

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

*Принятим звітним ідентичним
як зміст, так і змістом
Внешній секретар*



Хомин В.Р.

На правах рукопису

МАКАРЧУК ВІКТОР ГРИГОРОВИЧ

УДК 621.928.9

**УДОСКОНАЛЕННЯ ГАЗООЧИСНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ
ЗМЕНШЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ НЕОРГАНІЧНИМ ПИЛОМ**

Спеціальність 21.06.01

«Екологічна безпека»

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Батлук Вікторія Арсеніївна,
доктор технічних наук, професор

Львів – 2013

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ДЖЕРЕЛА ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ НЕОРГАНІЧНИМ ПРОМИСЛОВИМ ПИЛОМ ТА КЛАСИЧНІ СПОСОБИ ЙОГО СЕПАРАЦІЇ	16
1.1. Загальні положення	16
1.2. Захист атмосферного повітря і формування мікрокліматичних характеристик при виділенні неорганічного пилу	22
1.2.1. Піскоструминна обробка матеріалів.	24
1.2.2. Дробоструминна обробка матеріалів.	25
1.3. Аналіз існуючих конструкцій апаратів для сухої очистки повітря від неорганічного пилу	26
1.4. Аналіз вдосконалень при конструюванні корпуса пиловловлювача	38
1.5. Висновки до розділу 1	42
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ	43
2.1. Експериментальна установка для дослідження пиловловлювачів	43
2.2. Методика проведення досліджень	45
2.3. Методологія проведення експериментальних досліджень	46
2.4. Визначення ефективності пиловловлювачів	60
2.5. Визначення гідравлічного опору апарату	60
2.6. Висновки до розділу 2	61
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПИЛООЧИСТКИ З УРАХУВАННЯМ РУХУ ЧАСТИНОК У ПРИСТІННОМУ ШАРІ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЦИКЛОНУ	63
3.1. Динаміка руху частинок у внутрішній області стаціонарного	63

турбулентного потоку в циклоні	
3.2. Динаміка руху частинок у пристінній області стаціонарного турбулентного потоку	74
3.3. Висновки до розділу 3	86
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЦЕНТРОВО-ІНЕРЦІЙНИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ	88
4.1. Опис і дослідження еталонного відцентрово-інерційного апарату	88
4.2. Опис новостворених відцентрово-інерційних пиловловлювачів	89
4.3. Статистичне моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлення від конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача	114
4.4. Висновки до розділу 4	119
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОВІТРЯ ВІД ПИЛУ	120
5.1. Вдосконалення установок обезпилювання на ВАТ «Львівський локомотиворемонтний завод»	121
5.2. Оцінка впливу викидів забруднюючих речовин на стан забруднення атмосферного повітря	130
5.3. Економічне обґрунтування впровадження пиловловлювачів	132
5.4. Перспективи використання розроблених пиловловлювачів	137
5.4.1. Видобуток сланцевого газу	137
5.4.2. Рекультивація сміттєзвалища	140
5.5. Висновки до розділу 5	143
ВИСНОВКИ	145
ДОДАТОК А. Програма для чисельного розв'язку диференційного рівняння руху матеріальної точки при початкових умовах з використанням математичного пакету "MathCad 2001"	147
ДОДАТОК Б. Програма статистичного моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлювача від конструктивних	149

розмірів і режимів роботи пиловловлювача

ДОДАТОК В. Матриця планування експериментів і результати
обробки 158

ДОДАТОК Д. Акти впровадження і випробувань 168

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 173

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

Кут атаки	Кут між напрямком руху пилогазового потоку і площиною кожної жалюзі.
Медіанний діаметр	Розмір частинок, при якому маса всіх частинок в аналізованому порошку або пилу менше та більше δ_{50} складає 50%.
N, N_0	Біжуче і початкове значення розрахункової концентрації, г/м ³ .
$Z_n Z_b$	Початкова і вагова концентрація, г/м ³ .
m	Маса частинки, г.
d	Діаметр частинки, мкм.
d_e	Еквівалентний діаметр частинки, мкм.
Q_n	Загальний розхід повітря, м ³ /г.
τ	Час, сек.
$lg \delta_{cp}$	Середньоквадратичне відхилення в логарифмічно-нормальному розподіленню фракційної ефективності апарату.
R	Радіус апарату, м.
R_e	Число Рейнольдса.
ψ	Коефіцієнт опору середовища, який являється функцією числа Рейнольдса.
ξ	Коефіцієнт опору.
n	Жорсткість н/м - сила необхідна для деформації частинки на одиницю довжини.
F	Сила, яка діє на частинку, Н.
ΔP	Гідравлічний опір апарата, Па.
η	Ефективність пиловловлення, % .
γ	Питома вага повітря, мг/м ³ .
g	Прискорення сили тяжіння, м/с ² .
μ	Кінематична в'язкість.
$D_{ж.р}$	Діаметр жалюзійного відокремлювача , м.
K	Площа живого перерізу відокремлювача , м ²
h_1	Висота вхідного патрубку , м.
a, b	Відповідно. ширина і висота вхідного патрубку , м.

n	Число жалюзі відокремлювача.
f_0	Площа поперечного перерізу трубопроводу, м^2 .
D, H	Діаметр і висота циліндричної частини корпусу апарата, м.
D_1, H_1	Діаметр і висота циліндричної частини бункера, м
$G_{\text{п}}$	Вага пилю, який подається у вхідний патрубок за час досліду,
$G_{\text{вл}}$	Вага пилю, який вловився в пиловловлювачі, г.
W_r, W_{θ}	Відповідно, радіальна та тангенційна складові швидкості частинки відносно повітря, м/с.
V_r, V_{θ}	Радіальна та тангенційна швидкості, м/с
ρ_p, ρ_T, ρ_n	Густина рідни, твердої частинки, повітря, кг/м^3 .
ν	Турбулентна в'язкість, $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$.
$\Phi_1, \Phi_2.. \Phi_n$	Відношення вагової кількості частинок кожної фракції, що поступає в пиловловлювач до вагової кількості всього сипучого матеріалу, який поступає в апарат, %.
P	Вага пилю на фільтрі, г.
G_1	Вага фільтру після пропускання пилю через апарат, г.
G_2	Вага фільтру до проведення експериментів, г.
p	Коефіцієнт дисперсності пилю (визначається способом найменших квадратів по дисперсному складу пилю).
$G_{\text{вих}}$	Кількість пилю, яка виноситься разом з очищеним повітрям, г.
a_1, a_2	Процент пилю даної фракції, відповідно, вловленого і поступаючого пилю.
σ_R	Стандартне відхилення розміру частинок (%).
q_q	Дійсний розхід повітря через фільтр, м/с.
$q_{\text{розр}}$	Розрахунковий розхід повітря через фільтр, м/с
d_{OR}	Вміст по вазі частинок з діаметром більшим d (у відсотках до загального вмісту пилю в газі), %.
R	Лінійний розмір частинки, мкм.
η, γ	Коефіцієнти, відповідно, динамічної і об'ємної в'язкості.
d_c	Відстань між частинками, мм.
R_1	Радіус вихідного патрубку пилю, мм.
V_p	Швидкість проходження повітря через щілини між

	жалюзі відокремлювача , м/с.
$V_{вх}$	Швидкість входу пилоповітряного потоку в апарат, м/с.
$V_{вих}$	Швидкість виходу очищеного повітря .
W	Об'єм середовища, м ³ .
W_2	Об'єм середовища, м ³ .
p_0	Тиск середовища, Н/м ² .
ΔV	Швидкість руху частинок відносно середовища, м/с.
r, θ	Біжучі полярні координати.
F_r, F_θ	Відповідно, радіальна і тангенційна складові опору середовища.
P_1, P_ϕ	Перепад тисків до і після фільтру, Н/м ² .
ΔP	Перепад тисків до і після фільтру, Н/м ² .
x	Початкова координата.
ω	Кутова частота, Гц.
ω_Π	Поперекова складова швидкості хаотичного руху частинок, м/с.
Φ	Коефіцієнт захоплення частинок.
ε	Швидкість дисипації турбулентної енергії м ² /с ⁻³
m_χ	Маса частинки, кг.
$\bar{V}_{zt}$	Тангенціальна складова швидкості обертання потоку повітря, м/с.
R	Радіус обертання потоку, м.
$\bar{F}_c$	Сила Стокса, Н.
V_χ	Швидкість осадження частинки щодо газового середовища, м/с.
α	Кут між віссю у і радіусом вектором точки, в якій знаходиться частинка, градус.

ВСТУП

Актуальність теми. Надзвичайно важливим чинником, що істотно впливає на територіальну організацію усього соціально-економічного життя і ефективність виробництва, є екологічна обстановка, яка в останні десятиліття в Україні істотно погіршилася. Одним з основних чинників, що вплинули на екологічну обстановку, є розвиток промисловості при застарілих технологіях і пов'язана з цим надмірна урбанізація багатьох районів. Основоположні постулати концепції сталого розвитку людства ґрунтуються на розумінні тісного взаємозв'язку екологічних, економічних і соціальних проблем, що, в свою чергу, змушує до об'єднання наукових доробок провідних фахівців академічних інститутів, зокрема проблем ринку та економіко-екологічних досліджень. Та, з огляду на проблеми сьогодення, подібна задача є і вкрай необхідною і надважкою, оскільки:

по-перше, Україна на даному етапі свого розвитку перебуває в умовах важкопрогнозованого перебігу трансформаційних процесів та реформування економіки;

по-друге, первинні наукові підходи до розв'язання посталих проблем повинні враховувати як структурну різноплановість, так і багатогранність наукових прийомів, що, в свою чергу, гарантуватиме комплексний підхід до розв'язання складних еколого-економічних проблем у всіх сферах життя суспільства — від визначення методологічних засад забезпечення ефективної еколого-економічної політики держави до формування конкретних важелів та інструментів екологізації суспільного розвитку і раціонального природокористування на загальнодержавному, регіональному та секторальному рівнях.

Щоправда, і це підтверджується щоденно реальною дійсністю, їх втіленню у життя має передувати реформування національної екології на інноваційних засадах і внесення суттєвих коректив у систему еколого-економічної політики, що зумовлює необхідність радикальної перебудови адміністративно-

управлінського, економічного та техніко-технологічного базису розвитку країни на засадах екоіноваційного підходу.

Таким чином, йдеться не тільки й не стільки про новий напрямок в екологічній науці, але і про новий напрямок у загальній системі світосприйняття і осмислення новітніх проблем взаємодії людини й природи, визнання місця людини й суспільства в природі, їх збалансованого розвитку.

Техногенне навантаження в Україні характеризується виключно високим рівнем і різноманітністю впливу на навколишнє природне середовище. Має місце недостатність уваги з боку суб'єктів господарської діяльності до проблем техногенної та екологічної безпеки. Тому єдиним шляхом покращення стану техногенної та екологічної безпеки вбачається тотальна екологізація суспільства та удосконалення алгоритмів дій з ліквідації надзвичайних ситуацій з використанням міжнародних стандартів зі сфери управління, в першу чергу стандартів ISO 14001 та ISO 9000.

За останні 20 років від стихійних лих, техногенних аварій і надзвичайних ситуацій постраждало більше 1 млрд. людей, у тому числі 5 млн. загинуло, а спричинені матеріальні збитки обчислюються трильйонами доларів США.

В Україні щорічно виникає понад 60 тис. надзвичайних подій техногенного характеру, у яких гине й травмується понад 6 тис. осіб. При цьому державі наносяться збитки більше як на 1 млрд. гривень.

Свого часу, займаючи лише 2,7 % території колишнього СРСР, на якій проживало 18% населення, Україна виробляла понад 17% промислової та близько 22% сільськогосподарської продукції, що зумовило, в свою чергу, велику концентрацію техногенно-небезпечних підприємств різноманітних напрямків господарської діяльності на одиницю площі території.

Техногенне навантаження в Україні характеризується не тільки високим рівнем, але і різноманітністю впливу на навколишнє середовище. Промислове виробництво в Україні нараховує понад 1,8 тисяч хімічно небезпечних об'єктів, які зберігають, виробляють або використовують близько 300 тисяч тонн різних

шкідливих хімічних речовин, у тому числі понад – 9,0 тисяч тонн хлору, 200 тис. тонн аміаку та близько 100 тисяч тонн інших небезпечних хімічних речовин. В Україні діє понад 1,5 тисяч вибухо- та пожежонебезпечних об'єктів, де зосереджено понад 13 млн. тонн твердих і рідких вибухо- і пожежонебезпечних речовин.

У зонах можливого хімічного ураження цих об'єктів мешкає понад 17 млн. осіб, або 35 % населення країни. Більше 400 адміністративно-територіальних одиниць мають ступінь хімічної небезпеки, з яких понад 90 адміністративно-територіальних одиниць віднесено до I ступеня хімічної небезпеки (у зоні хімічного ураження знаходиться понад 50 % мешканців), більше 20 – до II ступеня хімічної небезпеки (від 30 до 50 % мешканців), більше 70 (від 10 до 30 % мешканців) - до III ступеня, 245 (до 10 % мешканців) - до IV ступеня.

Одночасно має місце ситуація, коли суб'єкти господарської діяльності створюють і розташовують свої технологічні комплекси у густонаселених місцях, не зважаючи на небезпеку, яку створюють ці підприємства.

Випадки загибелі людей та їх травмування під час аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру в Україні трапляються у 5-8 разів частіше, ніж в інших промислово розвинутих європейських країнах, що свідчить про серйозні недоліки та резерви розвитку державної системи забезпечення екологічної та техногенної безпеки.

І в цю низку проблем вагомий негативний внесок вносять підприємства, які викидають у навколишнє середовище колосальну кількість шкідливих речовин і пилу. Тому-то питання очистки повітря від пилу займає одне з головних завдань екологів всього світу. Основну роль у вирішенні цих проблем відводиться розробці високоефективних пиловловлювачів.

Таким чином, створення принципово нових апаратів сухого очищення повітря від пилу, які забезпечили б можливість високоефективного уловлювання полідисперсного пилу при зменшенні гідравлічного опору і розмірів установок, становить значний теоретичний і практичний інтерес.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідницької роботи кафедри “Охорона праці” Національного університету “Львівська політехніка” з проблеми “нові методи очистки повітря від пилу”. Основні положення дисертаційної роботи виконувались згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України “Нові напрямки очистки повітря від пилу (№ держреєстрації 0107U010240).

Мета і завдання дослідження – покращення екологічного стану атмосфери шляхом удосконалення пилоочисного устаткування для зменшення забруднення довкілля неорганічним пилом за рахунок підвищення ефективності і зменшення енерго- і металоємкості пиловловлювачів з урахуванням математичної моделі і аналізу пилоповітряних потоків у них.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз сучасного стану екологічної безпеки при забрудненні атмосфери неорганічним пилом, вивчити стан питання дослідження аеродинаміки закрученого двофазного потоку всередині відцентрових апаратів, які застосовуються для локалізації цих забруднень, та обґрунтувати обраний напрямок роботи;

- вивчити і встановити закономірності руху частинок в робочому об’ємі розробленого апарата під дією сил різної природи з наступним визначенням умов розділення гетерогенних систем і оцінкою сил опору в різних зонах переміщення пилоповітряної суміші;

- побудувати математичну модель системи «пиловловлювач – пилоповітряна суміш» і на цій основі встановити аналітичні залежності для оцінки опору пилоповітряної суміші на всіх ділянках їх руху;

- систематизувати та розробити конструктивні схеми принципово нових пиловловлювачів з багатоступеневою системою очистки;

- провести випробування розроблених пиловловлювачів на дослідному експериментальному стенді та у конкретних умовах виробництва з метою

оцінки ефективності розроблених апаратів, визначити основні характеристики процесу та провести співставлення теоретичних і експериментальних результатів, а також порівняти одержані результати з характеристиками пиловловлюючого апарату, вибраного в якості еталону;

– оцінити екологічну та економічну ефективність впроваджених у виробництво апаратів.

Об'єкт дослідження: процес виділення дрібнодисперсних аерозольних частинок неорганічного пилу, що утворюються в обробній промисловості, з потоку газу за допомогою пиловловлювачів із жалюзійним відокремлювачем.

Предмет дослідження: відцентрово-інерційне газоочисне устаткування.

Методи дослідження ґрунтуються на системному науково обґрунтованому аналізі теоретичних досліджень, моделюванні та прогнозуванні. При вирішенні поставлених задач використовувався аналіз науково-технічної інформації, методи статистичного аналізу, математичного та чисельного моделювання та експериментальний метод. При проведенні моніторингу використані методи: гідродинамічний - для визначення швидкостей, витрат потоків та втрат тиску; ваговий - для визначення ступеня очистки; дисперсний - для визначення складу пилу. Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків і результатів підтверджена коректним використанням сучасних методів математичної фізики, теорії імовірності при теоретичних дослідженнях і моделюванні динамічних процесів, значним об'ємом дослідних даних, отриманих у реальних умовах роботи обладнання; застосуванням сучасних засобів вимірювань і методів експериментальних досліджень; експериментальним підтвердженням моделей і методик розрахунків.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в створенні наукових основ проектування пиловловлювачів для аерозольних частинок неорганічного пилу, що базуються на вивченні закономірностей руху пилоповітряної суміші в закручених потоках, які мають місце в елементах конструкцій апаратів (прямолінійний і криволінійний потоки, потоки у вихоростоці, тощо) і математичних моделей процесу руйнування великомасштабних турбулентних

вихорів.

Основні наукові результати роботи полягають у наступному:

- вперше створена математична модель процесу руху частинок пилу в корпусі апарата та при проходженні через жалюзі відокремлювача; отримані залежності розрахунку сепараційної здатності відцентрово-інерційних пиловловлювачів, які, на відміну від інших, враховують геометричні параметри жалюзійного відокремлювача;

- вперше виконані і отримані основні залежності для оцінки гідравлічного опору в прямолінійних, криволінійних потоках, у вихростоці, плоскому вихорі тощо, що дало можливість визначити зони ефективного пиловловлення і механізм регулювання цих потоків;

- отримало подальший розвиток теоретичне пояснення залежності траєкторії руху пилоповітряної суміші від вхідних параметрів потоку і геометричних розмірів як самого пиловловлювача, так і жалюзійного відокремлювача;

- удосконалено теоретичне обґрунтування доцільності поєднання відцентрового та інерційного способів уловлення пилу в одному апараті.

Практичне значення результатів полягає у:

- конструюванні, дослідженні і впровадженні у виробництво принципово нових конструкцій жалюзійних відокремлювачів газоочисного устаткування, новизна яких підтверджена патентами України;

- визначенні основних геометричних розмірів апаратів, конструктивних розмірів жалюзійного відокремлювача і його положення в корпусі;

- отриманні методик розрахунку і оцінки ефективності систем пиловловлення, режимів роботи і критеріїв оптимального їх вибору;

- розробленні та впровадженні у виробництво установок для очистки повітря від пилу, який утворюється в інструментальному цеху ВАТ «Львівський локомотивний завод» (підтверджено актами випробування та впровадження), що дозволило значно знизити запиленість довкілля та покращити санітарно-гігієнічні умови праці.

Особистий внесок автора. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Особистий внесок здобувача у роботах, опублікованих у співавторстві, полягає у наступному: проведений аналіз джерел викидів пилу та його негативний вплив на навколишнє середовище і населення [1-11;22-24;34-35], спроектований експериментальний стенд і проведені експериментальні дослідження [1,3,9,23,34,36,37,54], проведена обробка і аналіз експериментальних даних, визначені морфометричні, фізико-хімічні і дисперсні характеристики пилу [3,24,35,38,40,42,44], прийняв участь у теоретичному аналізі класичних рівнянь і створенні математичної моделі процесу руху частинок в апараті [6,41,43,47,51,53], необхідної для розв'язку і конструювання відцентрово-інерційних пиловловлювачів; створив дослідні моделі апаратів [1,36,37,46,50], проведено комп'ютерне моделювання процесів, які досліджувалися [10,11,39,45,49,52], впровадив результати роботи у виробництво [9,34,38,47,49], в постановці завдання досліджень, аналізі і обговоренні отриманих результатів, формуванні мети та завдань дисертаційної роботи та безпосередній участі на всіх етапах її виконання від збору інформації до її опрацювання і застосування в проведених дослідженнях здобувач приймав участь спільно з науковим керівником.

У співавторських публікаціях особистий внесок автора дисертації є основним. У патентах на винаходи автору належить розробка загальних ідей і участь у формулюванні різноманітних ознак.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації обговорювалися на наступних міжнародних та українських конференціях: міжнародна науково-методична конференція «Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика» (Миколаїв; 2008р.), IX міжнародна конференція АС ПГЧ «Промислова гідравліка і пневматика» (Кременчук, 2008р.), міжнародна наукова конференція «Охорона праці та соціальний захист працівників» (Київ, 2008р.); Международная научно-техническая студенческая конференция. –

(Донецьк: ДонНТУ, 2008); 5 з'їзд радіобіологічного товариства України, (Ужгород, 2009 р.), The Problem of Highly Effective Cleaning of air from dust/Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power in Agriculture 11/ 2009, (Lublin, 2009p.); XI міжнародна науково-практична конференція з проблем видавничо-поліграфічної галузі, (Київ, 2010р;) XI міжнародна науково-методична конференція «Безпека життя і діяльності людини - освіта, наука, практика», (Львів, 2010р); Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power in Agriculture 12/ (2010, Lublin); Міжнародний науково-методичний семінар, (Італія, 2011 р.); XIII наукова конференція «Львівські хімічні читання» (Львів, 2011 р.); Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power in Agriculture 13 D/ (2011 Lublin); 3-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (ECOLOGY -2011). (Вінниця, 2011р); Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power in Agriculture 13 C/(2011, Lublin); III Міжнародна науково – практична конференція: Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (Херсон: 2011р.); XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці».(Черкаси, 2012р).

Публікації. За темою дисертаційної роботи надруковано 31 наукова праця, з них 23 статті у наукових фахових виданнях, затверджених переліком ВАК України, 5 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях та 2 патенти України.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел інформації. Загальний обсяг роботи складає 191 сторінку, з них 72 рисунків по тексту, 13 рисунків на 5 окремих сторінках, 20 таблиць по тексту, 4 додатки на 26 сторінках, списку використаних джерел інформації з 190 найменувань на 19 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ДЖЕРЕЛА ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ НЕОРГАНІЧНИМ ПРОМИСЛОВИМ ПИЛОМ ТА СПОСОБИ ЙОГО СЕПАРАЦІЇ

1.1. Загальні положення

Україна – одна з найбільших за територією, чисельністю населення та економічним потенціалом держав Європи, на території якої зосереджені величезні природні багатства, але суто колонізаторський підхід призвели не тільки до порушення, а й до руйнування природних ландшафтів. Сучасний екологічний стан України (надмірна концентрація екологічно небезпечних виробництв, застаріле та неефективне природоохоронне обладнання на завершальних стадіях технологічних ланцюгів, ненадійність технічних систем і недостатня кваліфікація кадрів на підприємствах підвищеного екологічного ризику тощо) визначає крайню актуальність постійної уваги щодо діяльності по забезпеченню екологічної безпеки країни.

За викидами шкідливих речовин у повітряний басейн та скидами забруднених вод у поверхневі води Львівська область належить до 10 найбільш забруднених областей України. Довкілля області у багатьох її районах, за даними санітарно-екологічних показників, є дуже забрудненим за багатьма факторами. Так, станом на 2009 – 2012 роки 42 % дорослого та 43% дитячого населення області мешкало в умовах, де сумарний рівень забруднення довкілля переважав середній показник по області на 71,2 % [39,56,71,72,159].

Загалом спостерігається тенденція до зростання екологічного ризику внаслідок збільшення у виробничих процесах частки застарілих технологій та обладнання, зниження темпів відновлення та модернізації виробництва. У середньому зношеність основних виробничих фондів усіх галузей господарства України становить близько 50 %, причому, темпи оновлення фондів не відповідають темпам їх спрацювання.

Основним забруднювачем атмосферного повітря в Україні є промисловість: вона видає майже, вдвічі більше шкідливих викидів, ніж автотранспорт (відповідно 65 і 35 %).

Зважаючи на те, що найбільша кількість викидів утворюється через спалювання природних видів палива, основним забруднювачем Львівської області є ВАТ "Добротвірська ТЕС", де в основному використовується вугілля ДП "Львіввугілля", зола якого не відповідає проектним вимогам. Існуючі енергоблоки ТЕС обладнані морально застарілим і фізично-зношеним пилогазоочисним обладнанням. Для покращення екологічної ситуації в районі розташування Добротвірської ТЕС, а також, щоб упорядкувати викиди забруднюючих речовин в атмосферу (золи, сірчистих сполук), першочергово необхідно вирішити питання щодо завершення будівництва і вводу в експлуатацію вискоефективних золовловлювачів з сірко-очищенням, будівництво яких призупинилось.

Серед стаціонарних джерел забруднення області найвищий відсоток припадає на підприємства теплоенергетичного комплексу (понад 60%). До речі, це загальнодержавна тенденція (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1. Динаміка викидів в атмосферне повітря, тис. т

Викиди в області	2010 рік	2011 рік	2012 рік
Загальна кількість викидів в атмосферне повітря	205,8	188,5	179,0
Від стаціонарних джерел забруднення	114,0	97,8	96,1
Від автотранспорту	91,2	90,7	82,9

Наявність у повітрі промислового пилу, продуктів згоряння, шкідливих та сильнодіючих отруйних речовин створює загрозу здоров'ю та життю людей, призводить до виникнення різних хвороб, у тому числі і хронічних, скорочує тривалість життя.

Промисловість представлена 7410 промисловими підприємствами, з яких 6 є екологічно небезпечні.

Проаналізуємо динаміку викидів в атмосферне повітря (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 Динаміка викидів в атмосферне повітря Львівської області

Показники	2009рік	2010рік	2011рік
1	2	3	4
Загальна кількість суб'єктів підприємницької діяльності, що здійснюють викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря, од.	2947	2991	2666
Загальна кількість суб'єктів підприємницької діяльності, поставлених на державний облік, од.	443	461	419
Загальна кількість суб'єктів підприємницької діяльності, що мають дозвіл на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря, од.	2947	2991	2666
Потенціальний обсяг викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел за суб'єктами підприємницької діяльності, поставленими на облік, од.	0,488	9,683	12,5
Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних та пересувних джерел, тис.т, у тому числі:	253,400	246,279	256,500
від стаціонарних джерел, тис.т	120,991	113,202	129,400
від пересувних джерел, тис.т	132,409	133,077	127,100
у тому числі від автомобільного транспорту, тис.т	127,246	127,918	122,300
Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних та пересувних джерел у розрахунку на км ² , т	11,607	11,281	11,800
Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних та пересувних джерел у розрахунку на одну особу, кг	99,300	96,500	100,900
Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел у розрахунку на км ² , т	5,542	5,185	5,900
Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел у розрахунку на одну особу, кг	47,400	44,400	50,900
Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від пересувних джерел у розрахунку на км ² , т	6,065	6,096	5,800

Найбільші середні і максимальні концентрації забруднюючих речовин (в кратності ГДК) в атмосферному повітрі Львова у вигляді суспендованих твердих частинок: ГДК (середньодобова) – 0,15; середня концентрація – 1,19; ГДК (максимально добова) – 0,5; максимальна з разових концентрацій – 0,57.

