMISATION OF CYCLONE-TYPE DUST COLLECTORS WITH A CIRCULAR SPRAY OF REVERSIBLE SUSPENSION FOR GAS PURIFICATION UP TO 250 °C», *Innovative Solutions In Modern Science* № 3(67), 2025, New York “TK Meganom LLC”, p. 5-54.
[https://doi.org/10.26886/2414-634X.3\(67\)2025.1](https://doi.org/10.26886/2414-634X.3(67)2025.1)

Особистий внесок здобувача: проведено експериментальні дослідження

роботи пиловловлювача циклонного типу з дисковим розпилювачем рециркуляційної пило-водяної суспензії в умовах реального виробництва. Встановлено закономірності впливу швидкості газового потоку, дисперсного складу пилу, витрати рідини та концентрації зважених частинок у суспензії на ефективність очищення. Запропоновано методику оцінки ефективності роботи мокрих пиловловлювачів із урахуванням гідродинамічних і конструктивних параметрів.

4. Любарець О.П., Микитенко М.Р., «Дослідження впливу конструкції дискового розпилювача на ефективність пиловловлення в умовах високотемпературних потоків». *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, т. 52, 2025, с. 69-84. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.52.69-84>

Особистий внесок здобувача: виконано експериментальні дослідження процесу розпилення рідини дисковим водорозпилювачем у пиловловлювачі циклонного типу при високотемпературних аспіраційних викидах. Визначено вплив конструктивних параметрів дисків та режимів подачі рідини на геометрію факела, дисперсність крапель і ефективність уловлювання пилу.

5. Любарець О.П., Микитенко М.Р., «Аналіз складових чинників, що впливають на стан знепилення аспіраційних викидів». Міжнародна науково-практична конференція «Екологія, ресурси, енергія», Київ, 23-25 листопада 2022 р.

Особистий внесок здобувача: проведено систематизацію основних факторів, що визначають ефективність процесів знепилення, та визначено їх вплив на продуктивність аспіраційних систем у промисловості.

6. Любарець О.П., Микитенко М.Р., «Дослідження ступеня очищення аспіраційних викидів ливарних та будівельних цехів, в пиловловлювачі з дисковим розпилювачем». II Міжнародна наукова конференція «Розвиток наук в умовах нової реальності: проблеми та перспективи» м. Київ, 3 травня 2024 р.

Особистий внесок здобувача: здійснено експериментальні вимірювання

ступеня очищення повітря у пиловловлювачах з дисковим розпилювачем при роботі з різними типами пилу з ливарних і будівельних виробництв.

7. Любарець О.П., Микитенко М.Р., «Аналіз впливу основних факторів на процес пиловловлення в пиловловлювачах з дисковими розпилювачами». Міжнародна науково-практична конференція «Екологія, ресурси, енергія», Київ, 27-29 листопада 2024 р.

Особистий внесок здобувача: встановлено вплив конструктивних параметрів розпилювачів та режимів подачі рідини на ефективність уловлювання дрібнодисперсного пилу, що дозволило сформулювати рекомендації для оптимізації роботи апаратів.

Додаток Б.

Акти впровадження результатів роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Керівник ПП «Чагівське»
Бурлака Н.Ю.
2025 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з наукової роботи та
інноваційного розвитку
Київського національного університету
будівництва і архітектури
Ковальчук О.Ю.
2025 р.

АКТ апробації результатів науково-дослідної роботи

Ми, що нижче підписалися, засвідчуємо, що в 2025 році представник ПП «Чагівське» ознайомився з результатами науково-дослідної роботи аспіранта Київського національного університету будівництва і архітектури Микитенко Максима Руслановича за темою:

«Підвищення ефективності очищення аспіраційних викидів підвищеної температури в пиловловлювачах циклонного типу з дисковими розпилювачами».