Динаміка викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря виглядає наступним чином (таблиця 1.2):

Таблиця 1.2 Динаміка викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря

Назва забруднюючих речовин	2009рік	2010рік	2011рік
Викиди забруднюючих речовин усього, тис.т, в тому числі від	253,400	246,279	256,500
1.Стаціонарних джерел:	120,991	113,202	129,400
метали та їх сполуки	0,043	0,035	0,0
стійкі органічні забруднювачі	0,012	0,002	0,0
речовини у вигляді суспендованих твердих частинок	13,177	10,900	11,700
2.Пересувних джерел	132,409	133,077	127,100
речовини у вигляді суспендованих твердих частинок	1,940	2,113	2,100
у тому числі від:	127,245	128,400	122,300
2.1. Автомобільного транспорту:			
речовини у вигляді суспендованих твердих частинок	1,775	1,900	2,000

Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря за видами економічної діяльності поділяються наступним чином (таблиця 1.3):

Таблиця 1.3 Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря за видами економічної діяльності

№з/п	Види економічної діяльності	Обсяги викидів по регіону	
		тис. т	у % до підсумку
1	2	3	4
1	Усі види економічної діяльності у тому числі:	129,4	100,0
1.1	Добувна промисловість	47,4	36,7
1.2	Переробна промисловість	8,7	6,7
1.3	Виробництво та розподіл електроенергії, газу та води	49,7	38,4
1.4	Будівництво	0,1	0,1
1.5	Діяльність транспорту та зв'язку	22,7	17,5
1.6	Інші	0,8	0,6

Сучасні масштаби екологічних змін створили реальну загрозу життю та здоров'ю громадян України.

Швидкість деградації довкілля України набула таких масштабів, що вийшла за межі швидкості біологічного пристосування живих організмів до середовища існування. Об'єктивні медичні дані свідчать про всезростаючий вплив екологічних чинників на фізичний потенціал нашого суспільства. У структурі загальної захворюваності населення все більшої питомої ваги набувають хвороби, які є наслідком техногенного забруднення довкілля, зокрема атмосферного повітря.

Між рівнями забруднення атмосферного повітря речовинами алергенної дії (пил) і показниками захворюваності населення України на бронхіальну астму виявлено прямий тісний кореляційний зв'язок.

Безпека людини та стан природного оточуючого її середовища - одна з найважливіших характеристик якості життя, науково-технічного та економічного розвитку держави. Розвиток науки і техніки, зумовлений потребами економіки, підвищуючи соціально-економічну безпеку суспільства, водночас призвів до появи небезпеки для здоров'я людини та навколишнього середовища.

За декілька останніх років у Львівській області сталося декілька серйозних техногенних аварій, які могли б привести при певних умовах до екологічних катастроф.

Ожидівська аварія. У 2007 році сталася транспортна аварія з надходженням у навколишнє середовище білого (жовтого) фосфору. Технічним висновком було встановлено факт понаднормового завантаження залізничних цистерн при відсутності на них клапанів стравлення понаднормового тиску викидів парів оксидів фосфору через сепаратори, тобто «порушення правил безпеки руху та експлуатації залізничного транспорту», що призвело до аварії та спричинило забруднення навколишнього природного середовища, що є порушенням законодавства

України з охорони навколишнього середовища (ст. 52 Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища»).

На ДП «Полісинтез» АТ «Органіка» сталася пожежа, яка виникла внаслідок згорання понад 150т ціанідовмісного пінополіуретану і в умовах швидкості вітру 2 м/с та дощу привела до розповсюдження димової хмари на відстань 500м при розмірі санітарно-захисної зони 100м.

Причиною цього екологічного лиха є недотримання вимог природоохоронного законодавства щодо наявності вискоєфективного повітряочисного обладнання у цеху готової продукції, яке було передбачене проектом створення промислового об'єкту, що призвело до зростання температури готової продукції та її самозаймання.

Як видно з наведених прикладів екологічних катастроф, для оточуючого середовища та здоров'я людини значну небезпеку становлять викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря, які значно погіршують екологічний стан довкілля, викликають передчасне зношення промислового обладнання та об'єктів житлово-комунального господарства, наносять шкоду здоров'ю людей. Так, у 2012 році середньорічна концентрація пилу (недиференційованого за складом) перевищувала норматив екологічної безпеки у 23 містах України [4-6, 14, 17, 46, 102-112].

Перевищення допустимих антропогенних навантажень на природне середовище, перевищення ГДК шкідливих речовин знижує рівень екологічної безпеки. В зв'язку з цим в останній час в усіх країнах світу все більшу увагу приділяють питанням боротьби з пиловиділенням при різноманітних технологічних процесах. Проблеми антропогенного впливу на природне довкілля України об'єктивно вимагають розробити наукові засади екологічної безпеки України, методологію забезпечення її реалізації. І одне з провідних місць у низці невирішених задач займає створення вискоєфективного пиловловлюючого обладнання.

1.2. Захист атмосферного повітря і формування мікрокліматичних характеристик при виділенні неорганічного пилу

Захист атмосферного повітря і формування мікрокліматичних характеристик в межах рекомендованих показників ГДК є одним з найважливіших завдань при проектуванні і реконструкції систем безпеки промислових об'єктів. Переважна більшість промислових підприємств нині працюють в режимі посиленого виробництва багато в чому залежного від сезонності робіт і вимог замовника. Минулі економічні реформи поставили переважну більшість підприємств в умови виживання і вимагали максимального режиму економії, у тому числі на захисному і очисному устаткуванні. В деяких випадках очевидна картина фізичного зношення матеріальної частини очисного устаткування, в інших – використання кустарних саморобних конструкцій, які мало відповідають сучасним вимогам, що пред'являються до якості газоповітряної суміші. При цьому відбувається розширення виробництва усупереч нормативам, які рекомендовані ДЕСТ. Дана ситуації характерна і для виробничого об'єкту, що розглядається нами, - ПАТ «Львівський локомотиворемонтний завод». У наш час виробництво було збільшено, що привело до необхідності реконструкції вентиляційної системи цього промислового підприємства.

Інженерні системи, які видаляють від технологічного устаткування відходи виробництва у вигляді газів і пилововітряних сумішей, які подають їх до газоочисних і пиловловлюючих пристроїв і здійснюють їх очищення, є газоочисними і пиловловлюючими спорудами у складі промислових підприємств.

Проектування і експлуатація пиловловлюючих споруд або аспіраційних систем в промисловості зводиться до рішення завдань ефективного і надійного знепилювання повітря в робочій зоні виробничих приміщень і охорони атмосферного повітря від забруднення пиловими викидами з мінімальними капітальними і експлуатаційними витратами.

Переважна більшість механічних цехів, як основного, так і допоміжного призначення сьогодні відчують недостачу в системах очищення атмосферного повітря робочої зони, а також газоповітряній суміші, що викидається. В багатьох випадках використовується устаткування, яке не призначене для використання в металообробці, або самостійно зібрана система, що створює ризик аварійної ситуації, знижує ефективність очищення і сприяє зносу робочих машин.

При усій комплексності рішення існуючих проблем, очевидним залишається те, що нині єдиною можливістю виходом із ситуації, що склалася, є вдосконалення системи очищення відпрацьованої газоповітряної суміші. Виникає необхідність в створенні відносно дешевої, не складної конструкції вентиляційної системи, основними вимогами до якої є: надійність, універсальність (використання стандартних вузлів і елементів конструкції), елементарність.

Виходячи з вищевикладеного, ми визначили наступні мету і завдання даної роботи:

мета - спроектувати і розрахувати основні конструкційні вузли системи вентиляції металообробних (механічних) цехів на прикладі механічного цеху підприємства ПАТ "Львівський локомотиворемонтний завод".

Завдання:

- підібрати і розрахувати повітряочисне устаткування;
- відповідно до отриманих даних підібрати вентилятор і електродвигун.

В механічних цехах підприємства проводиться очищення поверхні локомотивів. Поверхня виробів і деталей, що покриваються захисним шаром, заздалегідь очищається від іржі, окалини та інших забруднень.

Очищення виконується в піскоструминних і дробеметних камерах, на обдирно-шліфувальних верстатах за допомогою корундових і карборундових кругів, а також в галтувальних барабанах, що обертаються, або дзвонах, в які завантажуються вироби, що очищаються, пісок або наждак. Тонке очищення поверхні металу досягається на полірувальних верстатах з повстяними,

фетровими і тканинними кругами, які покриваються спеціальною пастою, а також на крацовочних верстатах, обладнаних щітками з волосся або м'якого дроту.

При таких сухих способах очищення поверхонь металів виділяється неорганічний пил. Найбільш досконалим способом локалізації цього пилу є укриття, але облаштування його не завжди можливо за умовами технологічного процесу. Відтак, самостійні витяжні системи повинні проектуватися для піскоструминних і дробеметних камер і полірувальних верстатів, обладнаних повстяними або тканинними кругами.

Очищення повітря від дробеметних і піскоструминних камер може бути одноступеневе - в тканинних рукавних фільтрах з попередніми камерами або циклонами і двоступеневе - спочатку в сухому циклоні, а потім у циклоні із плівкою, яка зрошується. Припливне повітря в піскоструминні та шліфувально-полірувальні відділення подається у кількості 80-90% від об'єму витягу. Решта 20-10% повинні поступати в коридори, які примикають. У відділеннях із заповненими процесами випуск повітря здійснюється у верхній зоні приміщень із швидкістю 2-3 м/сек.

У даний час існує чимала кількість різних технологій очищення поверхні матеріалів. Кожна з них має як певні переваги, так і недоліки. При застосуванні багатьох технологій очищення досить гостро постає питання екологічності процесу та утилізації відходів, що виникають при цьому. Очищення проводиться хімічним, механічним, гідравлічним та іншими способами. До механічних відносяться: піскоструменевий, дробепіскоструменевий, дробеметний, гідроабразивний, абразивний, також іглофрезерний метод.

1.2.1. Піскоструминна обробка матеріалів. Технологія піскоструминного очищення (піскоструй) полягає у наступному: пісок подається до піскоструминного сопла, в якому відбувається розгін частинок і подальше викидання їх на поверхню, яка очищається. При піскоструминній обробці абразивні частинки прискорюються з піскоструйного апарату за

допомогою енергії стисненого повітря. Система піскоструйної очистки складається з трьох основних компонентів: компресор, піскоструминний апарат і абразив. Компресор повинен створювати достатній тиск об'єму повітря для того, щоб перемістити абразив з абразивноструминного апарата на оброблювану поверхню. Абразивний порошок засипається в апарат і за допомогою дозуючого клапана подається в повітряний потік, на шляху якого не повинно бути перешкод. Бажаний результат обробки поверхні досягається регулюванням стисненого повітря, що впливає на абразив. Піскоструминне очищення безпосередньо залежить від того, наскільки ефективно повітря рухається з компресора на поверхню, що очищається. Роль піскоструйного апарату полягає в тому, щоб рівномірно дозувати абразив в повітряний потік.

При піскоструйній обробці поверхні слід ретельно підбирати абразив для того, щоб забезпечити найкращий результат за швидкістю піскоструминного очищення і економічним результатом.

Нині правильніше було б називати піскоструминне устаткування абразивноструминним, але не зраджуватимемо традиціям. Вдаючись до історії можна сказати, що сама назва "Піскоструминне устаткування" є похідна від слово пісок. Спочатку абразивноструминне очищення здійснювалося тільки за допомогою піску, проте опісля були розроблені різні абразиви.

Найпростішим інструментом, з представленого на ринку піскоструминного устаткування, є піскоструминний пістолет. Найбільш складним і технологічним піскоструминним устаткуванням є піскоструминна камера або камера струминного очищення.

1.2.2 Дробоструминна (дробометна) обробка матеріалів.

Дробоструминна обробка - по суті те ж саме, що і піскоструминна обробка, тільки як абразивний матеріал використовується металевий дріб. Дробини можуть бути цілими, коленими, ідеальної сферичної форми або плескатої і такої, що має спеціальні ввігнуті сегменти. Для роботи дробом можна використати стандартну піскоструминну установку із затвором шибєрного типу, проте в реальності вона не призначена для роботи дробом і можуть

виникнути проблеми з регулюванням подання дробу. Тому необхідно використовувати установку із спеціальним дозатором для дробу, замість стандартного затвора шиберного типу. Така абразивоструминна установка призначена конкретно для роботи з дробом. Також для дробеструминної обробки використовуються дробомети. Вони не споживають стисле повітря на відміну від дробеструминної установки. Дробомет є обладнанням циліндричної форми, на колі якого закріплені лопасті. Дріб подається на лопасті, що обертаються на великій швидкості, і викидається на величезній швидкості у напрямку поверхні, що обробляється. Дробомети встановлюються стаціонарно на території підприємства, проте, в порівнянні з дробеструминним обладнанням, використовуються дуже рідко.

Для обробки поверхні деталей в дробометних установках застосовується дріб з вибіленого чавуну або сталевий дріб діаметром від 0,4 до 2 мм. Сталевий дріб має високу стійкість; витрата його в 30 разів менша, ніж чавунною. Витрати на обробку сталевим дробом в порівнянні з чавунним в 8-10 разів менше, незважаючи на більш високу вартість сталевого дробу.

1.3. Аналіз існуючих конструкцій апаратів для сухої очистки повітря від неорганічного пилу

Пилоутворення найчастіше має місце не тільки в металообробці, але й при механічному розмеленні твердих матеріалів, при пересипанні та транспортуванні сипучих матеріалів, в хіміко-термічних процесах (конверторне литво сталі, міді та інших матеріалів, процеси в доменних печах, в печах для обпалення колчедану), в результаті фізичних процесів, наприклад, конденсації парів з отриманням рідких або твердих дисперсних продуктів (туман смол, пил кольорових металів - олова, цинку, сурми, свинцю та ін. в кольоровій металургії), при виробництві будівельних матеріалів, мінеральних добрив.

П'ята частина шкідливих речовин, що викидається зі стаціонарних джерел, потрапляє в атмосферне повітря. Тому однією із основних проблем

при вдосконаленні виробничих процесів є повне усунення або максимальне зменшення пиловиділення.

Ми розглянемо конструкції апаратів, які використовуються при очищенні поверхонь на піско- і дробоструминному устаткуванні, де на даний час особливо гостро стоїть проблема уловлювання дрібнодисперсного пилу, який завдяки малій густині чи щільності розсіюється та пересувається на великій відстані потоками атмосферного повітря.

Суттєві підвищення вимог до систем очистки неминуче призводить до ускладнення їх структури та різкого збільшення комплектуючих апаратів. Складність апаратури різного призначення за кількістю комплектуючих пристроїв зростає в останні роки в середньому в 2-3 рази. Така тенденція зберігається і в останній час та об'єктивно характеризує процес розвитку екологічної науки взагалі і апаратів очистки повітря від пилу зокрема.

Виникло протиріччя: з одного боку - суттєво мають бути підвищені потенційні можливості систем очистки, з іншого боку - зросли труднощі в реалізації цих можливостей внаслідок експлуатаційних можливостей апаратури.

Ускладнення систем пилоочистки при одночасному підвищенні вимог щодо ефективності їх роботи вимагає прийняття певних заходів щодо розробки високоефективних апаратів пиловловлення [22-24,34-37,131-134].

Вибір того чи іншого типу пиловловлювача – доволі складна задача, яка визначається фізико-хімічними властивостями пилоповітряної суміші, необхідними продуктивністю, ефективністю пиловловлення, економічністю процесу. Найбільш широке застосування знайшли апарати сухого знепилювання. Мокрі пиловловлювачі більш ефективні, ніж сухі, але при їх використанні виникає нова проблема – очистка забруднених стоків, тому їх використовують у тих випадках, коли інші методи малоефективні.

Відомі на сьогодні методи пиловловлення поділяють на дві групи: газодинамічні та електричні. До газодинамічних методів відносяться

гравітаційні, інерційні, відцентрові, фільтраційні та струйні, до електричних – електрофільтраційні, електромагнітні та акустичні [23,34,57,62,74,76,126].

Розвиток та вдосконалення сучасних установок для очищення повітря від пилу проходить в напрямку створення складних гігантів очисних споруд, до яких у певній кількості й послідовності входять апарати як “сухого”, так і “мокрого” очищення, а також електричні апарати.

В основі роботи “сухих” апаратів лежать гравітаційні, інерційні та відцентрові механізми. В “мокрих” пиловловлювачах відбувається контакт запиленних газів з рідиною, при цьому осадження проходить на краплини, на поверхню газових бульбашок або на плівку рідини. В електрофільтрах відокремлення заряджених частинок – аерозія – проходить на осаджуючих електродах.

У цій роботі ми зупинимося на “сухих” методах пиловловлення, вибір яких залежить від дисперсного складу пилу (таблиця 1.4) [67,73].

Таблиця 1.4 Вибір апарату для вловлення аерозолів в залежності від дисперсного складу пилу

Розмір частинок, 10^{-6} м	Апарати
40 - 1000	Пилоосаджуючі камери
20 - 1000	Циклони діаметром 1 – 2 м
5 - 1000	Циклони діаметром до 1 м
20 - 100	Скрубери
0,9 - 100	Тканинні фільтри
0,05 - 100	Волокнисті фільтри
0,01 - 10	Електрофільтри

Розглянемо найбільш поширені з них.

У залежності від вимог, які пред’являються до очистки газів, якостей пилу і його дисперсного складу, циклони можуть застосовуватися як апарати одного зі ступенів очистки (частіше першої), або в сполученні з іншими пиловловлювачами. Вони ефективно вловлюють зважені частинки пилу діаметром $5 \cdot 10^{-6}$ м і більше. Чим менший діаметр циклону, тим дрібніші частинки можуть бути в ньому вловлені. Чим крупніші частинки, зважені в

газі, і чим інтенсивніше (до певних меж) обертання потоку, тим ефективніше очищуються гази. Частинки малого розміру можуть бути захоплені і винесені з апарату навіть потоками, які мають невелику швидкість. У герметично закритому бункері циклона створюється більше розрідження, ніж на виході з циклону, тому навіть при невеликому підсосі в бункері потік повітря захоплює пил і виносить його з апарату, а це різко знижує ступінь очистки. Допустима початкова запиленість газів, які очищаються в циклонах, залежить від якостей пилогазового потоку, а також вибраного розміру циклона. В середньому вона не повинна перевищувати $0,4 \text{ кг/м}^3$.

У гравітаційних пиловловлювачах відбувається осадження частинок пилу під дією сил тяжіння (рисунок 1.1.) [8,10,41,42,74,78,138,140,144].

У горизонтальному апараті (рисунок 1.1,а) потік пилогазової суміші рухається по осі апарата, а частинки пилу, що виділяються з нього, осідають. У вертикальних апаратах (рисунок 1.1,б) пилогазовий потік підіймається вгору, а пил, що виділився з нього під дією сили тяжіння, опускається вниз і збирається у бункері, очищений газ виходить через патрубок, який розташований у верхній частині апарату.

У технологічних процесах розділення пилогазових сумішей через низьку ефективність виділення дрібнодисперсних фракцій і великі розміри апаратів, гравітаційна сепарація застосовується тільки спільно з іншими методами [142,144].

Інерційні пиловловлювачі поділяють на прості інерційні пиловловлювачі, жалюзійні, циклони, вихрові, пиловловлювачі зі зустрічними закрученими потоками (ЗЗП) та ротаційні [104,105,109-118,149-156,166,169-176].

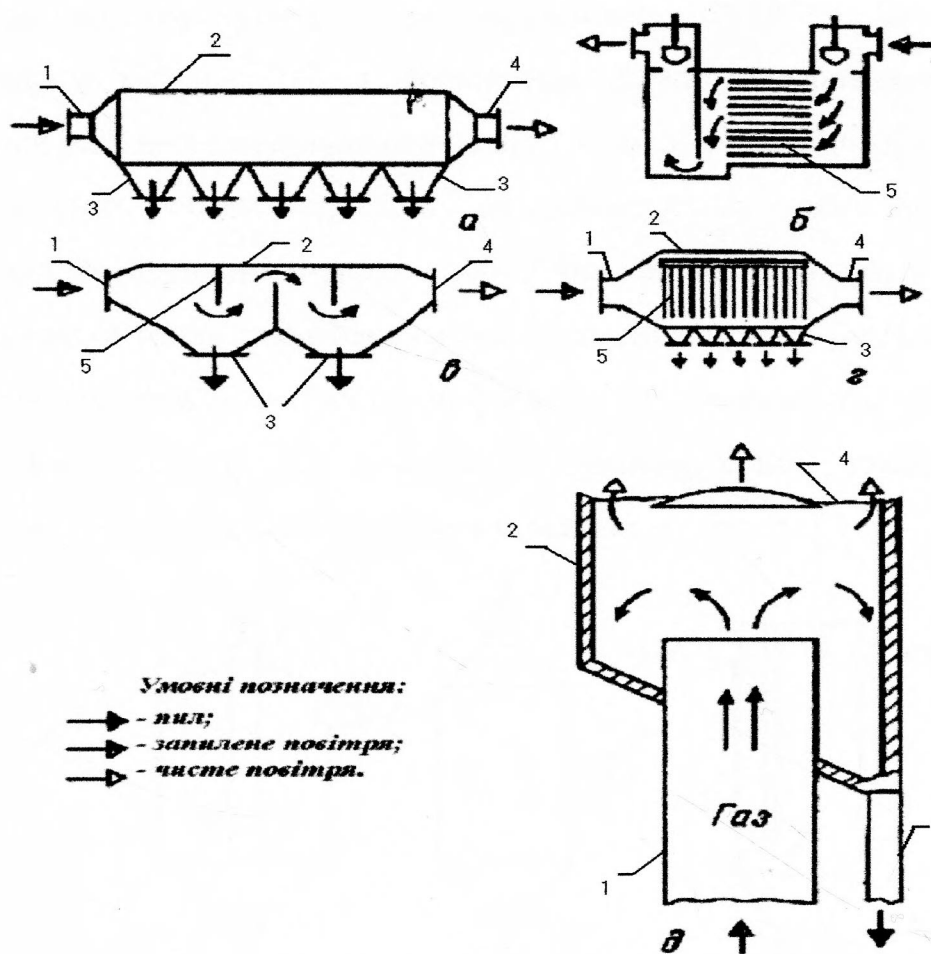


Рисунок 1.1- Пилоосаджувальні камери: а – пилоосаджувальна горизонтальна камера; б – камера з горизонтальними полицями; в – камера з перегородками; г – камера з завісами у вигляді ланцюгів; д – вертикальна камера; 1 – вхідний патрубок; 2 - корпус; 3 – патрубки виходу пилу; 4 – вихідний патрубок; 5 - перегородки.

Принцип роботи інерційних пиловловлювачів побудований на тому, що при різкій зміні напрямку руху пилогазового потоку частинки пилу, густина яких приблизно на три порядки більша густини газу, продовжуючи по інерції рух в попередньому напрямку, відокремлюються від газу, відкидаються від перегородки та попадають в бункер для пилу, а очищений газовий потік виходить з пиловловлювача через патрубок виходу очищеного повітря 3 (рисунок 1.2). Ці пиловловлювачі відрізняються відносно великими розмірами, тому що для повного осадження пилу швидкість руху газу в них повинна бути невеликою (не більше 3 м/с) [103,176]. Вони використовуються для попереднього грубого очищення запилених потоків, тобто для вловлення

відносно великих частинок розміром, приблизно, $100 \cdot 10^{-6}$ м. Для частинок пилу розміром $(25-30) \cdot 10^{-6}$ м досягається межа уловлювання 65-80%. Гідравлічний опір цих пиловловлювачів від 150 до 390 Па [43,45,46,53,136].

Ефективність роботи інерційних пиловловлювачів прямо пропорційно залежить від їх аеродинамічного опору: чим більше поворотів, пластин, кишень, кутників тощо, тим ефективніше проходить процес розділення і тим вищим є опір апарата. Ефективність інерційних пиловловлювачів знаходиться на рівні гравітаційних, але розміри їх значно менші завдяки заміні гравітаційного осадження на інерційне з більшою швидкістю.

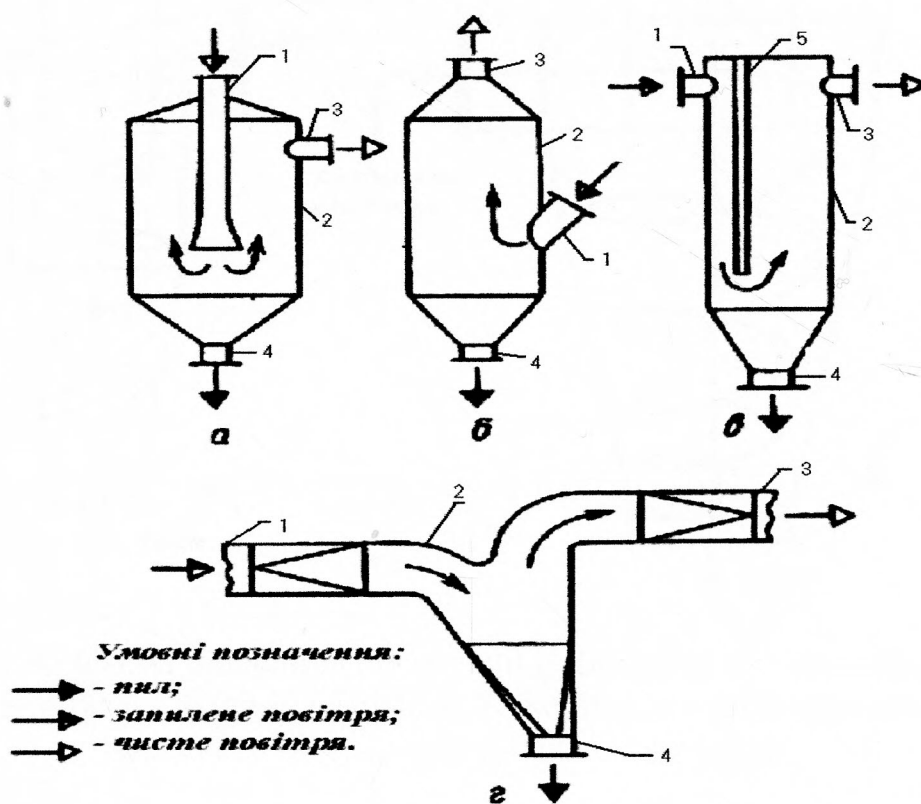


Рисунок 1.2 - Інерційні пиловловлювачі: а – з центральним підведенням запиленого повітря; б – з боковим підведенням запиленого повітря; в – з відбиваючою перегородкою; г – з поворотом газового потоку; 1 – вхідний патрубок; 2 - корпус; 3 – патрубок виходу очищеного газу; 4 – патрубок виходу пилу; 5 - перегородка.

Відцентрові апарати. З пиловловлювачів відцентрової дії найбільш широке використання отримали циклони, що пояснюється простотою їх конструкції та більш високою ніж в інших пиловловлювачах ефективністю

очистки повітря від пилу. Виділення пилу відбувається у відцентровому полі, яке створюється потоком, що рухається по спіралі.

Циклони поділяють на циліндричні і конічні. В циліндричних циклонах корпус виконаний з подовженою циліндричною частиною, а в конічних – з подовженою конічною частиною (рисунок 1.3) [61,67,145].

Циліндричні циклони відрізняються високою продуктивністю, конічні – високою ефективністю очищення, але в останніх - великі втрати тиску.

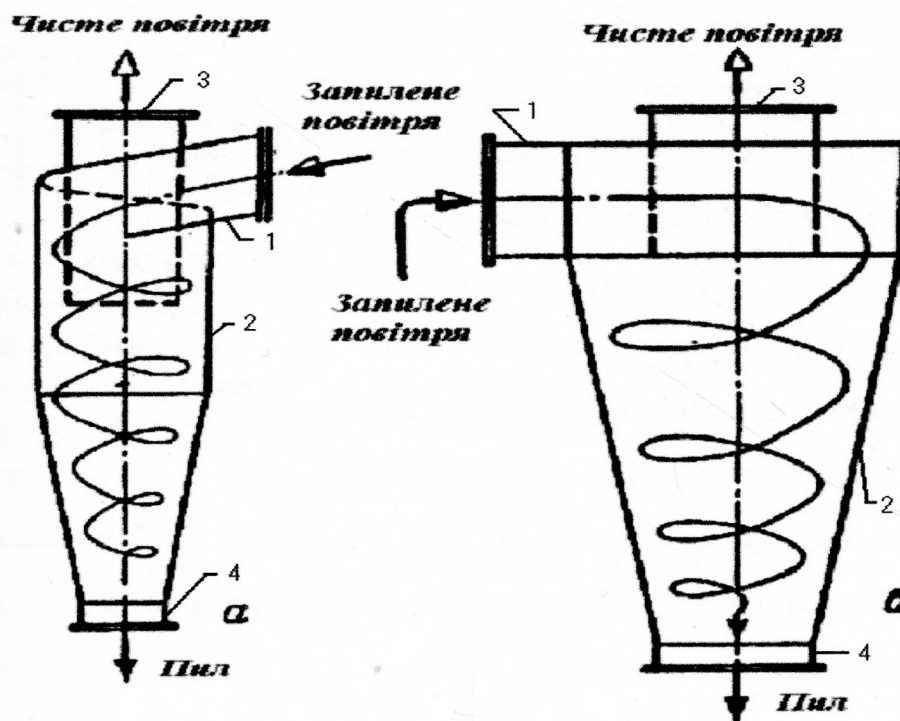


Рисунок 1.3 - Схема циклонів конструкції НДІОГАЗа: а – циліндричний; б – конічний; 1 – вхідний патрубок; 2 - корпус; 3 – патрубок виходу очищеного газу; 4 – патрубок виходу пилу.

У конічних циклонів по мірі звуження корпуса пилогазовий потік закручується більш інтенсивно, внаслідок чого сепарація частинок до стінок апарата збільшується. Експериментально доведено, що діаметр циліндричного циклона не повинен перевищувати 2м, а конічного - 3м, у протилежному випадку – суттєво падає ефективність пиловловлювання [75-77].

На багатьох виробництвах знайшов застосування циклон з корпусом у вигляді конуса, що розширюється донизу, конструкції ВЦНДІОП (рисунок 1.4).

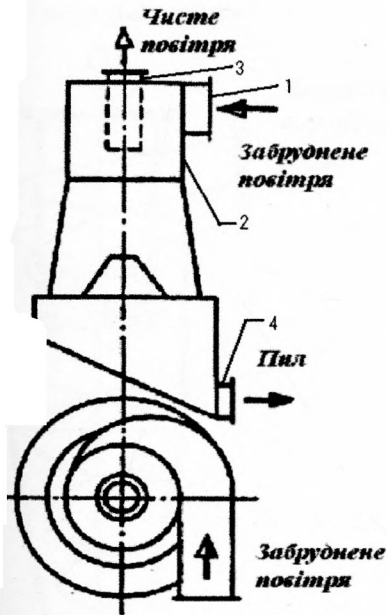


Рисунок 1.4 - Схема циклона конструкції ВЦНДІОП.

1 – вхідний патрубок; 2 – корпус; 3 – патрубок виходу очищеного газу; 4 – патрубок виходу пилу.

У цьому циклоні пилогазовий потік через кільцеву щілину між нижнім конусом та стінкою апарата попадає в пиловий бункер, а потік повітря повертається з бункера в сепараційний простір циклона через отвір нижнього конуса. Внаслідок розширення в ньому корпусу, закручення газу та тиск частинок пилу на стінку апарата зменшуються, тому такий циклон можна використовувати для уловлювання пилу з підвищеною абразивністю або пилу, схильного до стирання.

До основних переваг циклонів треба віднести [87,91]: відсутність рухомих частин в апараті; надійність в роботі при

температурах газу до 500°C (для роботи при більш високих температурах циклони виготовляють із спеціальних матеріалів); можливість уловлювання абразивних матеріалів при захисті внутрішньої поверхні циклонів спеціальним покриттям; уловлювання пилу в сухому вигляді; майже постійний гідравлічний опір апарата; успішна робота при високих тисках газів; простота виготовлення; збереження високої фракційної ефективності очистки при збільшенні запиленості газу.

До основних недоліків циклонів треба віднести : недостатньо високе уловлювання частинок розміром менше за $5 \cdot 10^{-6}\text{м}$; неможливість використання для очистки газів від липкого забруднення.

Відцентрово-інерційні пиловловлювачі. Процес очищення повітря у відцентрово-інерційних пиловловлювачів (рисунок 1.5) [113] відбувається наступним чином.

Чисте повітря

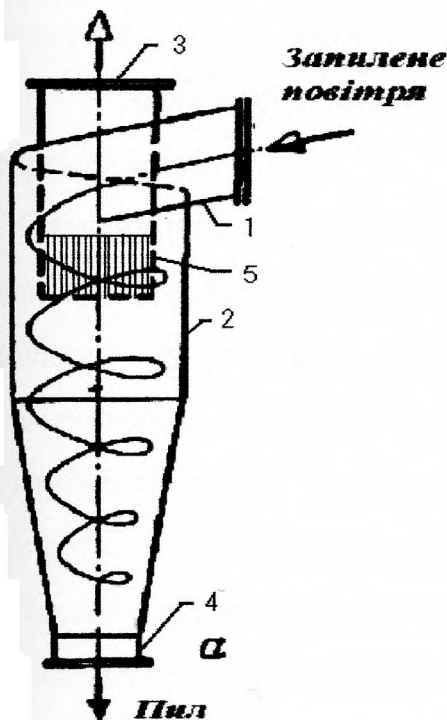


Рисунок 1.5 - Схема відцентрово-інерційного пиловловлювача:

1 – вхідний патрубок; 2 – корпус;
3 – патрубок виходу очищеного газу;
4 – патрубок виходу пилу;
5 – жалюзійна решітка.

Пилоповітряна суміш тангенційно поступає в корпус апарата через вхідний патрубок. На вході в апарат пилоповітряна суміш рухається прямолінійно, запиленість газового потоку по розрізу апарату залишається практично рівномірною, і швидкість руху частинок пилу дорівнює швидкості входу газового потоку в апарат. На наступному етапі руху донизу під дією відцентрової сили тверді частинки відкидаються до зовнішньої стінки апарата.

Цьому процесу концентрації частинок пилу в периферійній зоні корпусу перешкоджає явище рикошетування частинок в результаті їх удару в стінку.

Відскакування частинок проявляється тим ефективніше, чим більша початкова швидкість газу і відповідно швидкість пилових частинок, які транспортуються цим газом. Чим більша швидкість частинки, тим більший обертовий момент, який прикладений з боку газу до частинки, що в результаті призводить до зіткнення зі стінкою апарату. Внаслідок цього при великій швидкості потоку збільшується початкова швидкість обертання частинки, її підймальна сила і величина її радіального переміщення під впливом цієї сили. Цей ефект проявляється головним чином на великих частинках. Але в результаті зіткнення частинок пилу рух окремих відбитих від стінки частинок амортизується частинками, які рухаються до стінки. Зіткнення частинок відбувається не тільки біля стінки апарата, але і в усьому потоці. Таким чином, на цій ділянці проходить первинний пошаровий розподіл потоку. В результаті, при вході на наступну ділянку ми отримуємо

потік, в якому відбулося пошарове розділення суміші, причому найбільш забрудненим шаром, який несе найбільші частинки, є шар біля зовнішньої стінки, а найбільш чистим - шар, який протікає вздовж жалюзійного відокремлювача.

На ділянці розташування жалюзійного відокремлювача на частинки пилу продовжує діяти відцентрова сила, яка намагається відкинути їх до зовнішньої стінки корпусу апарату, але її вплив ослаблений через наявність радіального руху потоку до центра апарату через жалюзі, і передусім впливає на найбільш дрібні частинки і на частинки пилу, що рухаються з внутрішньою частиною потоку.

Залежно від того, яка сила перемагає, відцентрова чи радіальна, частинки пилу або будуть продовжувати рухатися по обертовій гвинтовій траєкторії вздовж корпусу апарата зверху вниз, або захоплені радіальним стоком рухатимуться до центра апарату. Шари пилоповітряної суміші, які підходять до жалюзійного відокремлювача, завдяки конструкції жалюзі обходять її з дуже малим кутом атаки (кутом між напрямком руху повітря і площиною кожної жалюзі). Тверді частини пилу, захоплені радіальною течією потоку, вдаряються в жалюзі відокремлювача, відбиваються від неї, підхоплюються рухомим потоком, вдаряються в наступну жалюзі і т.д. аж доки не потраплять в потік, який рухається вздовж зовнішньої стінки і транспортує їх до виходу з апарату в бункер [111,112].

Відцентрово-інерційні апарати здатні більш ефективно ніж циклони вловлювати дрібнодисперсний пил, маючи при цьому менші енерго- та металоємності.

До недоліків цих пиловловлювачів слід віднести необхідність підбору типу жалюзійного відокремлювача в залежності від виду пилу та технологічних режимів роботи установки.

Вихрові пиловловлювачі були розроблені значно пізніше циклонів та відрізняються від останніх наявністю в апараті двох зустрічних закручених в осьовому напрямку потоків – нижнього (первинного) та верхнього (вторинного). Варіанти конструкцій вихрових пиловловлювачів наведені на рисунку 1.6 [109,110].

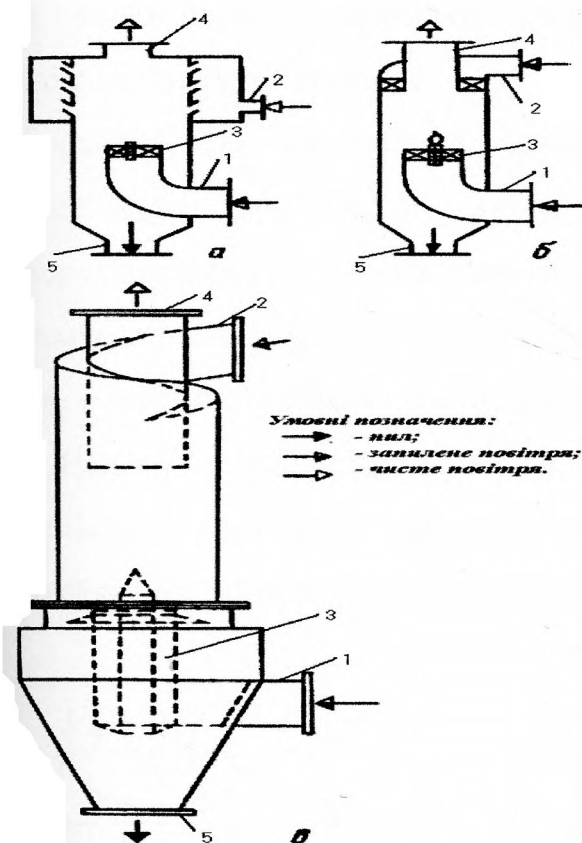


Рисунок 1.6 - Циліндричні вихрові пиловловлювачі: а – з сопловим вводом верхнього пилоповітряного потоку; б – з лопаточним вводом верхнього і нижнього пилоповітряних потоків; в – з тангенційним вводом верхнього і нижнього пилоповітряних потоків; 1, 2 – вхідні патрубки первинного та вторинного газу; 3 – завихрювач; 4 – патрубок виходу очищеного повітря; 5 – патрубок виходу пилу.

повітря загального об'єму повітря, яке проходить через апарат (у випадку використання атмосферного повітря); велика складність апарату в експлуатації [135].

Для вловлення дрібнодисперсного пилу енергетично доцільно при великих витратах повітря включення вихрового пиловловлювача в систему пилоочищення, при якій запилене повітря подають по обох каналах [136,138].

Ротаційні пиловловлювачі. В ротаційних або динамічних пиловловлювачах на частинки пилу діють відцентрові сили та сили Коріоліса, які виникають при обертанні робочого колеса ротора, який замінює пристрій

До основних переваг вихрових пиловловлювачів треба віднести: більш інтенсивну, ніж у циклонів, сепарацію частинок по всій висоті, більш ефективне уловлювання дрібнодисперсного пилу (меншого за $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$), широкий діапазон навантажень по газу та дисперсній фазі, відсутність абразивного зношення внутрішньої поверхні апарата, можливість очистки газів з високою температурою за рахунок використання холодного додаткового повітря, можливість регулювання процесу сепарації пилу за рахунок зміни кількості додаткового повітря [87].

До основних недоліків вихрових пиловловлювачів треба віднести: збільшення за рахунок додаткового

для подачі повітря. Загальні закономірності пиловловлення в вихрових пиловловлювачах присутні і в ротаційних пиловловлювачах. Їх можна використовувати на першій ступені очищення повітря, а також для уловлювання волокнистого пилю [14]. Ротаційні пиловловлювачі, які використовуються в промисловості, можна поділити на дві основні групи: пиловловлювачі із гвинтовим корпусом (рисунок 1.7) та пиловловлювачі з перфорованим барабаном, що обертається (рисунок 1.8) [112].

Недолік ротаційних пиловловлювачів – їх висока енергоємність, але внаслідок поєднання функції безпосередньо пиловловлювачів та вентиляторів, вони відрізняються компактністю.

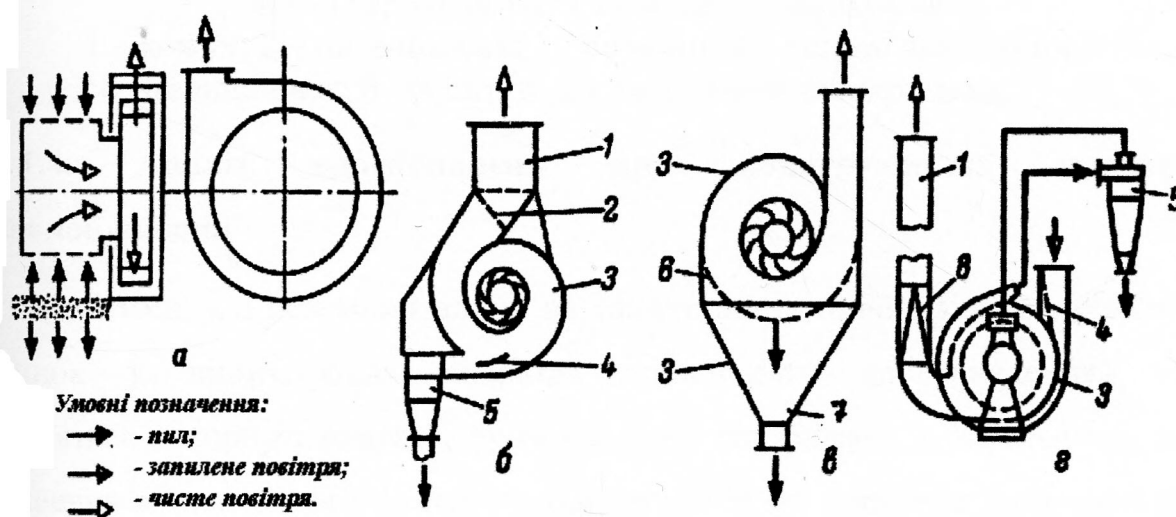


Рисунок 1.7 - Ротаційні пиловловлювачі із гвинтоподібним корпусом:
 а – схема роботи; б – із вбудованим циклоном; в – із щілинними затворами; г – димар-пиловловлювач; 1 – вихлопний патрубок; 2 – перекидний клапан; 3 – кожух; 4 – поворотний клапан; 5 – циклон; 6 – щілинні затвори; 7 – пилозбірник; 8 – козирки.

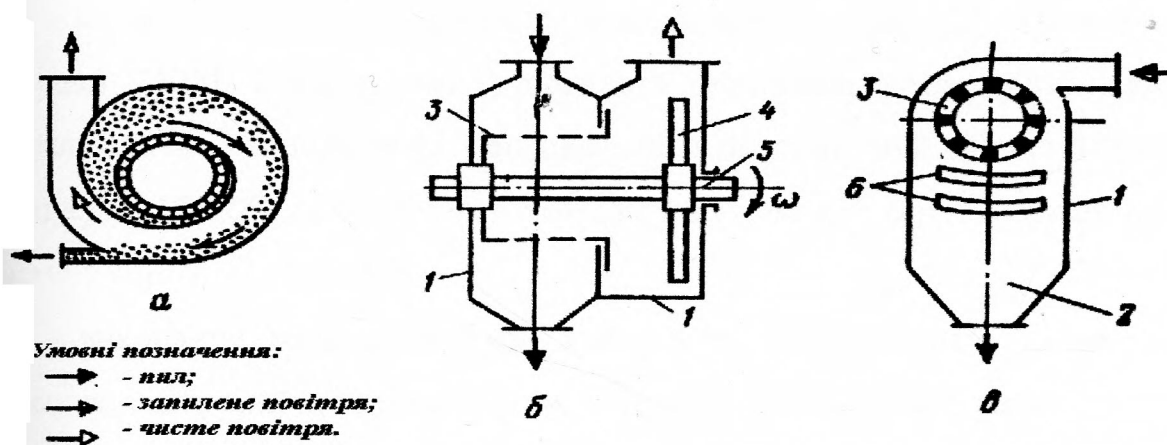


Рисунок 1.8 - Ротаційні пиловловлювачі із перфорованим барабаном, що обертається:

а – схема роботи; б – із барабаном, що співвісний до колеса вентилятора;
 в – із решітками для зменшення завихрювань:

1 – ко́жух; 2 – пи́лозбі́рник; 3 - бара́бан; 4 – ко́лесо ве́нтилято́ра; 5 – за́гальний ва́л; 6 –ре́ші́тки для зме́ншенн́я за́вихрюва́нь.

1.4. Аналіз вдосконалень при конструюванні корпусу пиловловлювача

Відмітимо, що основний вплив на ефективність пиловиділення твердих частинок у відцентрових апаратах здійснюють вдосконалень, які проводяться в корпусі апарата, причому вони спрямовані, в загальному, на збільшення відцентрового фактору розділення або на зниження шкідливої дії радіального виносу пилу.

Практика показує, що ускладнення конструкції пиловловлювача в більшості випадків нераціонально, тому що ефективність пиловловлювання в порівнянні із звичайними циклонами або не збільшується, або незначне підвищення ефективності супроводжується підвищенням гідравлічного опору пиловловлювача, тобто збільшенням витрат електроенергії, якій звичайно складають 80 - 90% від загальних витрат на очистку повітря в них.

Пояснимо це на прикладах найбільш вдалих вдосконалень при конструюванні корпусу циклона:

використання сферичних і тороподібних поверхонь дозволяє виключити області підвищеної турбулентності в зонах, що знаходяться біля вихідних патрубків [120];

- встановлення співвісно суцільної циліндричної [121,122] або циліндро-конічної [125] камери, що утворюють додаткові сепараційні канали; спіралеподібні циліндричні направляючі в верхній циліндричній частині корпусу [118,125]; циліндричну спіраль, що заміняє верхню циліндричну частину корпусу [131,132];

- виконання верхньої частини корпусу у вигляді спіралі, де спіраль в цьому випадку виконує швидше роль патрубку, що додатково розкручує потік [136,138];

- встановлення або концентричних конусів з конусністю, що зменшується по ходу руху потоку [129,131], або спіралеподібних конічних направляючих по ходу потоку [132,133], а також дна у вигляді конічної спіралі [140,144];

- обладнання циліндричного корпусу дном, яке виконано по гвинтовій утворюючій [116].

Представляє інтерес можливість реалізації теоретичного розрахунку робочої частини циклону на практиці, конструкції циклонів з гвинтоподібними каналами постійного перетину, розташованими навкруги вертикальної [149-151] або горизонтальної вихлопної труби [152-156], де процес виділення частинок повинен бути більш закономірним, ніж в інших циклонів. Розвитком однієї ідеї є конструкція з корпусом з багатовитковою циліндричною спіраллю, висота якої збільшується вниз від її периферії, а діаметр зменшується зверху вниз. Гвинтоподібне дно в ньому закріплене між витками спіралі [169]. Кут нахилу гвинтоподібного дна у наступному апараті пов'язаний з фізико-хімічними властивостями пилу, що вловлюється, а апарат має спіраль-но-циліндричний корпус, діаметр якого збільшується зверху вниз, і гвинтоподібну кришку, яка закріплена між витками спіралі [172]. Такі циклони забезпечують довготривалу дію відцентрової сили на тверді частинки і значно збільшують шлях руху частинок пилу всередині нього.

Часто застосовується такий прийом: перфорація співвісно встановлених всередині корпусу циклона камер. Це пов'язано з бажанням нейтралізувати вторинний винос пилу разом з радіальним стоком, який в ньому утворюється.

Одні винахідники встановлюють перфоровані камери співвісно [141], другі - ексцентрично [140] вздовж бокової поверхні корпусу або ж вздовж конічної частини корпусу циклона [169,170]; треті - співвісно, вздовж зовнішньої поверхні вихідного патрубку [171-174] або є продовженням вихідного патрубку [175,176].

Аналіз і експериментальна перевірка цих стверджень привели до створення циклона з співвісно перфорованим конусом, розташованим під вхідним патрубком дном догори, причому діаметр його дна більший за діаметр вихідного патрубку [136,115]. Перфорований конус такої конструкції, що є додатковою камерою, поглиблює вихідний патрубок пилу в бік бункера, що сприяє підвищенню ефективності пиловловлення [144]. Одночасно він розкручує очищений потік і знижує гідравлічний опір циклону. Для зниження шкідливого впливу зони високого тиску (радіальний стік) в циклоні по осі корпусу встановлюють додатковий потік з осьовою подачею назустріч вторинному закрученому потоку [140], який закручують для збільшення швидкості обертання потоку в прилеглій до осі зон [138] або в зоні високого розрідження співвісно розміщують мікроциклон [136]. Для зниження інтенсивності радіального стоку в нижній частині конічного корпусу циклона встановлюють вставку у вигляді прямого і зворотного конусів, які особливо перехрещуються [138].

Для надання обертального руху потоку всередині апарата більш правильної форми між основними вихідними патрубками очищеного повітря і пилу встановлюють спіральну напрямляючу [105]. Підведення газів до патрубку виводу пилу дає початок внутрішньому вихору очищеного газу, що рухається в апараті назустріч виділеному пилу (тобто ефект зміни руху частинок вздовж осі циклону при переході від зовнішньої до внутрішньої спіралі) і здійснює набагато більший вплив на ефективність очистки, ніж радіальний стік. Для

зниження можливості захоплення пилу, що рухається в бункер, очищеним внутрішнім вихором, частіше пропонується кільцева щілина, утворена двома співвісними конічними поверхнями [126,128]. Звільнившись від пилу, газ повертається назад в корпус через центральний отвір всередині корпусу. Бункер приймає активну участь в газодинаміці циклонного процесу, тому він повинен мати певну ємність, щоб вловлений в циклоні пил міг повністю в нього осипатися. Якщо цього не буде, відбудеться неминучий винос пилу з нього, а це зменшує ефективність роботи апарату. Часто для запобігання змочування і виносу вловленого пилу конічну частину корпусу апарата заглиблюють у бункер [125,131].

У забезпеченні ефективності очистки відіграє велику роль і герметичність пилового затвору. У випадку виникнення підсосів, швидкість вихору, що піднімається з бункера, збільшується і підсилюється винос вже відсепарованих частинок пилу [62]. В залежності від фізико-хімічних властивостей пилу та технологічних параметрів пилогазових потоків пред'являються різні вимоги до остаточного вмісту пилу в газових потоках. Особливо жорсткі вимоги застосовуються до токсичних дрібнодисперсних органічних пилів хімічних і анілінофарбових виробництв. Тому можлива поліваріантність рішень при розробці відцентрових апаратів для виділення твердих частинок з газових потоків. Приведений нами аналіз виявив велику кількість конструкцій відцентрових апаратів, частіше не підкріплених теоретичними і експериментальними дослідженнями структури утворених потоків і процесу виділення частинок в них. Дев'яносто відсотків з наведених вдосконалень циклонів носить чисто конструкторський підхід, досліджені в кращому випадку тільки експериментально на дослідних установках і є ілюстрацією можливих варіантів виготовлення циклонів.

Проведений аналіз довів, що в даний час не існує апаратів, здатних високоефективно вловлювати дрібнодисперсні фракції пилу, потреба у виділенні яких з пилоповітряного потоку є нагальною. Тому сьогодні гостро стоїть питання розробки принципово нових конструкцій пиловловлювачів,

здатних високоефективно вловлювати дрібнодисперсний пил, для реалізації якого необхідно створити математичну модель руху частинок пилу в апаратах з криволінійними потоками, про що і піде мова у наступних розділах роботи.

1.5. Висновки до розділу 1

1. Розгляд найбільш великих екологічних катастроф, які сталися у Львівській області за останні роки наочно продемонстрував, що для оточуючого середовища та здоров'я людини значну небезпеку становлять викиди пилових речовин, які значно погіршують екологічний стан довкілля, викликають передчасне зношення промислового обладнання та об'єктів житлово-комунального господарства, наносять шкоду здоров'ю людей.

2. Доведено, що проблеми антропогенного впливу на природне довкілля України об'єктивно вимагають розробити наукові засади екологічної безпеки України, методологію забезпечення її реалізації.

3. За викидами шкідливих речовин у повітряний басейн та скидами забруднених вод у поверхневі води Львівська область належить до 10 найбільш забруднених областей України. Довкілля області у багатьох її районах, за даними санітарно-екологічних показників, є дуже забрудненим за багатьма факторами. Так, станом на 2009 – 2012 роки 42% дорослого та 43% дитячого населення області мешкало в умовах, де сумарний рівень забруднення довкілля переважав середній показник по області на 71,2% [20,36,43,52,53].

4. Проведений аналіз виявив велику кількість конструкцій відцентрових апаратів, частіше не підкріплених теоретичними і експериментальними дослідженнями структури утворених потоків і процесу виділення частинок в них, тому сьогодні гостро стоїть питання розробки принципово нових конструкцій пиловловлювачів, здатних високоефективно вловлювати дрібнодисперсний пил, для реалізації якого необхідно створити математичну модель руху частинок пилу в апаратах з криволінійними потоками про що і піде мова у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

2.1. Експериментальна установка для дослідження пиловловлювачів

Перед нами стоїть задача створити високоефективні й низькоенергоємні конструкції апаратів для вловлення дрібнодисперсних фракцій пилу.

Запропоновані конструкції пиловловлювачів досліджуються на стандартному експериментальному стенді, прийнятому як обов'язковий при проведенні порівняльних досліджень пиловловлювачів. Загальний вигляд стенда, який встановлений в Національному університеті «Львівська політехніка», наведений на рисунку 2.1.