За результатами розгляду встановлено наступне:

- надана інформація є актуальною та потенційно придатною для адаптації до умов технологічного процесу виробництва молочної продукції;
- результати досліджень можуть бути враховані під час подальшого удосконалення систем вентиляції, очищення повітря та енергозбереження на підприємстві з урахуванням технологічних вимог підприємства;
- підприємство підтверджує доцільність розгляду питань щодо апробації зазначених технологічних підходів у перспективних планах реконструкції або модернізації об'єктів;
- рекомендовано здійснити попередню техніко-економічну оцінку можливостей інтеграції пропонованих рішень у реальні виробничі умови.

Науковий керівник к.т.н., доц.

PhD-аспірант КНУБА

О.П. Любарець
М.Р. Микитенко

О.П. Любарець

М.Р. Микитенко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Генеральний директор
ТОВ ІТЦ «ІВІК»

Машина П.В.

2025 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Проректор з наукової роботи та
інноваційного розвитку
Київського національного університету
будівництва і архітектури

Ковальчук О.Ю.

2025 р.

АКТ

апробації результатів науково-дослідної роботи

Ми, що нижче підписалися, засвідчуємо, що в 2025 році представник ТОВ «ІТЦ «ІВІК» ознайомився з результатами науково-дослідної роботи аспіранта Київського національного університету будівництва і архітектури Микитенко Максима Руслановича за темою:

«Підвищення ефективності очищення аспіраційних викидів підвищеної температури в пиловловлювачах циклонного типу з дисковими розпилювачами».

За результатами розгляду встановлено наступне:

- представлена науково-технічна інформація може бути корисною при розробці інженерних рішень з вентиляції та аспіраційних систем у промисловому та громадському будівництві;
- технічні пропозиції, викладені у дослідженні, можуть бути враховані в процесі проектування, адаптації та монтажу систем очищення повітря на об'єктах з підвищеним тепловим і пиловим навантаженням;
- ТОВ «ІТЦ «ІВІК» визнає доцільність подальшого аналізу можливостей інтеграції елементів запропонованих конструкцій у власні інженерні рішення;
- результати науково-дослідної роботи можуть бути використані як додаткове обґрунтування при розробці проектної документації, технічних умов та під час реалізації інноваційних вентиляційних систем.

Науковий керівник к.т.н., доц.

PhD-аспірант КНУБА

О.П. Любарець

М.Р. Микитенко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зам. генерального директора
ТОВ «БМК «ЕНЕРГОМОНТАЖВЕНТИЛЯЦІЯ»



Мельников І.В.

2025 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи та
інноваційного розвитку
Київського національного університету
будівництва і архітектури



Ковальчук О.Ю.

2025 р.

АКТ

апробації результатів науково-дослідної роботи

Ми, що нижче підписалися, засвідчуємо, що в 2025 році представник ТОВ «БМК «ЕНЕРГОМОНТАЖВЕНТИЛЯЦІЯ» ознайомився з результатами науково-дослідної роботи аспіранта Київського національного університету будівництва і архітектури Микитенко Максима Руслановича за темою:

«Підвищення ефективності очищення аспіраційних викидів підвищеної температури в пиловловлювачах циклонного типу з дисковими розпилювачами».

За результатами розгляду встановлено наступне:

- науково-практичні положення, отримані в дисертаційній роботі, становлять інтерес для впровадження в рамках проектування та монтажу інженерних систем очищення повітря, зокрема аспіраційних систем у промисловому будівництві;
- технічні рішення можуть бути адаптовані при реконструкції або модернізації об'єктів, де необхідне очищення запиленого чи високотемпературного повітря;
- ТОВ «БМК «ЕНЕРГОМОНТАЖВЕНТИЛЯЦІЯ» вважає за доцільне провести подальшу техніко-економічну оцінку можливостей апробації запропонованих технологічних рішень;
- результати роботи можуть бути рекомендовані до використання в розробці проєктної документації та як обґрунтування інженерних рішень у системах вентиляції та аспірації.

Науковий керівник к.т.н., доц.

PhD-аспірант КНУБА

О.П. Любарець

М.Р. Микитенко