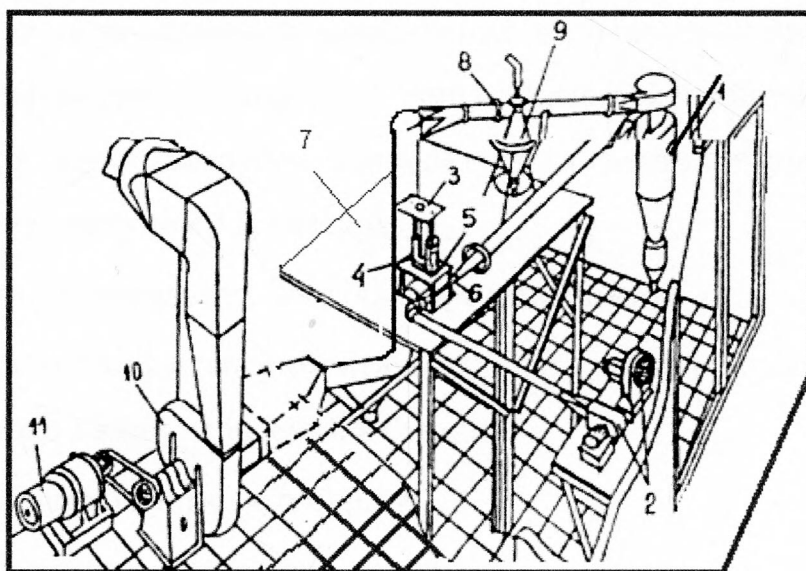


Рисунок 2.1 - Загальний вигляд експериментального стенду.

1 – пиловловлювач; 2, 10 – вентилятор; 3 – пилоподавач;
4 – змішувач; 5 – ежектор; 6 – колектор; 7 – стіл для приладів;
8 – шайба; 9 – прилад зовнішньої фільтрації; 11 – двигун.

Експериментальний стенд складається з апарата 1, який досліджується, вентилятора 2 для дезінтеграції пилу, пилоподавача 3 зі змішувачем 4 для подачі пилу в стенд через ежектор 5 і колектор 6; вентилятора 10 для викидання назовні очищеного в апараті 1 повітря. Стіл 7, на якому

розташований пилоподаючий пристрій і вимірювальні прилади. Перед вентилятором (між ним і апаратом, що досліджуємо) встановлена вимірювальна шайба 8 з приладом зовнішньої фільтрації 9.

Вентилятор 10 має привід від електродвигуна постійного струму 11 потужністю 3,5 кВт, який дозволяє плавно регулювати число обертів колеса вентилятора від 0 до 30 об/хв. Відцентровий вентилятор, при розрідженні на вході у всмоктуючий отвір до 600 мм вод. ст., забезпечує витрати повітря до 3000 м³/год.

Для живлення повітряного ежектора 5 встановлено два послідовно включених відцентрових вентилятора 2 (ЦВ – 2; ЦВ – 3) з числом обертів 50 об/хв. і електродвигунами потужністю 1,8 кВт.

Працює стенд наступним чином: пил через пилоподавач 3 поступає по трубопроводу 6, в якому створено розрідження, в пиловловлювач 1, який ми досліджуємо. Вловлений в апараті 1 пил збирається в його бункері, а очищене повітря через патрубок відсмоктується вентилятором 10, який приводиться в рух двигуном 11, назовні.

Метою експериментальних досліджень є визначення:

- дисперсного складу експериментального пилу, який виноситься разом з очищеним повітрям і який вловлений в бункері;
- фізико-хімічних властивостей пилу;
- морфометричних властивостей пилу;
- залежності ефективності роботи пиловловлювача від:
 - дисперсного складу пилу;
 - витрат повітря в стенді;
 - конструкції жалюзійного відокремлювача;
- залежність гідравлічного опору апарата від:
 - витрат повітря в стенді;
 - конструкції жалюзійного відокремлювача;

- визначення найбільш ефективного пиловловлювача шляхом порівняльних досліджень;
- переваг визначеного пиловловлювача перед еталоном.

2.2. Методика проведення досліджень

Наважка пилу, яка подається в стенд, дорівнює 1кг при тривалості досліду не менше 10 хвилин.

Тарування вимірювальних приладів проводилися на стенді без підключення пиловловлювачів і деагломератора пилу за допомогою пневмометричних трубок (трубок Піто - Прандтля) на відрізок прямого трубопроводу 5 з довжиною відрізка до трубки 5d, а після трубки – 2d, які підключені до мікроманометра.

Одночасно визначалися концентрація пилу, що входить в апарат в трубопроводі 4 і в трубопроводі виходу чистого повітря 5 протягом всього часу подавання пилу через пилоподавач 3. Ступінь рівномірності полів концентрації пилу в перетинах повітряходу, де відбираються проби, перевірялися одночасним відбором проб пилу пилозабірною трубкою, яка підключається до фільтрів і вакуум-насоса (метод зовнішньої фільтрації). При розрахунках обов'язково визначався коефіцієнт відхилення отриманих концентрацій від її середнього значення, визначеного в одній точці, вибраній для пиловловлювача.

Підсмоктування повітря перевірялось за витратами повітря в трубопроводах до апарата 1 (трубопровід 4) і після апарату 1 (трубопровід 5).

Метеорологічні умови в приміщенні експериментального стенду вимірювалися:

- температура – ртутним термометром з точністю $\pm 0,2$ °C (підтримувалася в межах 20 °C);
- вологість – аспіраційним психрометром (підтримувалася в межах 40 – 60%);
- коливання руху повітря – кататермометром, крильчастим анемометром

(підтримувалася в межах 0,2 м/с);

- тиск – барометром.

Після проведення кожного досліду пилоподавач, пиловловлювач, бункер, всі трубопроводи і вентилятор очищували постукуванням палицею з гумовим кінцівником.

Згідно єдиної методики [35] концентрація пилу, який надходить у пиловловлювач, підтримується в межах $(2 - 3) \cdot 10^{-3}$ кг/м³ з допустимим відхиленням $\pm 20\%$.

Початкова концентрація Z_n (кг/м³) визначається за формулою:

$$Z_n = \frac{G_n}{Q_n \tau_g}, \text{ кг/м}^3, \quad (2.1)$$

де G_n – вага пилу, який подається через пилоподавач за час досліду, кг;

Q_n – витрати повітря через стенд, м³/год.;

τ_g – час досліду, год.

Кінцева концентрація пилу Z_k (кг/м³) визначалася за формулою:

$$Z_k = \frac{G_n - G_{вл}}{Q_n \tau_g}, \quad (2.2)$$

де $G_{вл}$ – вага вловленого пилу, кг.

Всі експерименти повторюються по 5 разів при розбіжності результатів не більшій за 5%.

3.3. Методологія проведення експериментальних досліджень

Відбір проб пилу з газоходу (рисунок 2.2) здійснюють приладом зовнішньої фільтрації (позиція 9 рисунку 2.1).

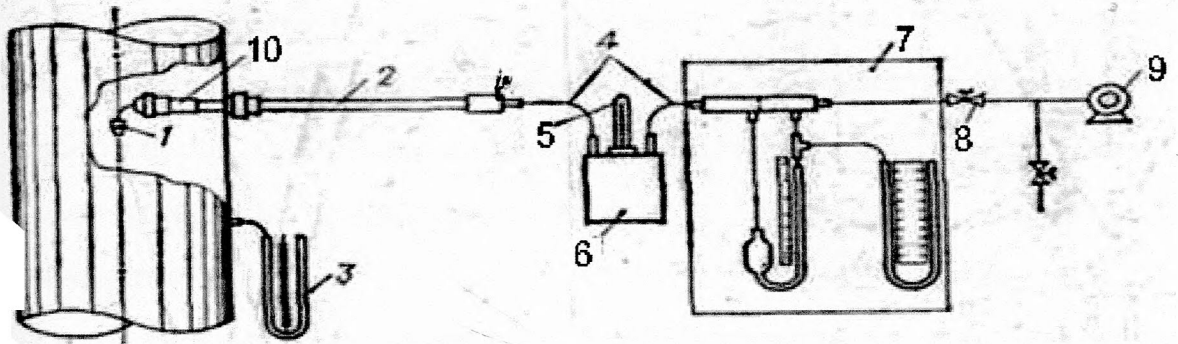


Рисунок 2.2 - Схема установки апаратури для відбору проби пилу методом зовнішньої фільтрації:

1 — кінцевик; 2 — забірна трубка; 3 — U-подібний манометр;
4 — гумовий шланг; 5 — термометр; 6 — збірник конденсату;
7 — витратомір; 8 — затискач; 9 — повітродувка; 10 — фільтруючий елемент.

Відбір проб із запиленого газового потоку чи повітря виробничих приміщень починаємо з перевірки герметичності всієї апаратури — мікроманометрів, сполучних гумових шлангів і місць їх приєднання до штуцерів вимірювальних діафрагм та інших приладів, при цьому переконуємося в герметичності фільтруючих пристроїв.

Перед початком відбору проби виміряємо величину статичного тиску (розрідження) перед вимірювальним пристроєм і переконуємося, що збудник тяги забезпечує розрідження з урахуванням компенсації росту опору в міру запилення фільтруючих пристроїв.

Трубку з патроном для зовнішньої фільтрації встановлюємо у заданій точці перетину газоходу, так, щоб забірний отвір був спрямований по ходу потоку газу. Включивши джерело тяги пилозабірної установки і відрегулювавши кількість газу, що просмоктується, повертаємо трубку так, щоб отвір кінцевика був звернений проти газового потоку, і фіксуємо час початку відбору проби.

По закінченні відбору проби негайно заносимо в журнал спостережень тривалість відбору проби, покази манометрів, що вимірюють перепад тиску на діафрагмі, і статичний тиск перед діафрагмою, а також температуру газу, який відбираємо, у цій точці. Крім того, у журналі фіксується температура і

тиск газу в основному газоході, а також покази мікроманометра пневмометричної трубки в місці відбору проби. Заносимо також годину і дату відбору проби, опис місця визначення запиленості газу, номер фільтра, видатковий коефіцієнт вимірювальної діафрагми і номери всіх манометрів і мікроманометрів.

Перед зважуванням ковпачки з фільтрувального паперу добу витримуємо у ваговій кімнаті для того, щоб вони прийняли відповідну температуру і вологість. Після відбору проби розраховуємо приріст ваги пилу, обсяг пропущеного через прилад газу (приведеного до стандартних умов) і пиловміст газу.

Підготовка проби до аналізу і допоміжні роботи. Позаяк наша проба суха, то надається їй рівновага з метеорологічними умовами повітря лабораторії, для чого її в розсипаному стані витримуємо протягом 24-48 годин при тій температурі і вологості повітря, що існує при аналізі.

Після попередньої обробки доставленого матеріалу проводимо його основну підготовку, що полягає в готуванні наважки, визначенні щільності матеріалу, вакуумуванні проби, підборі дисперсного середовища і визначенні його густини і в'язкості.

Визначення густини матеріалу частинок. Для визначення розміру і швидкості витання частинок необхідні дані про густину порошкоподібного матеріалу. Густина пористих матеріалів визначаємо перед проведенням дисперсного аналізу пікнометром, принцип дії якого полягає у визначенні обсягу рідини, витиснутої порошком, маса якого відома.

Відповідно до ГОСТ 22524—77 для визначення густини матеріалів користуємося пікнометрами об'ємом 100 см^3 (рисунок 2.3), згідно ГОСТ 7465-55, принцип дії якого ґрунтується на визначенні об'єму рідини, яка витискається пилом, маса якого відома. В якості рідини використовуємо дистильовану воду (в подальшому - дисперсне середовище), яка не впливає на кварцовий пил.

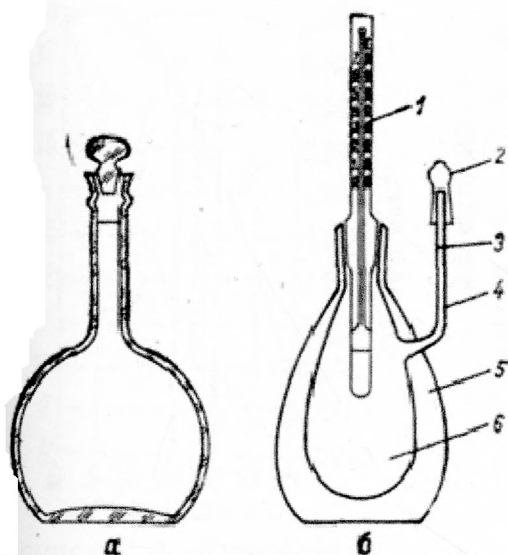


Рисунок 2.3 - Пікнометри:

а — пікнометр

із міткою на шийці;

б — пікнометр заводу VEB
Glasswerke StOzerbach.

1 - Термометр; 2 - Ковпачок;

3 - Риска; 4 - Переливний капіляр;

5 - Міжстінний простір; 6 - Колба

дисперсної фази, наприклад, їх розчинення чи набрякання;

2) не є агресивним і не вступає в хімічну реакцію з частинками;

3) добре змочує частинки;

4) має в'язкість і густину, які забезпечують можливість аналізу
здрібненого матеріалу даного ступеня дисперсності;

5) не утворюють агрегати частинок, тобто суспензія є агрегатно стійка.

За умов використання кварцового пилю цим вимогам відповідає
дистильована вода.

Визначення густини і в'язкості дисперсійної рідини. Значення
густини і в'язкості дистильованої води, яка застосовується як дисперсне
середовище, знаходимо з довідкових таблиць і складаємо графіки залежності
густини і в'язкості від температури (рисунки 2.4, 2.5).

Густина дистильованої води при
температурі $22,5^{\circ}\text{C}$ складає $999,7\text{кг/м}^3$
[13]. Нами визначена густина
пилоподібного кварцу КП-3, яка
дорівнює $2512,4\text{кг/м}^3$.

Густина порошкоподібного
матеріалу визначаємо за двома
аналізами, результати яких не повинні
розходитись більше ніж на 1%.

Вибір дисперсного середовища.

Дисперсне середовище, яке
застосовується нами при
седиментаційних аналізах, відповідає
наступним вимогам:

1) не викликає ніяких змін частинок

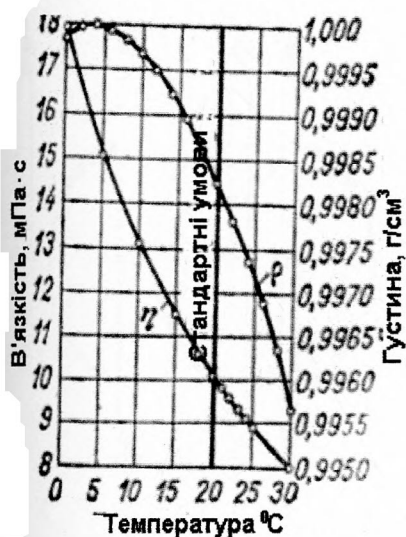


Рисунок 2.4 - Залежність густини і в'язкості води від температури.

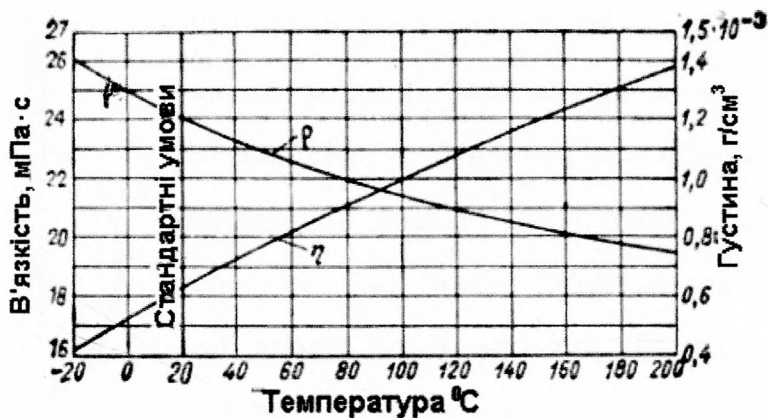


Рисунок 2.5 - Залежність густини повітря від температури.

З підготовленої проби беремо наважки, що відповідають прийнятій концентрації дисперсної фази й обсягу рідини в седиментаційному посуді, та поміщаємо її у хімічну склянку, заливаємо дисперсну рідину і протягом 1 хв. диспергуємо за допомогою ультразвукової установки типу УЗДН-2 з метою поділу агрегатів на самостійні частинки.

Для видалення повітря з поверхні частинок проводимо вакуумування до абсолютного тиску 80—50 мм рт. ст. і припинення виділення пухирців повітря. Суспензію зі склянки кількісно переносимо у седиментаційний циліндр і доводимо рівень дисперсійної рідини до необхідного обсягу.

Остаточне розмішування суспензії для аналізу на піпеточному приладі проводимо шляхом хитання седиментаційного циліндра протягом 8 хвилин. Циліндр поперемінно повертаємо на 180° (рисунок 2.6) при тривалості циклу 4 секунди.

У нашому випадку, оскільки кварц у процесі помолу в кульовому млині внаслідок стирання сталевих куль забруднився залізом, то при тривалому витримуванні матеріалу у воді залізо окислилося (утворилася іржа), а це викликає спікання найбільш дрібних частинок.

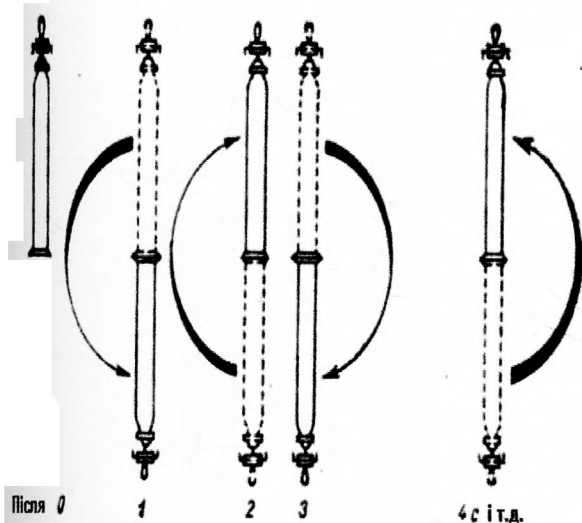


Рисунок 2.6 - Схема остаточного розмішування суспензії.

Уникнути такої коагуляції можна за умови, якщо б наш аналіз разом з готуванням суспензії забирав нетривалий час (1—1,5 доби), але через те, що проба знаходилася у воді довше, ми її очищали від заліза. Для цього кварцовий пісок заливали спершу концентрованою соляною кислотою і залишали на 1—2 доби, протягом яких з'єднання заліза

розчинилися. Потім, не перемішуючи осаду, що випав на дно, кислоту видаляємо шляхом багаторазового (не менш 3 разів) зливання сифоном з U-подібною трубкою (декантування). Залишки кислоти видаляємо через мембранний фільтр із прополіскуванням його дистильованою водою, який утримує частинки, розмір яких на 10% менший граничного розміру найбільш тонкої з обумовлених фракцій. Для скорочення часу фільтрації у посудині під фільтром створюємо розрідження.

Сутність методу вагових проб полягає в послідовному відборі проб на відомій глибині суспензії у фіксовані моменти часу і визначенні маси твердої фази у відібраній пробі після випаровування.

Так само, як і в аналізах, будь-яким іншим седиментометричним методом пил, який досліджуємо, перед початком досліду рівномірно розподіляємо в рідині (дисперсійному середовищі), яка наливається у циліндричну посудину.

На рисунку 2.7,а представлена схема рівномірного розподілу частинок будь-якого розміру по всій висоті суспензії в момент закінчення її перемішування і на початку процесу седиментації. На рисунку 2.7,б також умовно показаний розподіл частинок, що відповідає деякому моменту t після початку седиментації, коли найбільш великі частинки випали нижче

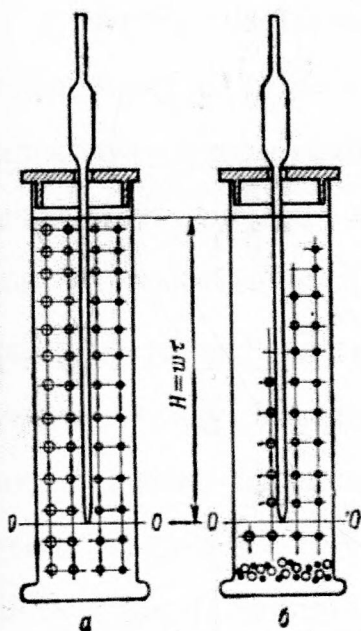


Рисунок 2.7 - Схема розподілу частинок по висоті суспензії.

площини, у якій розташований всмоктувальний отвір піпетки. Маса відібраної і випареної проби, яка визначена у відсотках від маси нульової проби (розрахованої, виходячи з розрахункового вмісту дисперсної фази в суспензії в початковий момент), характеризує масову частку всіх частинок дрібніших δ , що осіли з висоти H на момент відбору проби t .

Промисловий пил і продукти здрібнення матеріалів складаються з частинок, що мають неправильну геометричну форму, і звичайно є полідисперсними системами. Для оцінки ступеня дисперсності таких матеріалів можуть бути використані різні характеристики, наприклад, найменший і найбільший розмір частинок, різниця між найбільшим і найменшим розмірами, середній розмір частинок, питома поверхня тощо. Однак найбільш повно дисперсність характеризується дисперсним (гранулометричним, зерновим) складом, який ми і використовували. При такій характеристиці встановлюються не тільки перераховані вище параметри, але і процентний вміст частинок кожного розміру.

Пил і порошкоподібні матеріали, як системи, що складаються з великого числа частинок, які розрізняються за формою і розміром, є статистичними сукупностями, можуть бути одно - чи багатокomпонентними. Враховуємо те, що матеріал, який представляє собою суміш частинок, отриманих з однієї речовини різними способами, у відношенні дисперсного складу є багатокomпонентною сукупністю.

У зв'язку з різноманітністю геометричної форми розміри частинок важко визначити шляхом вимірювання, тому для спільної характеристики

розміру і форми частинки користуємося поняттями еквівалентного і седиментаційного діаметра δ_E і δ_S .

Застосовуючи термінологію математичної статистики, діаметр частинок розглядається як одномірна випадкова величина. Властивості пилоподібного матеріалу описуються функцією розподілу $D(\delta)$ маси матеріалу за діаметрами частинок, яка зв'язана з нею функцією $R(\delta)$. Характеристика дисперсного складу порошкоподібних матеріалів за допомогою кривих розподілу спочатку визначалися нами за результатами ситового аналізу. Позначення кривих D і R відповідають початковим буквам німецьких термінів *Durchgang* (прохід) і *Ruckstand* (залишок).

Функція $D(\delta)$ дорівнює, показаному у відсотках, відношенню маси всіх частинок, діаметр яких менший за δ , до загальної маси пилоподібного матеріалу. Функція $R(\delta)$ визначалася у відсотках як відношення маси всіх частинок, діаметр яких більший за δ , до загальної маси матеріалу, тобто виконуються співвідношення:

$$\begin{aligned} D(\delta_{\max}) &= 100\% ; D(\delta_{\min}) = 0\% ; \\ R(\delta_{\max}) &= 100\% ; R(\delta_{\min}) = 0\% , \end{aligned} \quad (2.3)$$

де $\delta_{\min}$, $\delta_{\max}$ — найменший і найбільший діаметри частинок, які зустрічаються в даному матеріалі.

Нам необхідно розглядати функції розподілу: $D_n(\delta)$, $R(\delta)$ — число частинок за їх діаметрами і $D_s(\delta)$, $R_s(\delta)$ — поверхні частинок за їх діаметрами, а також інші аналогічні функції. Усі вони визначаються так само, як величини $D(\delta)$, $R(\delta)$ (із заміною слова «маса» словами «число частинок», «поверхня частинок» і т.д.).

Поряд із функціями розподілу за діаметрами нами застосовані функції розподілу за масою, а також числа частинок за швидкостями вітання. Ці функції позначені відповідно $D(w)$, $D_n(w)$ і $R(w)$, $R_n(w)$, де w — швидкість вітання. Їх визначення відрізняються від визначення функцій розподілу за діаметрами лише заміною слова «діаметр» словами «швидкість вітання». Для

них справедливі рівності:

$$D(\delta) = D[w(\delta)]; R(\delta) = R[w(\delta)], \quad (2.4)$$

де $w(\delta)$ — швидкість вітання, як функція діаметра.

Графічно функції розподілу наводимо у вигляді кривих розподілу, коли по осі абсцис відкладаємо в обраному масштабі (рівномірному чи нерівномірному) значення одномірної випадкової величини, у нашому випадку значення діаметра δ частинок, а по осі ординат - процентний вміст усіх частинок, діаметр яких менший чи більший δ , тобто значення функцій $D(\delta)$ чи $R(\delta)$.

Загальний вигляд кривих розподілу для однокомпонентного пилу представлений на рисунку 2.8. В силу того, що $D(\delta_{\max}) = 100\%$, криві перетинаються в точці, де $D = R = 50\%$. Функція розподілу $D(\delta)$ є беззупинна монотонна функція величини δ , яка усюди диференційована та наділена неперервною похідною.

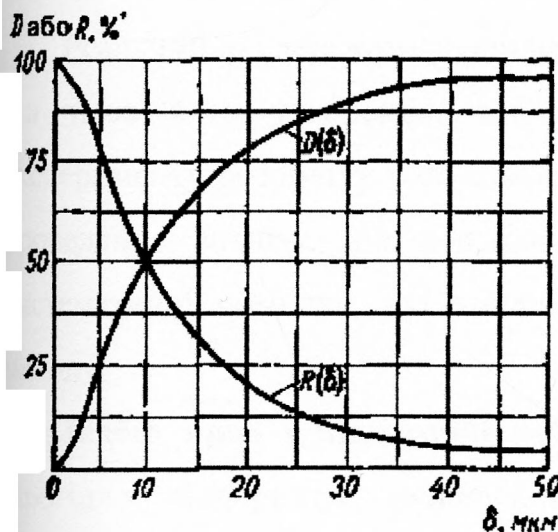


Рисунок 2.8 - Криві розподілу однокомпонентного порошку.

розподілу процентного масового вмісту кожної фракції на її діапазон (різниця граничних розмірів фракції).

Це означає, що існує функція $R(\delta)$, яка може бути отримана шляхом диференціювання функції розподілу $D(\delta)$ і вона є неперервною.

Внаслідок того, що діапазони окремих фракцій зазвичай приймаються неоднаковими, відносні величини фракцій, що відкладаються по осі ординат, підраховуємо шляхом

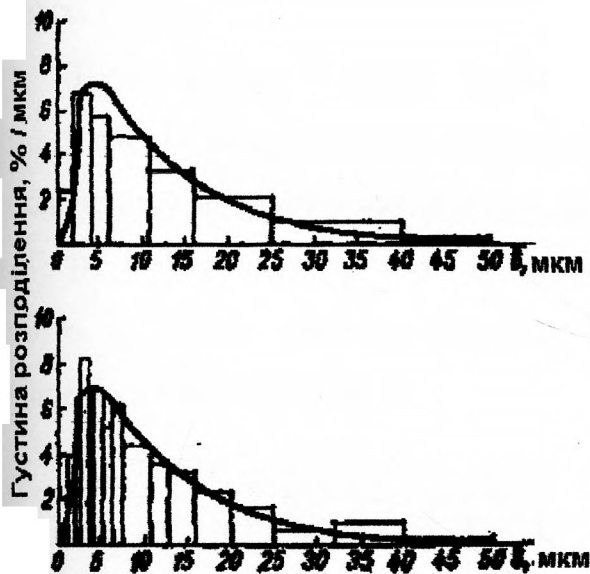


Рисунок 2.9 - Гістограми одного і того ж пилу при різних діапазонах фракцій і крива густини розподілу кварцового піску.

Крива густини розподілу, яка отримана шляхом диференціювання по δ кривій розподілу D , наведена на рисунку 2.9, і є дійсною густиною розподілу кварцового пилу.

Плавність кривих дисперсного розподілу пилу і продуктів подрібнення та густини розподілу цих матеріалів пояснює закономірний зв'язок між розмірами частинок і їх масовим вмістом, природи і способу одержання

порошкоподібного матеріалу, у тому числі і від типу устаткування, в якому здійснювалося подрібнення.

Реальний дисперсного розподіл подрібненого матеріалу залежить тільки від умов його утворення, але результати, які отримані в результаті експерименту розподілу того самого матеріалу різні в залежності від методу проведення аналізу, що пояснюється тим, що кожний метод має свої систематичні помилки, які викликані допущеннями, що лежать в основі методу.

Відбір проб і підготовчі роботи до аналізу. Для того, щоб аналіз вірогідно відображав дисперсний склад порошкоподібного матеріалу, проводимо його на такій пробі, яка правильно представляє матеріал, а це забезпечується відповідним відбором її з маси матеріалу і належною підготовкою до аналізу, регламентованими ГОСТ 23148—78.

У нашому випадку є коливання характеристик пилу у процесі їх приготування, тому проводиться аналіз декількох проб, які відібрані у різний час, хоча можна обмежитися й однією, середньою пробою, яку отримуємо шляхом відбору часткових проб матеріалу, що утворюється, протягом досить

довгого часу.

Точок відбору є чотири в плані смності і три по висоті шару матеріалу.

Тоді за результатами аналізів встановлюємо залежність дисперсного складу пилу від часу у вигляді графіків.

Відбір запиленого повітря проводиться з дотриманням ізокінетичності, тобто за умови рівності швидкості потоку у повітропроводі й у гирлі кінцевика забірної трубки.



Рисунок 2.10 - Графік для підбору діаметра кінцевика (d) пило забірної трубки

потoku. Вплив розмірів пилинок на відхилення вмісту пилу від фактичного при недотриманні ізокінетичності або неправильному розташуванні отвору пилозабірної трубки видно з рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 - Відхилення заміряного пиловмісту від фактичного: а - при різних співвідношеннях між швидкістю потоку в газоході і в забірній трубці; б - при різних кутах нахилу осі трубки до напрямку потоку (цифри на кривих — діаметр частинок, 10^{-6} м).

Зрозуміло, що чим крупніший пил, тим більшою може бути похибка при недотриманні розглянутих вище умов.

Проведення аналізу дисперсного складу пилу седиментаційним методом. Вихідну пробу пилу просіваємо на ситі з комірками розміром $6,3 \cdot 10^{-6}$ м і визначаємо залишок на ситі R у відсотках. Пил, який зібраний у скляний стаканчик з піддона ситового апарата, висушуємо у сушильній шафі до постійної маси, зберігаємо у ексикаторі і визначаємо густину пилу пікнометром, а для дисперсійної рідини - динамічну в'язкість η та густину $\rho_{\text{рід}}$. Розраховуємо інтервал часу, після якого варто відбирати першу і наступні проби. При відборі першої проби всмоктувальний отвір піпетки встановлюємо на відстані не меншій за 20 см від дзеркала суспензії.

Для зменшення тривалості аналізу при відборі проби суспензії з частинками розміром $6,3 \cdot 10^{-6}$ м піпетку піднімають і встановлюють на глибину $H = 10$ см, а при $2,5 \cdot 10^{-6}$ м — на глибину $H = 5$ см.

З підготовленої проби беремо наважку 5 г з точністю до $\pm 0,0001$ г., яку поміщаємо у хімічну склянку, заливаємо дисперсійною рідиною і диспергуємо протягом 1 хвилини на ультразвуковій установці.

У циліндр піпеточного приладу заливаємо дисперсійну рідину, кількісно переносимо у нього суспензію зі склянки, доводимо рівень рідини в циліндрі до мітки (500 моль), закриваємо кришкою і на 2 години ставимо у термостат для вирівнювання температури (температуру в термостаті протягом усього дослідження підтримуємо на рівні $20 \pm 0,5$ °С.) При цьому отвір у кришці циліндра закриваємо пробкою, енергійним струшуванням перемішуємо суспензію протягом 2 хвилин, циліндр швидко встановлюємо на заздалегідь фіксоване місце в термостаті, включаємо секундомір і опускаємо піпетку в нижнє положення для першого відбору проби.

Тривалість відбору проби суспензії обсягом 10 моль складає близько 30 сек., починаємо відбір за 15сек. до встановленого розрахунком моменту часу взяття проби. Для кожного заданого розміру частинок беремо одну пробу. Кожну взятую пробу кількісно переносимо у попередньо висушений до

постійної маси і зважений з точністю до $\pm 0,0001$ г бюкс. Калібровану піпетку після взяття кожної проби промиваємо над бюксом точно заміряною кількістю дисперсійної рідини. Бюкси з відібраними пробами ставимо для випарювання в сушильну шафу. Після того як рідина цілком випарюється, бюкси охолоджуємо у ексикаторі і, закривши притертими кришками, зважуємо на аналітичних вагах з точністю до $\pm 0,0001$ г. Висушування в ексикаторі і зважування повторюємо до одержання постійної маси. Одночасно визначаємо сухий залишок після випарювання дисперсної рідини, для чого в сухий зважений бюкс поміщаємо дисперсну рідину. Рідину випаровуємо і визначаємо масу сухого залишку дисперсного середовища.

За остаточний результат аналізу приймаємо середнє арифметичне значення результатів двох визначень, розбіжність між результатами яких не перевищує 3 %. Якщо розбіжність між результатами досліджень перевищує наведену величину, визначення повторюється.

Природний кварцовий пісок КП-3 має медіанний діаметр $50 \cdot 10^{-6}$ м, тому для отримання інших фракцій, його мололи на вібротліні типу М-10 при наважці матеріалу - 5 кг, вазі сталевих куль – 15 кг для одержання фракцій з медіанним діаметром:

$32 \cdot 10^{-6}$ м - 1 годину 10 хвилин;

$8 \cdot 10^{-6}$ м - 4 години 25 хвилин.

Наважка пилу з медіанним діаметром $> 50 \cdot 10^{-6}$ м була проаналізована ручним ситовим методом. Відокремлену фракцію з розміром частинок у межах $0,063 \cdot 10^{-3}$ м та $0,059 \cdot 10^{-3}$ м, а також проби з питомою поверхнею 330 і $650 \text{ м}^2/\text{кг}$ досліджували методом седиментації у гравітаційному полі.

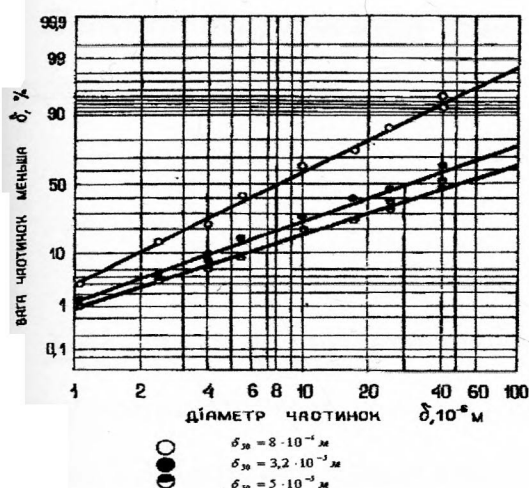


Рисунок 2.12 - Дисперсний склад експериментального пилу.

Таблиця 2.1 Дисперсний склад пилу

$d, 10^{-6} \text{ м}$	4.0	6.3	10	16	25	40
$q, \% \text{ (по масі)}$	98.8	97.2	93	80	53	15
$V \text{ см/с}$	0.22	0.55	1.4	3.58	8.75	21.5

Склад газів визначався за допомогою хімічних аналізаторів ГХП-3М та ВТИ-2, принцип дії яких полягає в поглинанні реагентами окремих складових газової суміші.

Морфометричний опис проводили за допомогою мікроскопа МБ1-3 в світлі, що проходить, за загальними методиками. Морфологія частинок пилу: частинки неправильної форми з гострими гранями коричневого і темно-сірого кольору. $\delta_{50} = 26 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $\rho_{\text{пит}} = 1640 \text{ см}^2/\text{г}$.

Абразивність пилу визначаємо за втратою ваги зразка, що стирається частинками аерозолі, зваженими в потоці газу. Визначається коефіцієнт абразивності і час абразивного зносу елементу апарата на задану глибину.

Змочуваність пилу визначали методом плівкової фільтрації і кварцовий пісок відноситься до пилу, який змочується погано.

Густина дистильованої води при температурі $22,5^\circ \text{C}$ складає $999,7 \text{ кг/м}^3$ [13]. Нами визначена густина пилоподібного кварцу КП-3, яка дорівнює $2512,4 \text{ кг/м}^3$.

В якості експериментального пилу використаний кварцовий пісок з медіанним діаметром (8, 16, 32 і $50) \cdot 10^{-6} \text{ м}$, дисперсний склад якого визначений седиментаційним методом і наведений на рисунку 2.12. (на імовірносно - логарифмічній сітці) і в таблиці 2.1:

Питома поверхня пилу визначена приладом ПСХ-2, і складає для пилу з медіанним діаметром:

$$8 \cdot 10^{-6} \text{ м} - 650 \text{ м}^2/\text{кг};$$

$$32 \cdot 10^{-6} \text{ м} - 330 \text{ м}^2/\text{кг};$$

$$50 \cdot 10^{-6} \text{ м} - 280 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

Хімічний склад пилу визначався за методиками якісного та кількісного аналізу неорганічних матеріалів [39].

Таблиця 2.2 **Хімічний склад пилу (седиментація в часі)**

Компоненти	SiO ₂ (зв'яз.)	SiO ₂ (вільн.)	CaO	MgO	Fe	Fe ₂ O ₄	Al ₂ O ₃
Вміст % (по масі)	1.0	9.3	9.1	1.8	24.6	43.0	7.9

2.4. Визначення ефективності пиловловлювачів

Ефективність пиловловлювачів визначалася, виходячи з ваги пилу, уловленого в бункері пиловловлювача ($G_{\text{вл}}$), до ваги пилу, який входить в апарат ($G_{\text{п}}$), за період досліду (τ):

$$\eta = (G_{\text{вл}} / G_{\text{п}}) \cdot 100 \%, \quad (2.5)$$

Але ефективність апарата в такому вигляді не дає повної уяви про кількість дрібних частинок матеріалу, що виносяться з очищеним повітрям: тому вводимо поняття ефективності апарата щодо вловлення ($\eta_{\text{вл}}$), яка порівнює відношенню вагової кількості дрібних частинок матеріалу, що виносяться з апарата в атмосферу ($G_{\text{вин}}$) до вагової кількості матеріалу, який надходить в нього ($G_{\text{п}}$):

$$\eta_{\text{вл}} = (G_{\text{вл}} / G_{\text{п}}) \cdot 100 \% = [(G_{\text{п}} - G_{\text{вин}}) / G_{\text{п}}] \cdot 100 \%, \quad (2.6)$$

$$\text{або} \quad \eta_{\text{вл}} = (100 - \eta) \%, \quad (2.7)$$

2.5. Визначення гідравлічного опору апарату

Гідравлічний опір відцентрово-інерційних пиловловлювачів визначався

за перепадом повних тисків у перетині перед пиловловлювачем і за ним. Коли площі трубопроводів однакові, то опір пиловловлювачів визначався за різницею статичних тисків до і після апарата.

Для інерційних пиловловлювачів опір визначався за формулою:

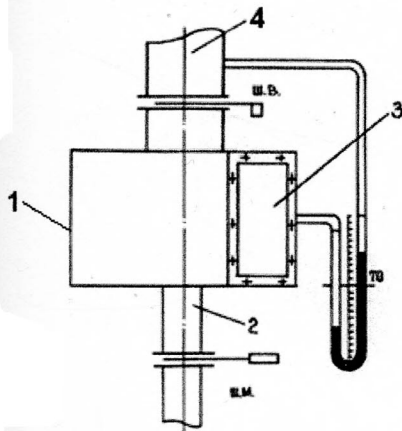
$$H = k \cdot \frac{V^2 \gamma}{2g}, \text{ Н/м}^2 \quad (2.8)$$

де k - коефіцієнт опору (1,76-3,6);

V - швидкість повітря, яке надходить в пиловловлювач, м/с;

γ - питома вага повітря, Н/м³;

g - прискорення сили тяжіння, м/с².



Залежно від положення шибера (як малого м.ш. так і великого в.ш.) вимірювали значення тиску і швидкість в трубопроводах до (3) і після (4) пиловловлювачів (рисунок 2.13).

Рисунок 2.13 - Схема вимірювання гідравлічного опору.

1 – апарат; 2 – пиловипускний патрубок; 3 – вхідний патрубок; 4 – патрубок виходу чистого повітря.

2.6. Висновки до розділу 2

1. Описана експериментальна установка для дослідження пиловловлювачів, яка відповідає всім вимогам Інструкції по проведенню порівняльних досліджень пиловловлювачів [57].

2. Детально описана методика проведення експериментальних досліджень, які були проведені в роботі і методологія обробки даних.

3. За наведеними методиками визначена: густина і в'язкість матеріалу частинок пилу; густину пилоподібного кварцу; дисперсний склад; склад і

густину газів; морфометричний опис; розривна міцність шару; абразивність, змочуваність, хімічний склад пилу, що дозволило перейти до визначення ефективності роботи та гідравлічного опору пиловловлювачів.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПИЛООЧИЩЕННЯ З УРАХУВАННЯМ РУХУ ЧАСТИНОК У ПРИСТІННОМУ ШАРІ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЦИКЛОНУ

3.1. Динаміка руху частинок у внутрішній області стаціонарного турбулентного потоку в циклоні

Пилоочищення відноситься до класу задач аеродинамічної класифікації. Фізичними основами аеродинамічної класифікації є принципи поділу потоків, які застосовуються при методах механічного відділення зваженого матеріалу в камерах для вловлення пилу, циклонах, гідроциклонах і центрифугах.

При розділенні потоків на частинку матеріалу в різних напрямках впливають дві сили: масова сила і сила потоку. Масова сила залежить від густини, прискорення і об'єму, тобто від третього ступеня характерного діаметру частинки. Сила потоку, навпаки, залежить від коефіцієнта опору, динамічного тиску, обумовленого відносною швидкістю між частинкою і середовищем, яке його несе, і площі зрізу частинки. Для коефіцієнта опору найважливішим являється число Рейнольда. При цьому, у разі спрощеного поділу, якщо знехтувати перехідною областю, утворюються дві зони: - при невеликих числах Рейнольда для сили потоку дійсний закон Стокса, - при великих - квадратичний закон опору.

Через те, що сила потоку залежить від першого або другого ступеня діаметру частинки, а сила інерції - від третього, то дрібніші частинки будуть більше зазнавати впливу сили потоку, а більші - масової сили. Якщо масова сила M і сила потоку S діють у протилежних напрямках, то для певного значення величини частинки, яке позначається як межа поділу, існує рівновага між M і S . Густина частинок впливає лише на сили інерції, а ступінь поділу за інших однакових умов розташована тим нижче, чим вища густина матеріалу, який піддається класифікації.

Для здійснення технічного поділу потоків з великою точністю, коли кожна частинка знаходиться в зоні поділу дуже короткий час, у цій зоні повинні переважати однорідні умови поділу, тобто параметри, що діють на межі поділу, не повинні піддаватися ніяким змінам. Аеродинамічна класифікація частинок найчастіше здійснюється в газодисперсному потоці. Найбільш інформативною є класифікація вловлюючих апаратів за видом альтернативних сил, які призводять до розсіювання частинок в залежності від розміру. В аеродинамічних класифікаторах одна з таких сил - аеродинамічний опір частинок потоку, причому, він пропорційний величині δ^α , де δ - розмір частинки, α - показник ступеня, який змінюється в залежності від режиму обтікання від 1 до 2. Вочевидь, інша сила, що діє на частинку, повинна залежати від розміру в ступені, який знаходиться за межами цього інтервалу. Зазвичай це масові сили різної природи, загальною для яких є пропорційність об'єму частинок, тобто величині δ^3 .

За взаємною орієнтацією аеродинамічної і масової сил пиловловлювачі можуть бути розділені на протипоточні, у яких альтернативні сили спрямовані в прямо протилежні сторони, тобто утворюють кут 180° , та інерційні.

У всіх інших випадках, коли альтернативні сили складають постійний або змінний кут, відмінний від 180° , навіть теоретично рівновага в апараті частинки будь-якого розміру неможлива. Визначальну роль тут відіграють нестационарні ефекти, частіше за все - сила інерції відносного руху. Тому подібні апарати називають інерційними.

В апаратах для очищення повітря реалізуються принципи як протипоточних пиловловлювачів, так і інерційних.

Математичні моделі складають основу методів розрахунку і оптимізації різних пиловловлювачів, прогнозування характеристик їх регулювання. У практиці математичного моделювання процесів аеродинамічної класифікації найбільш широке розповсюдження отримали так звані детерміновані та стохастичні моделі.

Оснoву детермінованих моделей складає уявлення процесу, як руху не взаємодіючих між собою частинок у стаціонарному потоці газу.

Квазістаціонарне наближення динамічних рівнянь руху є досить потужним інструментом теоретичного дослідження руху частинок у газових потоках, що дозволяє, з одного боку - істотно спростити рішення, які одержані, а з іншого - зберегти всі основні ефекти взаємодії частинок з потоком, особливо, для умов рівноважної класифікації, коли є, щонайменше один стійкий або байдужий рівноважний стан.

Детерміновані моделі дозволяють оцінити вплив визначальних факторів на деякі характеристики поділу (розмір рівноважної частинки, а в ряді випадків – граничний розмір), але не дозволяють отримати розрахункові вирази для кривих розділення, побудова яких можлива тільки на основі стохастичних моделей процесів класифікації, які враховують сукупний ефект від випадкових впливів з боку навколишнього середовища на кожену частинку.

Аналітичні формули для розрахунку кривих поділу є ефективним інструментом для якісного аналізу та математичного моделювання процесів класифікації, однак проблемним в їх практичному використанні є питання про визначення стохастичних параметрів, які залежать від пульсацій повітря.

З вищенаведеного виходить, що і детерміновані, і стохастичні моделі процесів класифікації не враховують структуру турбулентного пилоповітряного потоку і специфіку руху частинок матеріалу різної гранулометрії. У даний час теоретичні основи створення апаратів пиловловлення розроблені з позицій взаємодії потоку повітря і окремої частинки без урахування пульсаційних складових швидкості повітря і масштабів вихрових структур у потоках середовища, яке транспортує, що необхідно враховувати для забезпечення адекватності математичних моделей, які описують роботу обладнання класифікації матеріалів.

Пилоповітряна суміш надходить тангенціально в корпус пиловловлювача через вхідний патрубок. Під дією відцентрових сил

частинки пилу великої маси відкидаються до циліндричної частини корпусу апарату і рухаються під дією гравітаційних сил вниз спочатку вздовж циліндричної, а потім конічної частини його до патрубку виходу пилу.

Процес руху дрібних зважених частинок під дією відцентрової сили в турбулентному потоці складається з двох процесів: безперервного руху частинок до стінки циклону всередині пульсаційних молей, які їх несуть, і безладного за напрямом, частотою та амплітудою руху частинок разом з пульсаційними молями, які їх несуть, до жалюзійного відокремлювача.

Перший процес - безперервний рух частинок до стінки циклону, описується в стоксівському наближенні рівнянням (3.1.), виведеним для випадку вільного руху частинок в стаціонарному ламінарному потоці. Рівняння руху стоксівської частки в криволінійному турбулентному потоці газу (радіусу R і кутовою швидкістю ω) з урахуванням відцентрової сили має такий вигляд:

$$dv/dt + \beta v = \beta V \sin \omega t - \omega^2 R \quad (3.1)$$

де:

$\beta = 18\mu/\rho\delta^2 = 1/\tau$ - фактор інерційності частинки, так звана «постійна часу», s^{-1} ;

τ - час релаксації частинок, що визначається виразом $\rho\delta^2/18\mu$, s ;

μ - в'язкість повітря, $Pa \cdot s$;

ρ - густина, kg/m^3 ;

δ - діаметр частинок, m ;

v - швидкість руху частки до стінки, m/s ;

$V \sin \omega t$ - поперечна складова пульсації швидкості газу, m/s ;

ω - лагранжева частота пульсацій, s^{-1} ;

ω - кутова швидкість криволінійного турбулентного потоку газу, m/s ;

R - радіус криволінійного турбулентного потоку газу, m .

Початкові умови $t = 0$, $v = 0$.

Розв'язком рівняння є:

$$v = \frac{V \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} + \frac{\omega \tau V}{1 + \omega^2 \tau^2} e^{-t/\tau} - \tau \omega^2 R \quad (3.2)$$

Для знаходження середнього значення швидкості руху частинки усереднимо рішення за періодом пульсацій. Перший періодичний член в правій частині рішення при цьому дає нуль, а другий неперіодичний член для дрібних частинок з $\tau < T$ швидко прямує до нуля і, як нестаціонарна складова швидкості, повинен бути відкинутий. У результаті для середньої швидкості руху частинок до стінки пиловловлювача V_s отримуємо вираз:

$$V_s = \tau \omega^2 R \quad (3.3)$$

Другий процес – безладна міграція частинок разом з пульсаційними молями, які їх несуть, представляє вияв турбулентної дифузії частинок, інтенсивність якої залежить як від швидкості їх руху під дією відцентрових сил, так і від маси частинок.

Оскільки жодних непроникних перегородок між пульсаційними молями немає, то в результаті руху частинок до стінки циклона підвищується їх концентрація у напрямку до стінки, проте безладні рухи молей перешкоджають цьому, хоча їх періодичність і амплітуда в середньому одна і та ж. Це пояснюється тим, що в молях, що рухаються від стінки, вміст завислих частинок вищий, ніж тих, що рухаються до стінки.

Зважаючи на появу пов'язаного з описаним ефектом зворотного дифузійного потоку частинок, ефективне значення швидкості руху частинок до стінки циклону в турбулентному потоці виявляється завжди нижчим, ніж у ламінарному потоці і може знизитися аж до нуля.

Якщо частинки дуже малі і в силу цього їх рух практично нічим не відрізняється від руху вихорів газу, що їх несе, то для них має місце рівність коефіцієнтів турбулентної дифузії частинок D_t і середовища D_{tg}

$$D_t = D_{tg} \quad (3.4)$$

де: D_t і D_{tg} – коефіцієнти турбулентної дифузії відповідно частинок і середовища й для них дійсними є всі закони турбулентної дифузії суцільного середовища, m^2/s :

закон розсіювання (випадкового блукання) дифундуючих частинок

$$y^2 = 2D_t t, \quad (3.5)$$

де: y – відстань до стінки, м;

t – час проведення дослідження, відповідно до якого середньоквадратичне зміщення частинки пропорційне кореню квадратному з часу зміщення, с.

- феноменологічний закон дифузії (перший закон Фіка), згідно з яким дифузійний потік зважених частинок (j) через поверхню, яку розглядаємо, є пропорційний коефіцієнту дифузії і градієнту вагової або розрахункової концентрації суспензії (c):

$$j = -D_t dc/dy, \quad (3.6)$$

де j – дифузійний потік зважених частинок, м/с;

c – концентрація, мг/м³;

- закон конвективної дифузії частинок, який фіксує факт рівності кількості домішок, що вносяться в елементарний об'єм, який розглядається рухомим потоком газу, і кількості домішок, які дифундують з нього при стаціонарному режимі.

Коефіцієнт турбулентної дифузії (D_t) визначається за формулою:

$$D_t = \frac{V^2}{\omega^2 T} \quad (3.7)$$

де: V – амплітуда поперечної складової пульсації швидкості газу, м/с;

ω – лагранжева частота пульсацій, с⁻¹;

T – період пульсацій.

Визначення нульовим ефективного значення швидкості руху частинок до стінки циклону означає рівність потоків: зворотного дифузійного й відцентрового. У цьому випадку алгебраїчна сума відцентрового і зворотного дифузійного потоків частинок дорівнює нулю:

$$cV_s + D_t dc/dy = 0, \quad (3.8)$$

звідки після інтегрування з граничними умовами $y = y_0$, $c = c_0$ отримуємо:

$$c = c_0 + [\exp(-yV_s/D_t) - \exp(-y_0V_s/D_t)] \quad (3.9)$$

Якщо частинки великодисперсні, то процес їх руху під дією відцентрової сили відбувається інакше. Маючи високу відцентрову швидкість, вони в ході процесу руху не залишаються всередині вихідного вихору газу, а залишають його і перетинають безліч інших вихорів, що випадково зустрілись. При цьому:

а) швидкість відцентрового руху частинок виявляється нижчою за значення, що отримуються за формулою (3.3) через порушення стоксівського лінійного закону опору частинок;

б) значення коефіцієнта турбулентної дифузії частинок виявляється нижчим за значення, що отримуються за формулою (3.7) через зменшення дифузійного кроку ($\frac{V}{\omega}$), який викликається переходом частинки в інший вихор.

Частинки пилу меншої маси, які не можуть досягти поверхні циліндричної частини корпусу через опір повітря, рухаються до жалюзійного відокремлювача, де відбувається вторинне очищення повітря при проходженні його через отвори між жалюзі: повітря огинає жалюзі, а тверді частинки пилу через свою інертність стикаються з ними, відбиваються і рухаються вздовж жалюзі до пиловипускного патрубку.

Для математичного опису процесу пилоочистки необхідно розробити математичні моделі руху двофазних дисперсних турбулентних течій у пристінній області стаціонарного турбулентного потоку як у циліндричній частині корпусу, так і біля жалюзійного відокремлювача.

Розрахунок двофазної течії повинен містити моделювання переносу маси та імпульсу для кожної з фаз, а також їх міжфазну взаємодію. Основні принципові труднощі, що виникають при побудові теорії двофазних дисперсних турбулентних потоків, пов'язані з турбулентним характером руху середовища і взаємодією частинок як між собою так і з поверхнями, які їх обмежують. Перш за все необхідно відзначити, що до цього часу далекою від завершення є побудова моделі руху однофазних турбулентних потоків.

Існуючі методи розрахунку двофазних дисперсних турбулентних течій можуть бути розділені на дві групи. До першої групи належать роботи, які базуються на лагранжевому траєкторному описанні дисперсної фази - вирішенні рівнянь руху і енергії вздовж траєкторій руху окремих частинок. Облік в рамках такого підходу до випадкового характеру руху частинок, який обумовлений взаємодією з турбулентними вихорами потоку, який переносить, в результаті інтегрування динамічних стохастичних рівнянь типу Ланжевена вздовж індивідуальних траєкторій руху з подальшим осередненням рішень за ансамблем початкових даних, призводить до істотного збільшення обсягу розрахунків через те, що для отримання статистично достовірної інформації необхідно використовувати досить велику кількість реалізацій. Детермінований лагранжевий опис руху дисперсної фази в турбулентному потоці на підставі рішення рівнянь тільки для середніх величин, тобто без урахування взаємодії з випадковими полями пульсацій швидкості, може бути виправданим (хоча і не завжди) тільки для дуже інерційних частинок, час релаксації яких набагато більший інтегрального масштабу турбулентності і які тому слабо залучаються до турбулентного руху. Зі зменшенням розміру частинок репрезентативне число реалізацій має зростати, тому що збільшується внесок взаємодії частинок з вихорами все менших розмірів. Трудомісткість динамічного лагранжевого моделювання значною мірою збільшується у висококонцентрованих дисперсних потоках внаслідок зростання «заплутаності» траєкторій через зіткнення частинок, а також при зміні їх числа (народження або зникнення частинок в результаті коагуляції, дроблення, спонтанного утворення, тощо). Лагранжевий траєкторний підхід дозволяє отримувати детальну інформацію про взаємодію частинок з турбулентними вихорами, зі стінками і один з одним, однак вимагає дуже великих витрат часу при розрахунках складних течій, які зустрічаються в природних або промислових умовах.

Інший метод моделювання заснований на ейлеровому континуальному описі обох фаз – на, так званих, дворідинних моделях в рамках механіки взаємопроникних гетерогенних середовищ.

Істотною перевагою ейлерового континуального підходу в порівнянні з лагранжевим траєкторним моделюванням є використання балансних рівнянь одного типу для обох фаз і, відповідно, єдиного алгоритму розв'язання всієї системи рівнянь. Крім того, опис динаміки дуже дрібних частинок не викликає ніяких принципових труднощів, тому що при прагненні маси частинки до нуля здійснюється граничний перехід до задачі про турбулентну дифузію без інерційної (пасивної) домішки. І, нарешті, облік зіткнень і зміни числа частинок в рамках континуального підходу не призводить до такого значного зростання обсягу і ускладнення розрахунків, як при лагранжевому моделюванні.

У цілому, лагранжевий траєкторний і ейлеровий континуальний методи моделювання доповнюють один одного, але кожний з них має свої переваги і недоліки, а, отже, свої галузі застосування. Лагранжевий метод можна застосовувати для істотно неврівноважених течій (великі інерційні частинки, розріджені дисперсні середовища), а ейлеровий метод справедливий в умовах, близьких до рівноважних (дрібні малоінерційні частинки, концентровані дисперсні середовища). Оскільки дисперсна фаза має одночасно властивості континууму і дискретних частинок, ситуація з цими двома підходами трохи нагадує відомий дуалізм «хвиля-частинка» у мікросвіті. Тому Pialat et al. (290 2005) запропонували гібридний лагранжево-ейлеровий метод, який поєднує детальність лагранжевого і ефективність ейлерового підходів до опису дисперсної фази.

Найбільш точна і детальна інформація про структуру турбулентного двофазного потоку може бути отримана на основі застосування методу прямого моделювання для несучого суцільного середовища в поєднанні з лагранжевим стохастичним підходом для дисперсної фази. При прямому моделюванні описується весь спектр турбулентних вихорів, включаючи

дрібномасштабні, які відповідають за дисипацію енергії турбулентності. У методі великих вихорів проводиться пряме моделювання тільки великих вихорів, просторовий масштаб яких перевищує розмір чисельної сітки, а дрібномасштабні (підсіточні) моди опиняються поза межою розв'язку та описуються напівемпіричним шляхом. Метод великих вихорів застосовується для моделювання поведінки частинок, час динамічної релаксації яких набагато більший тимчасового мікрмасштабу турбулентності (Armenio et al. 1999; Boivin et al. 2000; Yamamoto et al., 2001; Kuerten & Vreman, 2005; Fede & Simonin, 2006). Це обмеження випливає з вимоги, щоб внесок підсіткових флуктуацій (тобто дрібномасштабної турбулентності) до статистики дисперсної фази був значно малий і визначальну роль відігравала взаємодія частинок з великомасштабними енергмісткими турбулентними вихорами. Однак навіть застосування методу великих вихорів для суцільного середовища в поєднанні з лагранжевим стохастичним підходом для дисперсної фази все одно може виявитися малоефективним методом для практичних додатків через необхідність обробки великих обсягів інформації, що є дуже дорогим інструментом. Тому в ряді робіт (Druzhinin & Elghobashi, 1998; Ferry & Balachandar, 2001, 2005; Pandya & Mashayek, 2002a; Rani & Balachandar, 2003; Kaufman et al., 2004; Moreau et al., 2005) розвиваються перспективні методи, які засновані на використанні двох методів у рамках континуального дворідинного підходу. Ефективним базисом для розвитку прямих континуальних і комбінованих лагранжево-ейлерових методів моделювання дисперсних течій є теоретичний формалізм, який полягає в розкладанні поля швидкості частинок в турбулентному потоці на «коррельовану» і «квазіброунівську» складові (Simonin et al., 2002; Fevrier et al., 2005).

При моделюванні руху частинок в розрідженому дисперсному середовищі, тобто при невеликій об'ємній концентрації дисперсної фази, основна увага повинна приділятися взаємодії частинок з турбулентними вихорами потоку, який переносить, оскільки роль взаємодії частинок між

собою незначна. Однак з підвищенням концентрації та розміру частинок зростає внесок міжчасткових взаємодій у перенесення імпульсу і енергії дисперсної фази. Хаотичний рух частинок, який обумовлений їх взаємодією, отримав назву псевдотурбулентності (щоб відрізнити від турбулентного руху частинок, який пов'язаний з їх залученням у турбулентний рух потоку, що переносить). Причиною виникнення псевдотурбулентних флуктуацій може бути як гідродинамічна взаємодія між частинками, що реалізовується за допомогою обміну імпульсом та енергією з випадковими полями швидкості і тиску навколишнього середовища (Buyevich, 1972b; Koch, 1990), так і безпосередня взаємодія в результаті зіткнень. Зі зростанням концентрації і розміру частинок роль обміну імпульсом та енергією між ними в результаті зіткнень в порівнянні з гідродинамічною взаємодією зростає. Процеси взаємодії частинок з турбулентними вихорами і міжчасткових зіткнень можна вважати статистично незалежними тільки у випадку дуже інерційних частинок, час динамічної релаксації яких набагато більший характерного часу взаємодії з турбулентними вихорами і тому їх відносний рух некорельований і аналогічний хаотичному руху молекул. У разі малоінерційних частинок необхідно враховувати взаємний вплив взаємодій «частинка-турбулентність» і «частинка-частинка».

Як вже зазначалося, розрахункові труднощі лагранжевого траєкторного моделювання різко зростають зі збільшенням концентрації дисперсної фази, що пов'язано, в першу чергу, з необхідністю одночасного розрахунку траєкторій дуже великого числа частинок, які беруть участь у ситуації, що розігрується. Ефективний спосіб подолання цих труднощів був запропонований Oesterle & Petitjean (1991, 1993), Sommerfeld & Zivkovic (1992), Sommerfeld (1999) шляхом заміни колективу частинок, які стикаються, моделюванням руху зразкової частинки з введенням щільності та ймовірності зіткнень з фіктивними (віртуальними) частинками. Ефективним підходом для моделювання зіткнень частинок є також застосування методу Монте-Карло (Tanaka et al., 1991; Fede et al., 2002;

Moreau et al., 2004). Однак і в цих підходах зі збільшенням концентрації частинок необхідна кількість розрахункових траєкторій для отримання статистично достовірного ансамблю реалізацій має зростати. Тому сфера застосування ейлерового континуального методу моделювання розширюється зі зростанням концентрації дисперсної фази, коли збільшується частота міжчасткових зіткнень.

3.2. Динаміка руху частинок у пристінній області стаціонарного турбулентного потоку

Проведемо аналіз динаміки руху частинок у пристінній області стаціонарного турбулентного потоку. При великих числах Рейнольдса в пристінній області можуть бути виділені дві зони, які кардинально відрізняються своїми характеристиками: в'язкий підшар і рівноважний логарифмічний шар. З метою виявлення ефектів розглянемо деякі модельні завдання, які ілюструють особливості поведінки частинок у в'язкому і логарифмічних зонах.

Пристінкова область, що включає в'язкий підшар. У в'язкому підшарі, що безпосередньо примикає до стінки, роль в'язких напружень виявляється переважаючою у порівнянні з турбулентними напруженнями. Тому визначальними параметрами у в'язкому підшарі є коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини ν і динамічна швидкість (швидкість тертя) u^* . Поза областю в'язкого підшару внесок в'язких напружень в повні напруги суцільного середовища, навпаки, незначний і в якості найпростішої апроксимації пульсаційної структури потоку, який переносить, в пристінній області приймемо найпростішу двозонову модель [33, 34], яка складається з в'язкого підшару з нульовою інтенсивністю пульсацій і турбулентної зони з постійною інтенсивністю пульсацій

$$\langle u'_i u'_j \rangle = A_{ij} u_*^2 H(y - \delta) \quad (3.10)$$

де y - відстань від стінки;

A_{ij} - постійні коефіцієнти.

Товщина в'язкого підшару δ дорівнює

$$\delta = \delta_+ \frac{v}{u_*}, \quad (3.11)$$

де $\delta_+ = \text{const.}$

Передбачається також, що тимчасовий масштаб турбулентності Лагранжа поблизу стінки має постійне значення

$$T_L = T_+ \frac{v}{u_*^2}, \quad (3.12)$$

де $T_+ = \text{const.}$

Далі приймемо, що осереднене ковзання частинок щодо несучого потоку є відносно невеликим, тому впливом ефекту перетину траєкторій на час взаємодії частинок з турбулентними вихорами можна знехтувати. Оскільки ми також не враховуємо зворотний вплив на потік, який переносить, зіткнення частинок система рівнянь, в яку входять рівняння збереження маси, баланс кількості руху для інших моментів пульсацій швидкості частинок (турбулентних напруг дисперсної фази) тензор турбулентної дифузії частинок розщеплюється: концентрація Φ і інтенсивність поперечкових пульсацій $\langle v_y'^2 \rangle$ можуть бути знайдені незалежно від інших гідродинамічних характеристик дисперсної фази. Для гідродинамічно-розвиненої течії, властивості якої змінюються тільки в нормальному напрямку та за відсутності осадження частинок, отримуємо наступні рівняння для визначення Φ і $\langle v_y'^2 \rangle$:

$$\Phi \frac{d\langle v_y'^2 \rangle}{dy} + \left(\langle v_y'^2 \rangle + g_u A_{yy} u_*^2 H(y - \delta) \right) \frac{d\Phi}{dy} = 0, \quad (3.13)$$

$$\tau_p^2 \frac{d}{dy} \left[\Phi \left(\langle v_y'^2 \rangle + g_u A_{yy} u_*^2 H(y - \delta) \right) \frac{d\langle v_y'^2 \rangle}{dy} \right] + 2\Phi \left(f_u A_{yy} u_*^2 H(y - \delta) - \langle v_y'^2 \rangle \right) = 0 \quad (3.14)$$

У відповідності з експериментальними даними приймемо $A_{yy} = 1$ і перейдемо до безрозмірних змінних

$$\langle v_{y+}^2 \rangle = \frac{\langle v_{y+}^2 \rangle}{u_*^2}, \quad \lambda = \frac{y}{\delta} = \frac{y_+}{\delta_+}, \quad y_+ = \frac{yu_*}{v}, \quad \tau_* = \frac{\tau_p u_*}{\delta} = \frac{\tau_+}{\delta_+}, \quad \tau_+ = \frac{\tau_p u_*^2}{v}.$$

Рівняння (3.13) і (3.14) у нових змінних приймуть вигляд

$$\Phi \frac{d\langle v_{y+}^2 \rangle}{d\lambda} + \left(\langle v_{y+}^2 \rangle + g_u H(\lambda - 1) \right) \frac{d\Phi}{d\lambda} = 0, \quad (3.15)$$

$$\tau_*^2 \frac{d}{d\lambda} \left[\Phi \left(\langle v_{y+}^2 \rangle + g_u H(\lambda - 1) \right) \frac{d\langle v_{y+}^2 \rangle}{d\lambda} \right] + 2\Phi \left(f_u H(\lambda - 1) - \langle v_{y+}^2 \rangle \right) = 0. \quad (3.16)$$

Граничні умови для (3.15) і (3.16) за відсутності осадження частинок на стінці, задаються у вигляді

$$\tau_* \frac{d\langle v_{y+}^2 \rangle}{d\lambda} = 2 \frac{1 - e_y^2}{1 + e_y^2} \left(\frac{2\langle v_{y+}^2 \rangle}{\pi} \right)^{1/2} \quad \text{при } \lambda = 0;$$

$$\frac{d\langle v_{y+}^2 \rangle}{d\lambda} = 0, \quad \Phi = 1 \quad \text{при } \lambda = \infty \quad (3.17)$$

Нехтуючи впливом інерційності частинок на час їх взаємодії з турбулентними вихорами, покладемо T_{Lp} таким, що дорівнює лагранжевому масштабу, де приймемо $T_+ = \delta_+$. Тоді коефіцієнти залучення дорівнюють

$$f_u = \frac{1}{1 + \tau_*}, \quad g_u = \frac{1}{\tau_*(1 + \tau_*)}.$$

Приймаючи до уваги (3.15), рівняння (3.16) може бути перетворено до вигляду

$$\tau_*^2 \left(\langle v_{y+}^2 \rangle + g_u H(\lambda - 1) \right) \frac{d^2 \langle v_{y+}^2 \rangle}{d\lambda^2} + 2 \left(f_u H(\lambda - 1) - \langle v_{y+}^2 \rangle \right) = 0, \quad (3.18)$$

що дозволяє знайти (v_{y+}^2) незалежно від Φ .

Побудуємо рішення рівняння (3.18) в областях $0 < \lambda < 1$ і $1 < \lambda < \infty$, а потім «зшиємо» ці рішення.

У зоні в'язкого підшару ($0 < \lambda < 1$) рівняння (3.18) зводиться до

$$\langle v_{y+}^2 \rangle \left(\frac{d^2 \langle v_{y+}^2 \rangle}{d\lambda^2} - \frac{2}{\tau_*^2} \right) = 0. \quad (3.19)$$

Рішенням (3.19) з урахуванням (3.17) буде

$$\langle v_{y+}^{\prime 2} \rangle = 0 \text{ при } 0 < \lambda < \lambda_0, \quad \langle v_{y+}^{\prime 2} \rangle = \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{\tau_*^2} \text{ при } \lambda_0 < \lambda < 1 \quad (3.20)$$

або

$$\langle v_{y+}^{\prime 2} \rangle = \langle v_{y+}^{\prime 2}(0) \rangle + \frac{2(1 - e_y^2)}{\tau_*(1 + e_y^2)} \left(\frac{2\langle v_{y+}^{\prime 2}(0) \rangle}{\pi} \right)^{1/2} \lambda + \frac{\lambda^2}{\tau_*^2} \text{ при } 0 < \lambda < 1. \quad (3.21)$$

Рішення (3.20) має місце при $\tau_* < \tau_{cr}$, а (3.21) реалізується при $\tau_* > \tau_{cr}$. Критичне значення τ_{cr} параметра інерційності τ_* є точкою біфуркації і відповідає умові $\lambda_0 = 0$. У турбулентній зоні ($1 < \lambda < \infty$) рівняння (3.18) записується як

$$\tau_*^2 \frac{d^2 \langle v_{y+}^{\prime 2} \rangle}{d\lambda^2} + \frac{2(f_u - \langle v_{y+}^{\prime 2} \rangle)}{\langle \langle v_{y+}^{\prime 2} \rangle + g_u \rangle} = 0 \quad (3.22)$$

Для побудови аналітичного рішення лінеарізуємо (3.22), приймаючи в знаменнику другого члена $(v'y^2) = [(v'y^2)(1)]$. В результаті отримаємо наближений розв'язок рівняння (3.21)

$$\langle v_{y+}^{\prime 2} \rangle = \langle \langle v_{y+}^{\prime 2}(1) \rangle - f_u \rangle \exp \left[- \frac{2^{1/2}(\lambda - 1)}{\tau_* \langle \langle v_{y+}^{\prime 2}(1) \rangle + g_u \rangle^{1/2}} \right] + f_u \text{ при } 1 < \lambda < \infty. \quad (3.23)$$

Умови зшивання рішень у в'язкому і турбулентній зонах мають вигляд

$$\langle v_{y+}^{\prime 2}(1) \rangle \left(\frac{d\langle v_{y+}^{\prime 2} \rangle}{d\lambda} \right)_{1-0} = \langle \langle v_{y+}^{\prime 2}(1) \rangle + g_u \rangle \left(\frac{d\langle v_{y+}^{\prime 2} \rangle}{d\lambda} \right)_{1+0}. \quad (3.24)$$

З (3.20), (3.23) і (3.24) впливають наступні співвідношення для визначення $[(v'y^2)(1)]$ та λ_0 при $\tau_* < \tau_{cr}$:

$$\lambda_0 = 1 - \tau_* \langle v_{y+}^{\prime 2}(1) \rangle^{1/2}. \quad (3.25)$$

З (3.21), (3.23) і (3.24) виходять співвідношення для знаходження $[(v'y^2)(1)]$

$$\begin{aligned} (f_u - \langle v_{y+}^{\prime 2}(1) \rangle) \langle \langle v_{y+}^{\prime 2}(1) \rangle + g_u \rangle^{1/2} &= \langle v_{y+}^{\prime 2}(1) \rangle \left[\frac{2^{1/2}}{\tau_*} + \frac{2(1 - e_y^2)}{\pi^{1/2}(1 + e_y^2)} \langle v_{y+}^{\prime 2}(0) \rangle^{1/2} \right], \\ \langle v_{y+}^{\prime 2}(0) \rangle^{1/2} &= - \frac{1 - e_y^2}{\tau_*(1 + e_y^2)} \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} + \left[\frac{2(1 - e_y^2)^2}{\pi(1 + e_y^2)^2 \tau_*^2} + \langle v_{y+}^{\prime 2}(1) \rangle - \frac{1}{\tau_*^2} \right]^{1/2}. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Критичний параметр інерційності визначається зі співвідношення $\tau_{cr}^2 [(v'_{y+}(0))^2] = 1$ і не залежить від коефіцієнта відновлення імпульсу e_y і дорівнює 2,81.

Розподіл концентрації частинок, який задовольняє умові $\Phi(\infty) = 1$, визначається інтегралом рівняння (3.15) і описується виразом

$$\Phi = \begin{cases} \langle v_{y+}^{\prime 2}(1) \rangle [\tau_* \langle v_{y+}^{\prime 2}(1) \rangle + g_u \langle v_{y+}^{\prime 2} \rangle]^{-1} & \text{при } \lambda < 1, \\ [\tau_* \langle v_{y+}^{\prime 2} \rangle + g_u]^{-1} & \text{при } \lambda > 1. \end{cases} \quad (3.27)$$

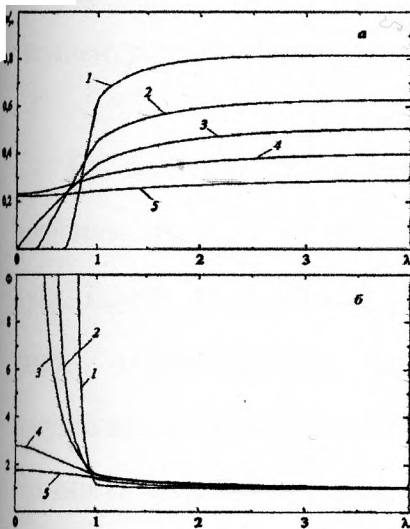


Рисунок 3.1. Розподіл пульсацій поперечної швидкості (а) і концентрації (б) частинок у пристінній області.

(рисунок 3.1) і прагне до однорідного розподілу.

Концентрація частинок поблизу стінки різко зростає, тобто спостерігається акумулювання їх у зоні в'язкого підшару. Явище акумулювання частинок у неоднорідних турбулентних потоках пояснюється їх турбулентною міграцією (турбофором) з області з високою інтенсивністю турбулентних пульсацій швидкості в зону з низьким ступенем турбулентності (зокрема, у в'язкий підшар на поверхні, що обтікається). Теоретична інтерпретація цього феномена була дана Carotoloni et al (1975) та Reeks (1983).

Рисунок 3.2 демонструє вплив інерційності частинок на значення інтенсивності пульсацій швидкості і концентрації частинок на стінці.

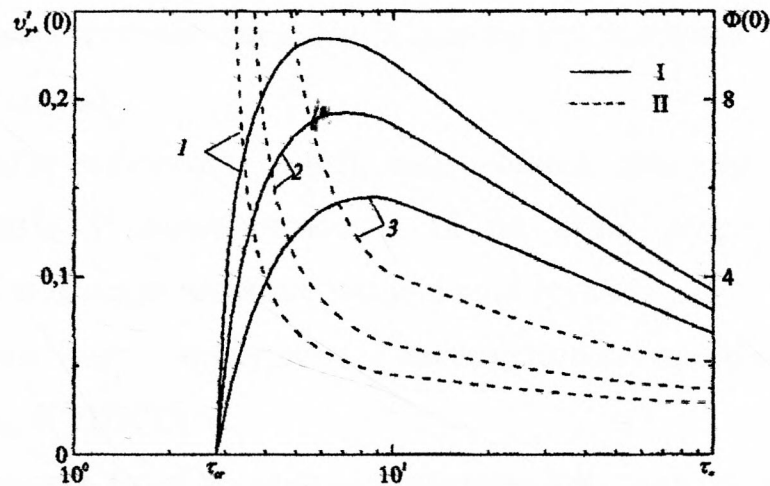


Рисунок 3.2. Залежності інтенсивності пульсацій швидкості 1 та концентрації 2 частинок на стінці від параметра інерційності: 1 — $e_y = 0,5$; 2 — $e_y = 0,8$; 3 — $e_y = -1,0$

Як бачимо, пульсаційна енергія малоінерційних частинок на стінці дорівнює нулю, а інтенсивність пульсацій інерційних частинок відмінна від нуля. Ефект ненульових пульсацій швидкості у в'язкому підшарі і на самій стінці обумовлений дифузійним механізмом перенесення пульсацій інерційними частинками з турбулентної області потоку. Звертає на себе увагу наявність максимуму в залежності $v'_{y+}(0)$ від τ , що пояснюється збільшенням ролі дифузійного перенесення пульсацій з турбулентної області в зону в'язкого підшару. Зниження $v'_{y+}(0)$ з ростом τ після досягнення максимуму пов'язано зі зниженням інтенсивності пульсацій швидкості дисперсної фази, тому що більш інерційні частинки гірше залучаються до турбулентного руху суцільного середовища.

Концентрація частинок на стінці зводиться в нескінченність при $\tau < \tau_{cr}$ і прагне до одиниці при $\tau \rightarrow \infty$. Зі зменшенням коефіцієнту відновлення імпульсу e_y , інтенсивність пульсацій падає, а ефект акумулювання частинок у в'язкому підшарі дещо зростає.

Аналіз інтенсивності пульсацій швидкості та концентрації частинок на стінці при різних значеннях параметра інерційності (розміру частинок) дозволяє запропонувати нову конструкцію відцентрово-інерційного пиловловлювача зі зміною кута атаки жалюзі, яка буде наведена в наступному розділі. Концентрація частинок поблизу стінки визначає

кількість зіткнень і ступінь зменшення швидкості частинок при цьому з поверхнею і між собою.

Наведені вище залежності дають змогу більш детально вивчити рух повітряних потоків у пиловловлювачі та на етапі розроблення нової конструкції його відкинути завідомо невдалі конструкції.

Моделювання будемо проводити з використанням програмного пакету FlowVision компанії "ТЕСИС».

Для дослідження було розроблено твердотільну модель конструкції з наступними розмірами:

- діаметр циліндричної частини – 0,5м;
- висота циліндричної частини – 0,75м;
- висота конічної частини – 0,56м;
- діаметр пило випускного отвору – 0,07м;
- висота вхідного патрубку – 0,23м;
- ширина вхідного патрубку – 0,15м;
- діаметр вихлопної труби – 0,2м.

Апарат розроблено з тангенціальним входом. Розглядалося три варіанти виконання пиловловлювача. Перший – з трьохкаскадним жалюзійним відокремлювачем (рисунок 3.3а) і зі змінним кутом атаки жалюзі. У цій конструкції жалюзійний відокремлювач закритий з нижнього краю. Другий – з тим же жалюзійним відокремлювачем, але відкритим з нижнього кінця (рисунок 3.3б). Для порівняння з традиційними апаратами – третю модель виконано з класичною вихлопною трубою (рисунок 3.3в).

На рисунку 3.3 представлено траєкторії руху повітряних потоків у апаратах трьох описаних вище конструкцій.

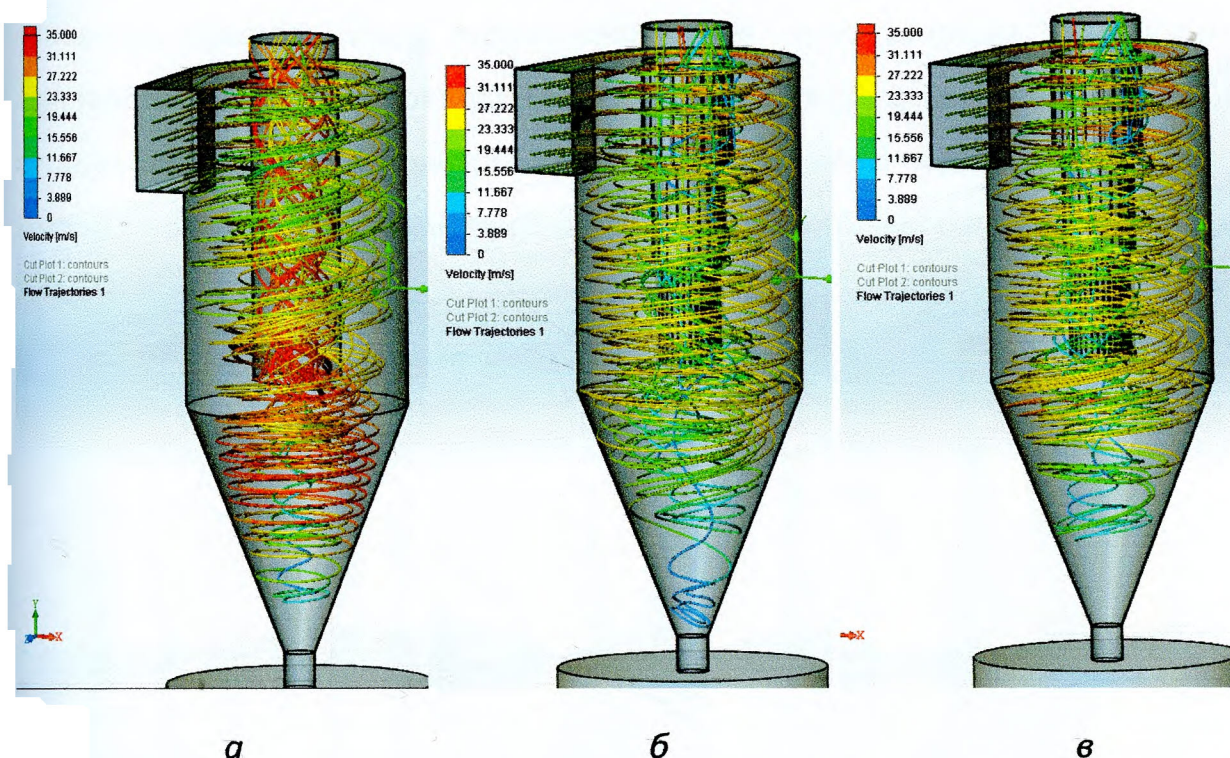


Рисунок 3.3. Траєкторії руху повітряних потоків у пиловловлювачі

Проведений аналіз дає змогу чіткіше описати аеродинаміку процесу розділення пилоповітряного потоку у розробленому нами апараті. Пилоповітряний потік потрапляє у пиловловлювач через тангенціальний вхідний патрубок зі швидкістю 18 м/с, що є рекомендованим значенням для апаратів такого класу. Далі потік починає обертатися у просторі між вихлопним патрубком очищеного повітря або жалюзійним відокремлювачем і зовнішньою стінкою апарата, рухаючись донизу. Внизу конічної частини апарата потік здійснює поворот на 180° , підіймається вгору і, продовжуючи обертатися, виходить у атмосферу через патрубок виходу очищеного повітря. Негативною особливістю пиловловлювача з традиційною вихлопною трубою є те, що поблизу нижнього краю вихлопної труби спостерігаються пилоповітряні потоки з високими швидкостями (рисунок 3.3в). Дрібні малоінерційні частинки пилу захоплюються цими потоками і через вихлопну трубу потрапляють в атмосферу. При використанні ступеневого жалюзійного відокремлювача повітряний потік більш рівномірно заповнює циліндричну частину апарата (рисунок 3.3.а,б). У багатьох публікаціях вказується про визначальний вплив циліндричної частини циклона на ефективність процесу

очищення повітря. Тому розглянемо, яким буде розподіл абсолютних швидкостей повітряного потоку і значення статичного тиску. На рисунку 3.4. представлено розподіл значення абсолютної швидкості повітряного потоку у кожній точці перерізу, який проходить через вісь пиловловлювача (рисунок 3.4).

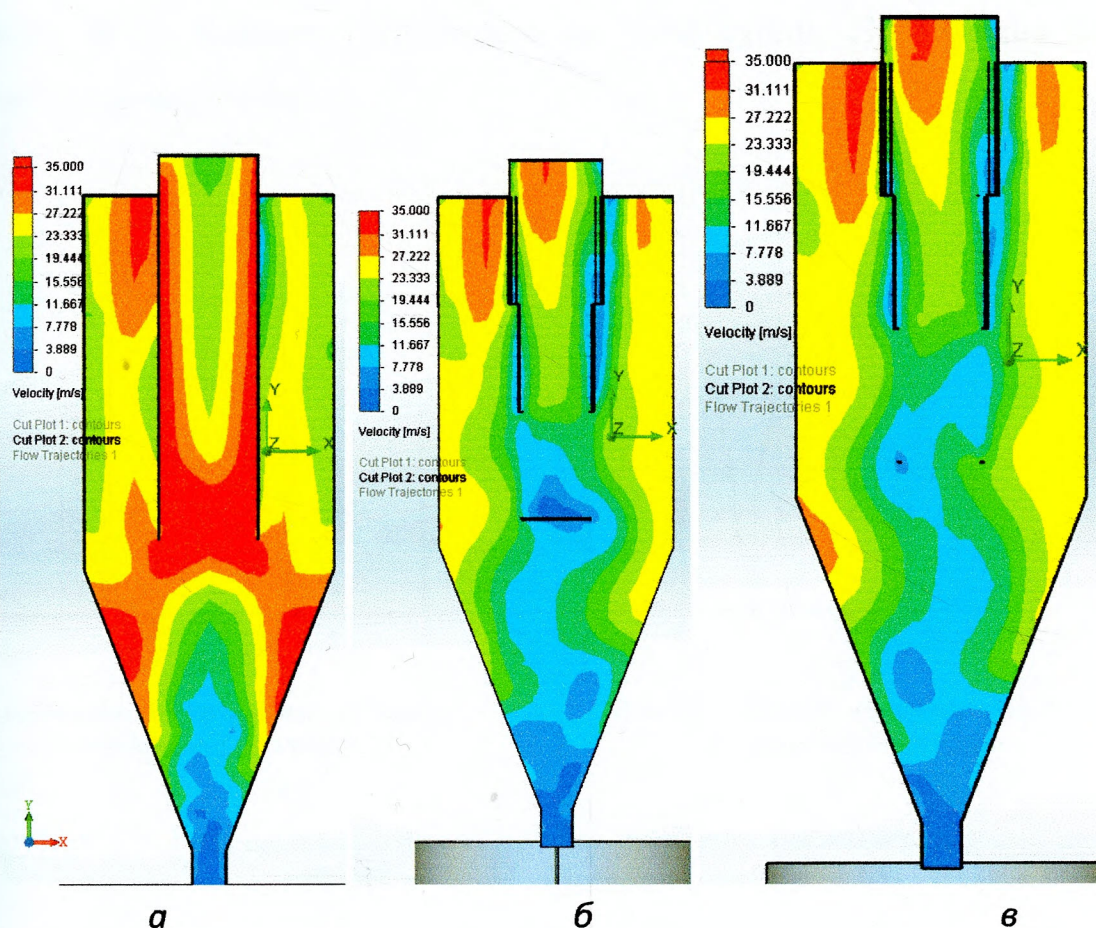


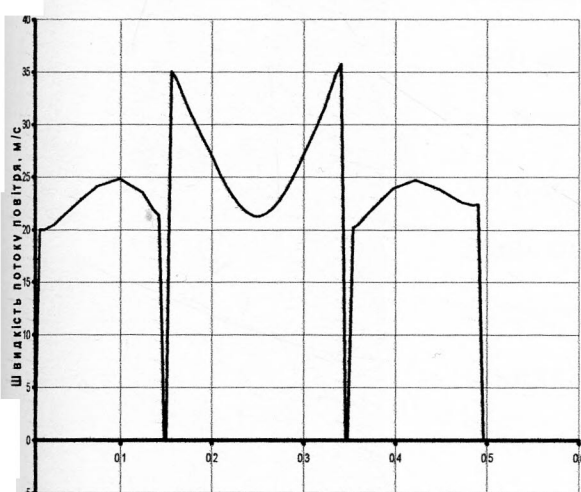
Рисунок 3.4. Розподіл значень швидкостей повітряного потоку

У пристінній зоні пиловловлювача з жалюзійним відокремлювачем значення швидкості потоку повітря більш рівномірне (рисунок 3.4а,б). Наявність традиційної вихлопної труби спричиняє чисельні зміни значення швидкості (рисунок 3.4в).

Особливо слід відмітити особливості зміни швидкості потоку у конічній частині. Використання жалюзійного відокремлювача розробленої конструкції дає змогу значно знизити значення швидкості потоку повітря у конусі, що

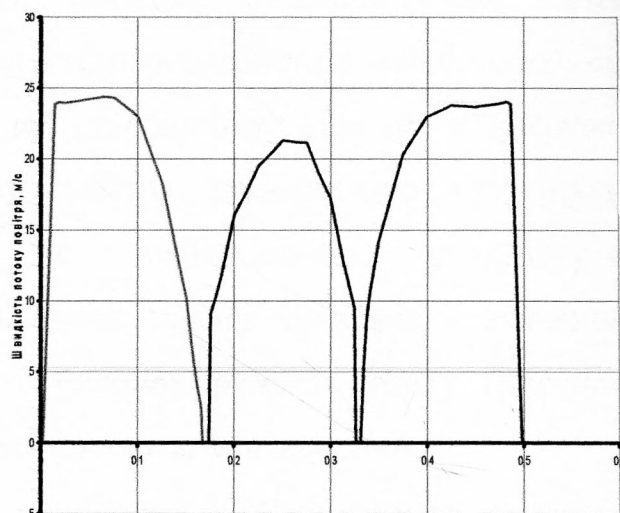
усуває можливість захоплення частинок пилу висхідними повітряними потоками і дає змогу підвищити ефективність процесу очищення повітря.

На рисунку 3.5 представлено графіки зміни швидкості потоку повітря у перерізі, який розміщений на середині циліндричної частини апарату. На осі абсцис відкладено відстань між протилежними стінками циліндричної частини. За 0 прийнято положення на лівій стінці. Протилежна стінка відповідає положенню 0,5м.



Відстань між протилежними стінками
циліндричної частини, м

а



Відстань між протилежними стінками
циліндричної частини, м

б

Рисунок 3.5. Розподіл швидкості потоку повітря у горизонтальному перерізі циклона

В апараті з традиційною вихлопною трубою значення швидкості потоку повітря у сепараційній зоні змінюється у діапазоні від 20 до 25 м/с (рисунок 3.5б). Поблизу стінок циліндричної частини та вихлопної труби швидкість, внаслідок ефекту прилипання, знижується до 0 м/с.

У сепараційній зоні апарата з жалюзійним відокремлювачем запропонованої конструкції швидкість потоку повітря більш рівномірно розподілена (рисунок 3.5а) і складає близько 24 м/с.

Позитивним є той факт, що свого максимуму значення швидкості потоку повітря набуває у безпосередній близькості від зовнішньої стінки.

При цьому на частинку пилу, діє стала відцентрова сила, яка не зменшується з віддаленням частинки від осі циклона, як це спостерігається у

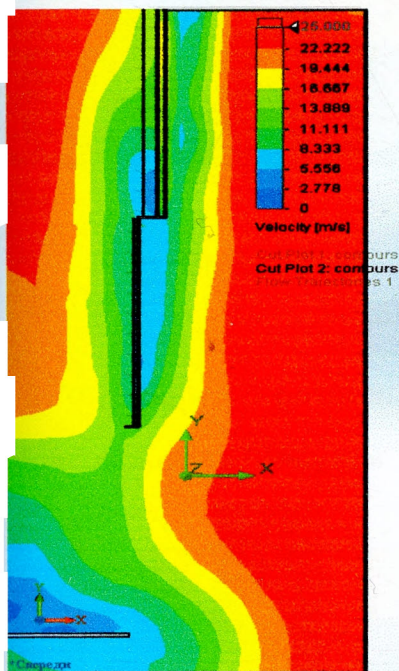
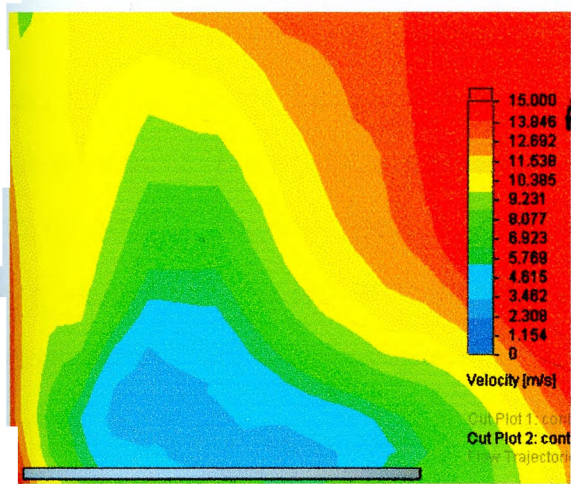


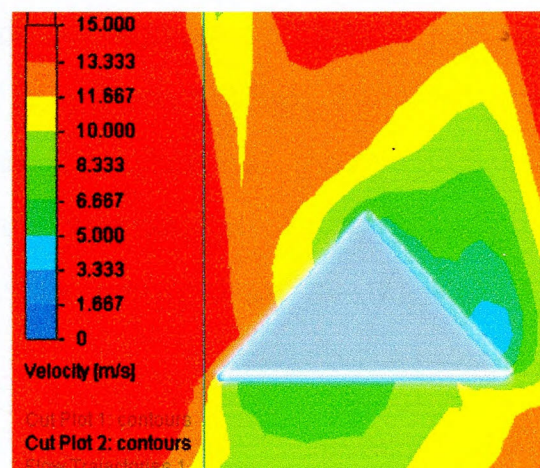
Рисунок 3.6. Значення швидкостей повітряного потоку поблизу жалюзійного відокремлювача

апаратах з традиційною трубою. Застосування жалюзійного відокремлювача, розробленої нами конструкції, позитивно впливає на процес очищення повітря: пилоповітряний потік потрапляє у відокремлювач по всій його висоті, а тому не створюється ділянок з високою швидкістю повітря. Завдяки зміні кута атаки жалюзі по всій висоті жалюзійного відокремлювача наявні рівномірні значення швидкості пилоповітряного потоку (рисунок 3.6), які дорівнюють, близько, 3 м/с.

На рисунку 3.7 наведено розподіл швидкостей пилоповітряного потоку поблизу дна жалюзійного відокремлювача. В пиловловлювачі з закритим знизу жалюзійним відокремлювачем (рисунок 3.7а) спостерігаються швидкості повітряного потоку, які є близькими до 0 м/с, що сприяє накопиченню у цих місцях дрібнодисперсного пилу. Для усунення такого явища пропонується виконати дно жалюзійного відокремлювача конічним. Розподіл швидкостей повітряних потоків біля такого дна зображено на рисунку 3.7б.



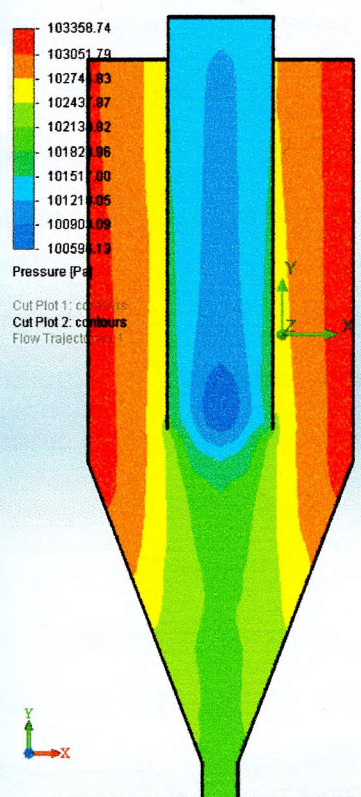
а



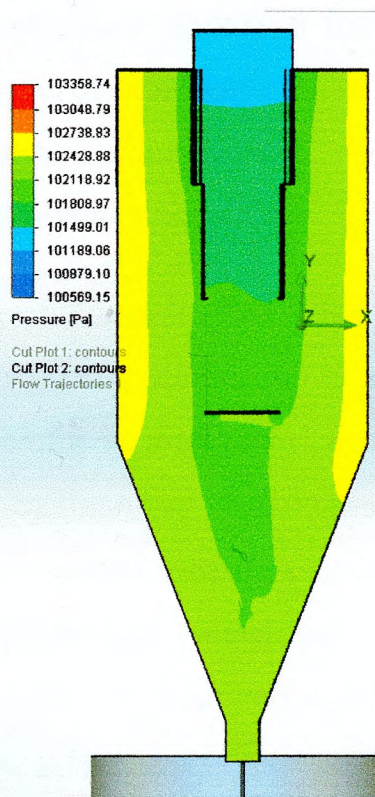
б

Рисунок 3.7. Значення швидкостей повітряного потоку поблизу дна жалюзійного відокремлювача.

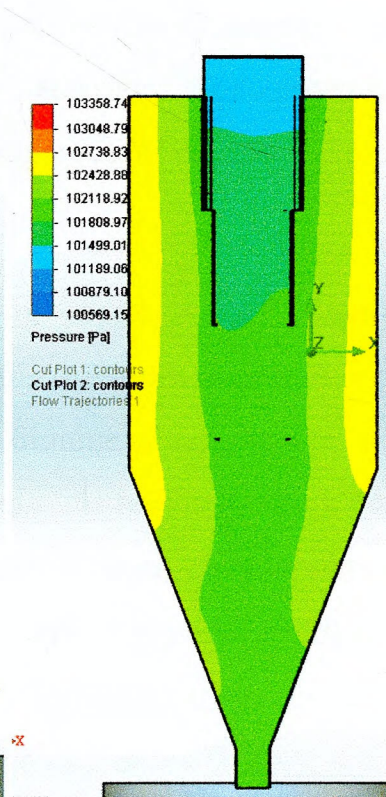
Розглянемо розподіл статичного тиску у плоскому перерізі пиловловлювача (рисунок 3.8.).



а



б



в

Рисунок 3.8. Розподіл значень статичного тиску

У сепараційній зоні циклона з традиційною вихлопною трубою перепад статичного тиску складає близько 2000 Па (рисунок 3.8в). Використання жалюзійного відокремлювача запропонованої конструкції знижує перепад тиску до 350 Па (рисунок 3.8.а,б), що сприяє зменшенню кількості повітря, яке задіяно у вторинних потоках, і створює передумови до підвищення ефективності пиловловлювача.

Результати чисельного експерименту, проведеного з використанням математичного пакету «Mathead 2001» та алгоритму, приведеного в МС.med, наведені в додатку А таблиця 1.

3.3. Висновки до розділу 3

1. Дослідження динаміки руху пилоповітряного потоку у внутрішній області стаціонарного турбулентного потоку в пиловловлювачі довели, що сфера застосування ейлерового континуального методу моделювання розширюється зі зростанням концентрації дисперсної фази, коли збільшується частота міжчастинкових зіткнень.

2. Проведений аналіз динаміки частинок у пристінній області стаціонарного турбулентного потоку довів, що зі збільшенням інерційності частинок інтенсивність пульсацій їх швидкості все більше відхиляється від інтенсивності пульсацій у суцільному середовищі і наближається до однорідного розподілу. Концентрація частинок поблизу стінки різко зростає, тобто спостерігається акумулювання частинок у зоні в'язкого підшару. Явище акумулювання частинок у неоднорідних турбулентних потоках пояснюється їх турбулентною міграцією (турбофорезом) з області з високою інтенсивністю турбулентних пульсацій швидкості, в зону з низьким ступенем турбулентності (зокрема, на в'язкий підшар на обтікаючій поверхні).

3. Створена математична модель процесу сепарації у відцентрово-інерційних пиловловлювачах, теоретично досліджена аеродинамічна структура газового потоку, проведені траєкторні дослідження руху потоку,

що дозволило промоделювати процеси, які відбуваються у відцентрово-інерційних пиловловлювачах.

4. Підтверджено математичним шляхом, що пульсаційна енергія малоінерційних частинок на стінці дорівнює нулю, а інтенсивність пульсацій інерційних частинок відмінна від нуля, а це обумовлено дифузійним механізмом перенесення пульсацій інерційними частинками з турбулентної області потоку.

5. Аналіз інтенсивності пульсацій швидкості та концентрації частинок на стінці при різних значеннях параметра інерційності (розміру частинок) дозволяє запропонувати нову конструкцію відцентрово-інерційного пиловловлювача зі зміною кута атаки і кількості жалюзі у відокремлювачі.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЦЕНТРОВО-ІНЕРЦІЙНИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ

4.1. Опис і дослідження еталонного відцентрово-інерційного апарату

У загальному вигляді процес очищення повітря від пилу в запропонованих нами апаратах відбувається наступним чином (рисунок 1.5 розділ 1).

За еталон приймається апарат, розроблений проф. Батлук В.А. [10], який складається не з однієї, як наведено на рисунку 1.5, а з чотирьох секцій однакового діаметра, але площа живого перерізу кожної секції відокремлювача зменшується в чотирьох його секціях від 48% до 24% зверху вниз. Результати експериментальних досліджень двох його модифікацій: 1- в останній секції жалюзійного відокремлювача знизу, навпроти патрубка виходу пилу, є суцільне дно і 2- немає дна - наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Визначення ефективності еталонного апарата

Витрати повітря, м ³ /год	Ефективність уловлення пилу (%) в апараті зі ступеневим жалюзійним відокремлювачем							
	з дном				без дна			
	Медіанний діаметр пилу, 10 ⁻⁶ м							
	8	16	32	50	8	16	32	50
1000	91,6	97,6	98,1	99,0	89,0	96,0	97,3	98,2
1500	91,9	98,0	98,7	99,4	89,3	96,5	97,4	98,5
2000	92,1	98,2	98,9	99,6	89,6	97,1	97,8	98,8
2500	91,8	97,9	99,0	99,7	89,4	96,6	97,5	98,7
3000	91,5	97,4	98,4	99,4	89,1	96,2	97,2	98,3

Дослідження довели, що ефективність вища в апараті з дном, але її все одно недостатньо для високоефективного уловлювання дрібнодисперсного неорганічного пилу.

Тому нами розроблені конструкції апаратів, які здатні високоефективно вловлювати дрібнодисперсні фракції пилу.

4.2. Опис новостворених відцентрово-інерційних пиловловлювачів

Базуючись на створеній нами математичній моделі пиловловлювачів, наведених в розділі 3, і на конкретній конструкції апарата, прийнятого в якості еталона (рисунок 1.5), та виходячи з задачі вловлювання дрібнодисперсних фракцій пилу, нами розроблені принципово нові конструкції пиловловлювачів, які суміщають в одному корпусі два ступеня очищення: перший – циклонний – на половині оберту потоку після входу в апарат під дією відцентрової сили та другий – інерційний – при проходженні потоку через щілини між жалюзі відокремлювача, який встановлений коаксіально корпусу, причому жалюзійний відокремлювач складається з декількох секцій [105].

Взявши за основу дослідження, проведені Азарським К.І. [3], вибирається циліндрично-конічна форма корпусу [3], кут при вершині конуса дорівнює 15° , а довжина корпусу для пилу з медіанним діаметром; $8 \cdot 10^{-6}$ м складає $925 \cdot 10^{-3}$ м; $32 \cdot 10^{-6}$ м – $825 \cdot 10^{-3}$ м і $50 \cdot 10^{-6}$ м – $725 \cdot 10^{-3}$ м.

Дослідження прозорої моделі конструкції відцентрово-інерційного пиловловлювача, наведеної на рисунку 1.5, довели, що значного підвищення ефективності їх роботи вдається отримати тільки при дотриманні умови постійності швидкості руху пилогазової суміші, як в корпусі апарата, так і при проходженні через щілини між жалюзі відокремлювача, що і використовується нами при конструюванні принципово нових апаратів.

Автором запропонована конструкція пиловловлювача [107] зі зміною кута атаки жалюзі, загальний вигляд якої представлений на рисунку 4.1, а вигляд зверху жалюзійного відокремлювача на рисунку 4.2, де: а) - для секції 6; б) - для секції 7; в) - для секції 8 (в подальшому - апарат І-го типу).

Тому нами розроблені конструкції апаратів, які здатні високоефективно вловлювати дрібнодисперсні фракції пилу.

4.2. Опис новостворених відцентрово-інерційних пиловловлювачів

Базуючись на створеній нами математичній моделі пиловловлювачів, наведених в розділі 3, і на конкретній конструкції апарата, прийнятого в якості еталона (рисунок 1.5), та виходячи з задачі вловлювання дрібнодисперсних фракцій пилу, нами розроблені принципово нові конструкції пиловловлювачів, які суміщають в одному корпусі два ступеня очищення: перший – циклонний – на половині оберту потоку після входу в апарат під дією відцентрової сили та другий – інерційний - при проходженні потоку через щілини між жалюзі відокремлювача, який встановлений коаксіально корпусу, причому жалюзійний відокремлювач складається з декількох секцій [105].

Взявши за основу дослідження, проведені Азарським К.І. [3], вибирається циліндрично-конічна форма корпусу [3], кут при вершині конуса дорівнює 15° , а довжина корпусу для пилу з медіанним діаметром; $8 \cdot 10^{-6}$ м складає $925 \cdot 10^{-3}$ м; $32 \cdot 10^{-6}$ м – $825 \cdot 10^{-3}$ м і $50 \cdot 10^{-6}$ м – $725 \cdot 10^{-3}$ м.

Дослідження прозорої моделі конструкції відцентрово-інерційного пиловловлювача, наведеної на рисунку 1.5, довели, що значного підвищення ефективності їх роботи вдається отримати тільки при дотриманні умови постійності швидкості руху пилогазової суміші, як в корпусі апарата, так і при проходженні через щілини між жалюзі відокремлювача, що і використовується нами при конструюванні принципово нових апаратів.

Автором запропонована конструкція пиловловлювача [107] зі зміною кута атаки жалюзі, загальний вигляд якої представлений на рисунку 4.1, а вигляд зверху жалюзійного відокремлювача на рисунку 4.2, де: а) - для секції 6; б) - для секції 7; в) - для секції 8 (в подальшому - апарат І-го типу).

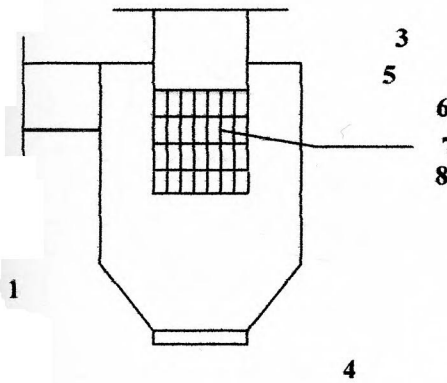


Рисунок 4.1 Ступеневий пиловловлювач з відокремлювачем зі зміною кута атаки жалюзі

тобто відбувається пошарове розділення потоку: грубодисперсний шар рухається вздовж стінки корпусу 1, а дрібнодисперсний - обертається навколо жалюзійного відокремлювача 5. При проходженні через щілини між жалюзі 9 відокремлювача 5 пилоповітряна суміш, яка вже звільнилась від великодисперсних частинок, звільняється і від дрібнодисперсних частинок пилу за рахунок того, що вони завдяки своїй інерції не встигають за потоком і попадають на жалюзі відокремлювача 5, відбиваються від них, знов підхоплюються потоком, знов стикаються з жалюзі відокремлювача і так далі до тих пір, доки не відіб'ються до стінки корпусу 1, де рухається великодисперсний потік, або не сповзуть по жалюзі вниз до пиловипускного патрубка 4.

Кількість зіткнень залежить від концентрації, дисперсного складу і якості частинок, а також від швидкості руху пилогазової суміші. Швидкість обертання пилогазового потоку навколо жалюзійного відокремлювача 5 весь час зменшується за рахунок відводу очищеного повітря через щілини між жалюзі кожної секції відокремлювача всередину його, а потім - у патрубок виходу очищеного повітря 3. Через кожну секцію жалюзійного відокремлювача проходить певна кількість повітря, причому, через секцію 6 - максимально можлива, тому кут атаки (β) для цієї секції має бути найбільшим.

Працює пиловловлювач наступним чином. Тангенційно в корпус 1 апарата підводиться пилоповітряна суміш, яка гвинтоподібно рухається зверху вниз, спочатку навколо патрубка виходу очищеного повітря 3, де під дією відцентрової сили великодисперсні частинки пилу відкидаються до стінки корпусу,

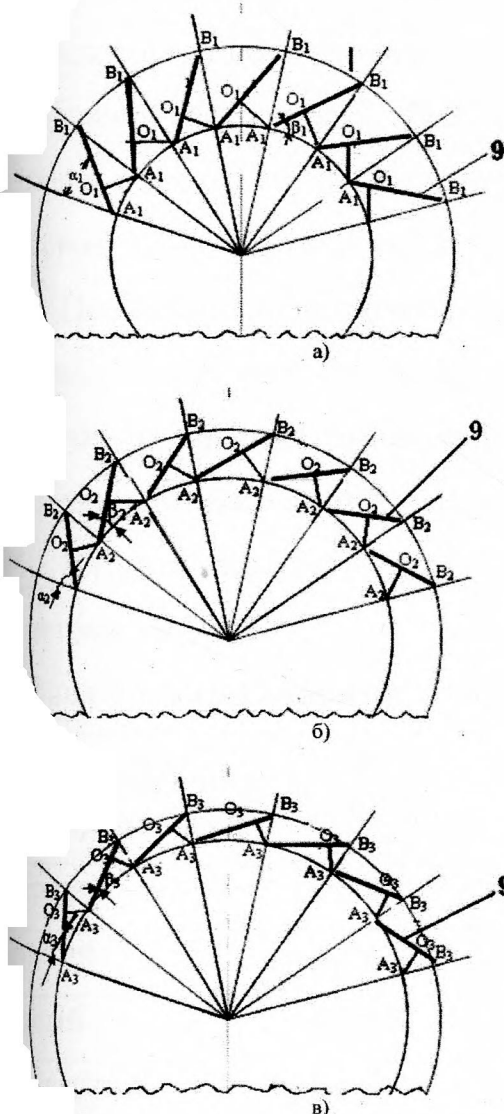


Рисунок 4.2 - Вигляд жалюзійного відокремлювача зверху; 9 – жалюзі.

...редину його, а потім - у патрубок виходу очищеного повітря 3. Зі зменшенням кута атаки жалюзі (β) збільшується ймовірність відбиття частинок пилу від площини жалюзі відокремлювача в напрямку стінки корпуса 1 апарату, а також зменшується площа живого перерізу відокремлювача зверху вниз у напрямку руху потоку до пилу випускного патрубку 4, що, відповідно, підтримує швидкість руху пилоповітряної суміші через щілини між жалюзі відокремлювача постійною.

Це зменшення кута атаки секцій жалюзійного відокремлювача 5 при

До секції 7 підходить кількість повітря, яка зменшена на величину, яка вже пройшла через секцію 6, тобто менша. Тому ми зменшуємо кут атаки цієї секції для підтримання постійної швидкості проходження пилоповітряної суміші через секцію 7 і т. д. Це зменшення кута атаки секцій (β) досягається зміною положення жалюзі, яке призводить до зменшення площі живого перетину кожної секції відокремлювача і, відповідно, веде до підтримання постійної швидкості руху пилоповітряної суміші через щілини між жалюзі секцій відокремлювача при зменшенні об'єму його після виведення в кожній секції частини очищеного повітря через щілини між жалюзі відокремлювача 5 в

$$\beta_1 = 90 - \alpha_1$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \alpha_1 + 15^\circ \\ \beta_2 &= \beta_1 - 15^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= \alpha_1 + 30^\circ \\ \beta_3 &= \beta_1 - 30^\circ \end{aligned}$$

переході до кожної наступної секції в напрямку до пиловипускного патрубка 4 розраховано на ЕОМ таким чином, щоб зберегти постійною швидкість проходження пилоповітряної суміші через щілини між жалюзі відокремлювача 5 в кожній його секції. Для кожної секції відокремлювача визначаються кількість повітря, яка повинна через неї пройти, та швидкість її проходження, а це в свою чергу визначає кут атаки жалюзі.

Проведені дослідження на стандартному експериментальному стенді (рисунки 2.1), встановленому в Національному університеті «Львівська політехніка», восьми типів жалюзійних відокремлювачів з різними кутами атаки кожної з його секцій (рисунки 4.2), розміри яких наведені в таблиці 4.2.

Витрати повітря – 3000 м³/год, пил – кварцовий пісок з медіанним діаметром 50·10⁻⁶м.

Таблиця 4.2 Типи апаратів жалюзійних відокремлювачів

Тип жалюзійного відокремлювача	Кут атаки секції 1	Кут атаки секції 2	Кут атаки секції 3	Кут атаки секції 4	Ефективність роботи
- перший	$\beta_1=60^\circ$	$\beta_2=50^\circ$	$\beta_3=40^\circ$	$\beta_4=30^\circ$	95,1
- другий	$\beta_1=60^\circ$	$\beta_2=45^\circ$	$\beta_3=30^\circ$	$\beta_4=20^\circ$	96,4
- третій	$\beta_1=60^\circ$	$\beta_2=40^\circ$	$\beta_3=20^\circ$	$\beta_4=10^\circ$	96,2
- четвертий	$\beta_1=50^\circ$	$\beta_2=40^\circ$	$\beta_3=30^\circ$	$\beta_4=20^\circ$	97,1
- п'ятий	$\beta_1=50^\circ$	$\beta_2=35^\circ$	$\beta_3=20^\circ$	$\beta_4=10^\circ$	97,7
- шостий	$\beta_1=50^\circ$	$\beta_2=30^\circ$	$\beta_3=10^\circ$	$\beta_4=5^\circ$	96,9
- сьомий	$\beta_1=45^\circ$	$\beta_2=35^\circ$	$\beta_3=25^\circ$	$\beta_4=15^\circ$	96,4
- восьмий	$\beta_1=45^\circ$	$\beta_2=30^\circ$	$\beta_3=15^\circ$	$\beta_4=10^\circ$	95,6

Оптимальним є п'ятий тип апарата, кут атаки в межах кожної секції якого є постійним, а з переходом до наступної секції в напрямку до пиловипускного патрубка зменшується на кут в 15 градусів за рахунок повороту жалюзі, що й показано на рисунку 4.2.

На тому ж стандартному експериментальному стенді (рисунки 2.1.) проведені дослідження запропонованої конструкції пиловловлювача [105] з метою

визначення залежності ефективності пиловловлення від медіанного діаметра пилу при витратах повітря 1000 – 3000 м³/год для експериментального пилу з медіанним діаметром (8, 16, 32 і 50)·10⁻⁶м. Було досліджено два типи пиловловлювачів: з дном - у якому жалюзійний відокремлювач знизу секції відокремлювача 8 навпроти патрубку виходу пилу 4 має суцільне дно; без дна - який цього дна не має. Дані випробувань наведені у таблиці Б.7 Додатку Б, а графіки, що побудовані по них, наведені на рисунках 4.3-4.5.

У результаті експерименту встановлено, що:

- ефективність пиловловлення зростає зі збільшенням:

- медіанного діаметра пилу (рисунок 4.3);
- витрат повітря в стенді (рисунок 4.4);

гідравлічний опір збільшується зі збільшенням витрат повітря в стенді (рисунок 4.5);

- ефективність пиловловлення вища в апараті, де жалюзійний відокремлювач виконаний з суцільним дном.

Проведені дослідження довели, що ефективність уловлення пилу у запропонованому пиловловлювачі, як і в еталоні, залежить від наявності суцільного дна у останньої секції жалюзійного відокремлювача.

Порівнюючи одержані залежності з результатами дослідження еталонного апарата, встановлено, що застосування запропонованої конструкції пиловловлювача дозволило підвищити ефективність уловлення пилу на 1-2% (таблиця Б.8), але для доведення викидів дрібнодисперсних фракцій до норм ГДК цього недостатньо, тому нами запропонована конструкція пиловловлювача зі змінною кількістю жалюзі [104], загальний вигляд якої наведений на рисунку 4.6, а на рисунку 4.7 – наведений загальний вигляд жалюзійного відокремлювача.

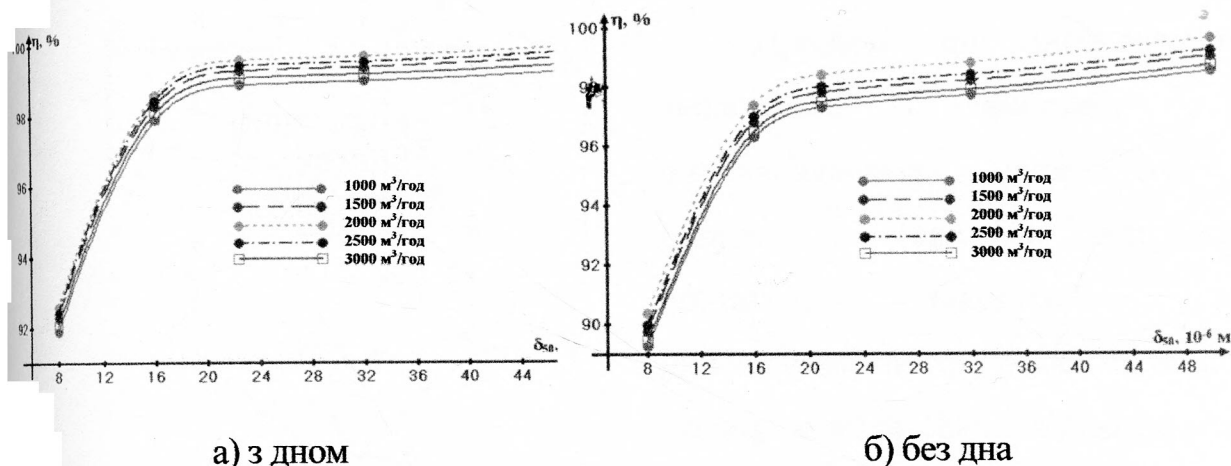


Рисунок 4.3. Залежність ефективності роботи апарата зі зміною кута атаки жалюзі (η) від медіанного діаметра пилу (δ_{50}).

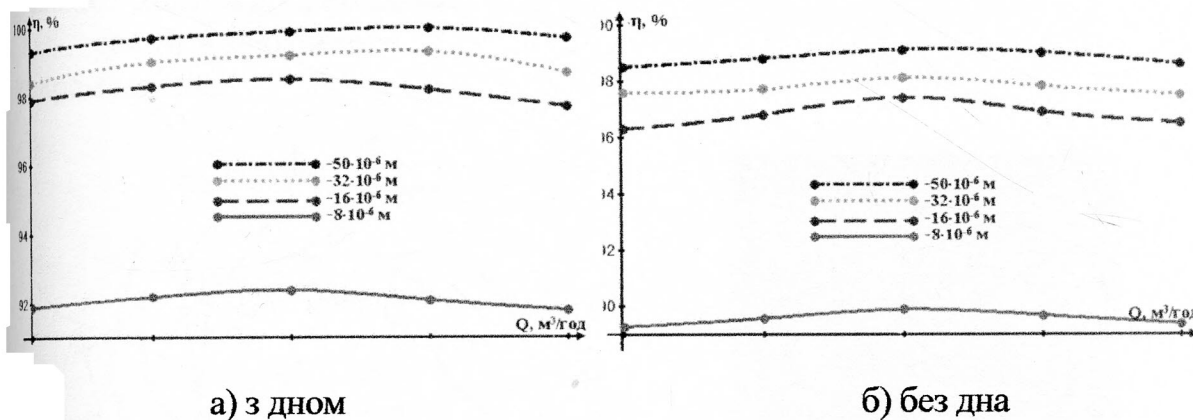


Рисунок 4.4. Залежність ефективності роботи апарата зі зміною кута атаки жалюзі (η) від витрат повітря (Q).

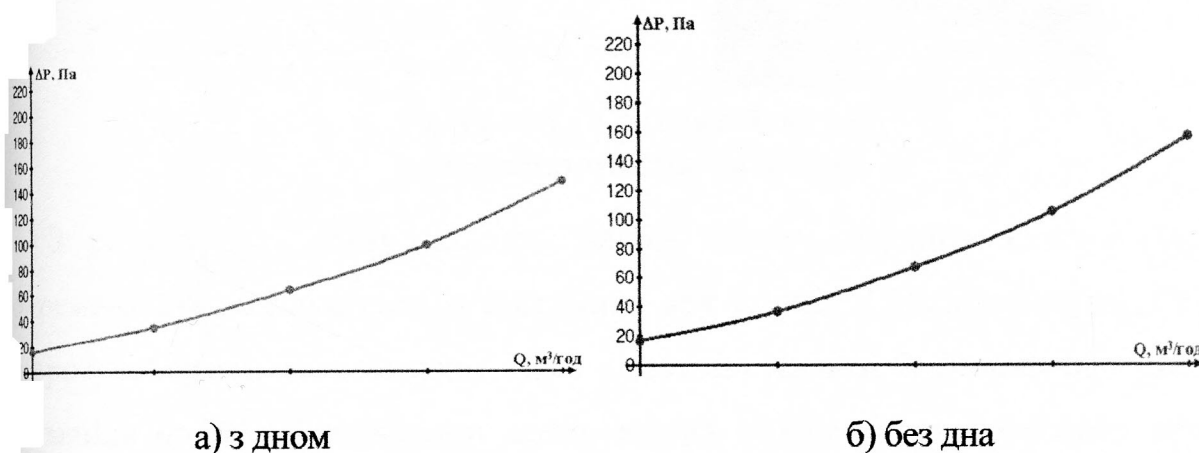


Рисунок 4.5. Залежність гідравлічного опору апаратів (ΔP) зі зміною кута від витрат повітря (Q)

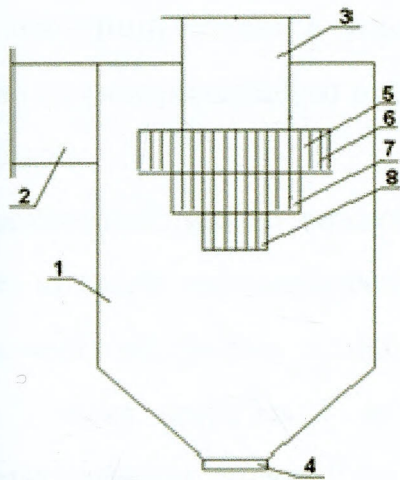


Рисунок 4.6- Пилувловлювач зі змінною кількістю жалюзі:
1 – корпус; 2 – вхідний патрубок;
3 – патрубок виходу очищеного повітря; 4 – патрубок виходу пилу;
5 – жалюзійний відокремлювач;
6, 7, 8 – секції жалюзійного відокремлювача.

Принцип дії пилувловлювача аналогічний принципу дії пилувловлювача, наведеного на рисунку 4.1, але для підтримання постійної швидкості руху пилогазового потоку через щілини між жалюзі кожної секції відокремлювача необхідно зменшити площу живого перерізу їх. Крім того кількість секцій зведено до трьох.

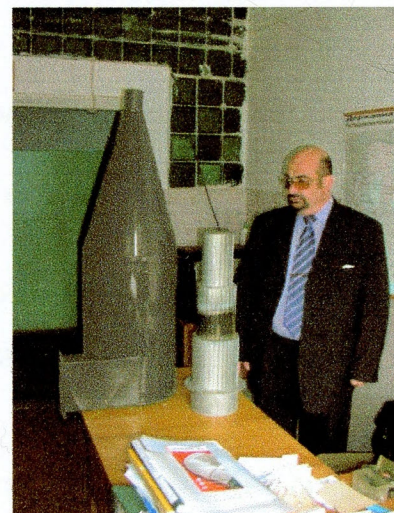
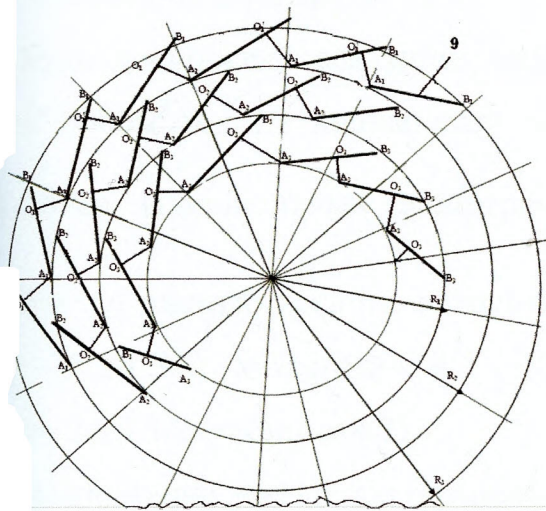


Рисунок 4.7- Загальний вигляд жалюзійного відокремлювача.

З рисунку 4.7 зрозуміло, що площа живого перерізу кожної секції відокремлювача визначається як відстанню між жалюзі 9 (перпендикуляр OB – найкоротша відтань між жалюзі), так і кількістю жалюзі 9. Виходячи з умови підтримання постійної швидкості проходження пилоповітряного потоку через щілини між жалюзі відокремлювача 5 в кожній з його секцій, задаємося, що перпендикуляр OB є постійним для всіх секцій (const), тоді кількість жалюзі 9 в

кожній наступній секції в напрямку до пиловипускного патрубка 4 буде зменшена прямопропорційно відношенню діаметрів кожної наступної секції до попередньої.

Враховуючи, що до кожної наступної секції жалюзійного відокремлювача підходить кількість пилоповітряної суміші, яка зменшена на кількість її, яка вже пройшла через попередню секцію жалюзійного відокремлювача і була виведена з апарата 1 через патрубок 3 виходу очищеного повітря, тобто менша, тому, зменшуючи кількість жалюзі 9 в кожній наступній секції 6, 7, 8 в напрямку до пиловипускного патрубка 4, тим самим зменшуємо площу живого перерізу кожної наступної секції відносно попередньої в тому ж напрямку, завдяки чому забезпечуємо постійну швидкість руху пилоповітряної суміші через отвори між жалюзі, яка є оптимальною для даного типу пилу. Зменшити кількість жалюзі в кожній секції 6, 7, 8, залишаючи при цьому постійною відстань між ними, можна тільки зменшуючи діаметр цих секцій.

Було досліджено сім типів жалюзійних відокремлювачів при витратах повітря $3000\text{м}^3/\text{год}$ на кварцовому піску з медіанним діаметром $50 \cdot 10^{-6}\text{м}$ з наступними відношеннями діаметрів 6,7,8 секцій $\left(\frac{D_6}{D_7}, \frac{D_7}{D_8}\right)$ зверху вниз у напрямку до пиловипускного патрубка: перший - $5/4$ і $3/3$; другий - $5/5$ і $4/3$; третій - $5/3$ і $3/1$; четвертий - $4/3$ і $3/2$; п'ятий - $4/4$ і $3/2$; шостий - $4/2$ і $3/1$; сьомий - $3/2$ і $3/2$ (таблиця 4.3).

Дослідження довели, що оптимальним є апарат, відношення діаметрів секцій жалюзійного відокремлювача якого зверху вниз зменшується наступним чином: відношення секції 6 до діаметра секції 7 дорівнює $4/3$, а секції 7 до секції 8 дорівнює $3/2$, тобто четверта модель, яка забезпечує постійну швидкість проходження пилоповітряної суміші через щілини між жалюзі відокремлювача всіх трьох його секцій.

Таблиця 4.3 Визначення оптимальної величини відношення діаметрів секцій відокремлювачів

Тип жалюзійного відокремлювача	Відношення діаметрів секцій		Ефективність роботи
	D_6/D_7	D_7/D_8	
- перший	5/4	3/3	96,2
- другий	5/5	4/3	97,2
- третій	5/3	3/1	98,6
- четвертий	4/3	3/2	99,4
- п'ятий	4/4	3/2	97,1
- шостий	4/2	3/1	96,7
- сьомий	3/2	3/2	95,4

Це зменшення діаметра кожної наступної секції жалюзійного відокремлювача розраховано таким чином, що при підтриманні наведених вище відношень діаметрів секцій відокремлювача швидкість проходження пилоповітряної суміші через щілини між жалюзі відокремлювача буде однаковою для всіх трьох секцій. Для кожної секції визначається кількість повітря, яке має пройти через неї та визначається швидкість її проходження. Пояснюється така величина оптимального співвідношення діаметрів секцій відокремлювача тим, що тільки в такому варіанті ми, залишаючи незмінною відстань між жалюзі в кожній секції відокремлювача, досягаємо постійної швидкості руху пилоповітряної суміші через отвори між жалюзі відокремлювача зменшенням в тому ж напрямку діаметрів секцій відокремлювача.

Було запропоновано два типи апаратів: перший - де секція 8 жалюзійного відокремлювача виконана із суцільним дном, другий – де жалюзійний відокремлювач 8 відкритий знизу. Дані експериментів наведені у таблиці Б9 Додатку Б, а графіки, які побудовані за результатами дослідження, наведені на рисунках 4.8-4.13.

На експериментальному стенді (рисунок 2.1) проведені дослідження запропонованих конструкцій пиловловлювачів, які довели, що:

ефективність уловлення пилу зростає зі збільшенням:

- медіанного діаметра пилу (рисунки 4.8, 4.9);
- витрат повітря в стенді (рисунки 4.10, 4.11).

гідравлічний опір збільшується зі збільшенням витрат повітря в стенді (рисунки 4.12, 4.13);

ефективність пиловловлення зростає при наявності у жалюзійному відокремлювачі суцільного дна.

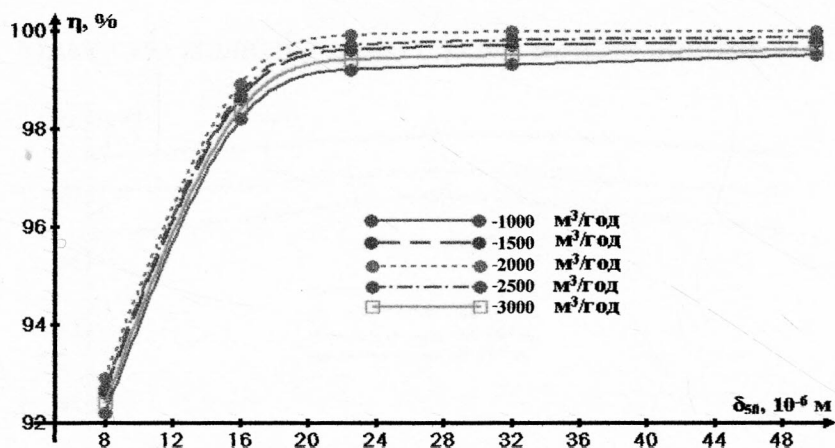


Рисунок 4.8 - Залежність ефективності роботи пиловловлювача зі змінною кількістю жалюзі з дном (η) від медіанного діаметра пилу (δ_{50}).

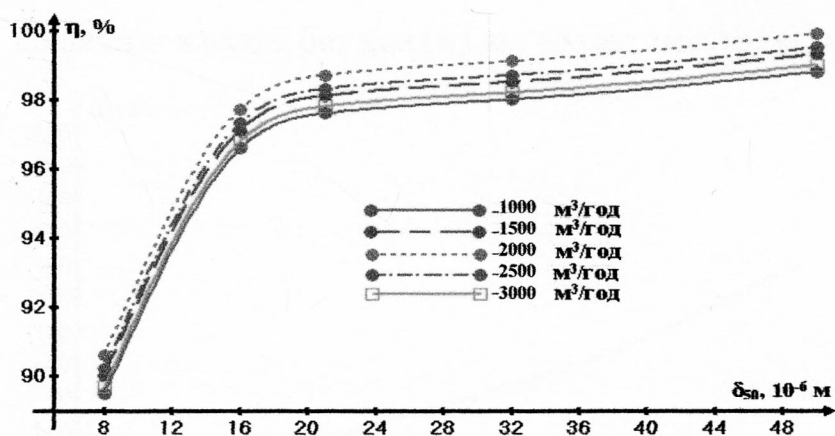


Рисунок 4.9 - Залежність ефективності роботи пиловловлювача зі змінною кількістю жалюзі без дна (η) від медіанного діаметра пилу (δ_{50}).

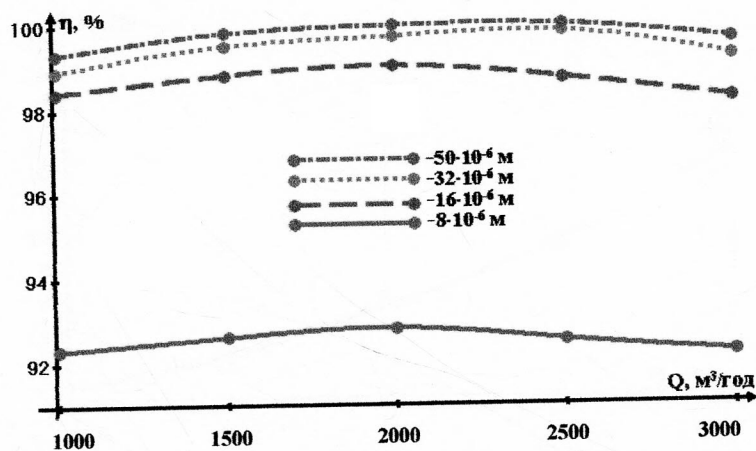


Рисунок 4.10 - Залежність ефективності роботи пиловловлювача зі змінною кількістю жалюзі з дном (η) від витрат повітря (Q).

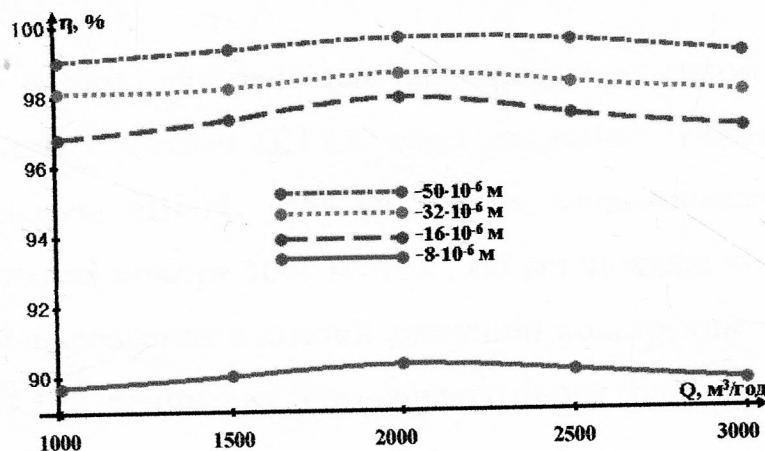


Рисунок 4.11 - Залежність ефективності роботи пиловловлювача зі змінною кількістю жалюзі без дна (η) від витрат повітря (Q).

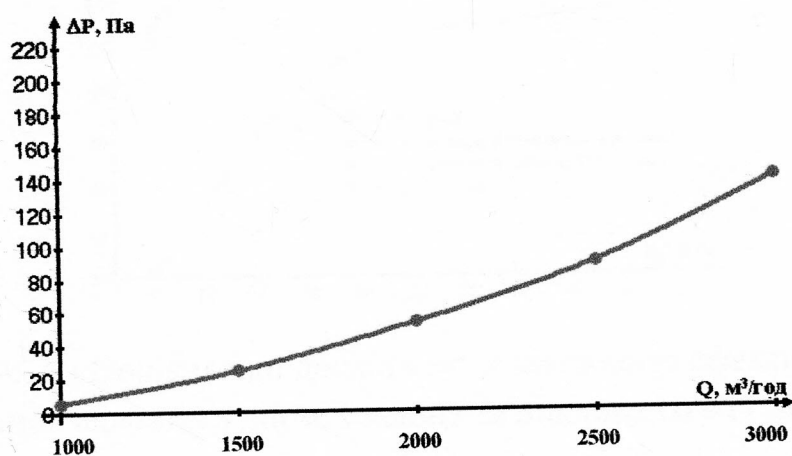


Рисунок 4.12 - Залежність гідравлічного опору пиловловлювача зі змінною кількістю жалюзі з дном (ΔP) від витрат повітря (Q).

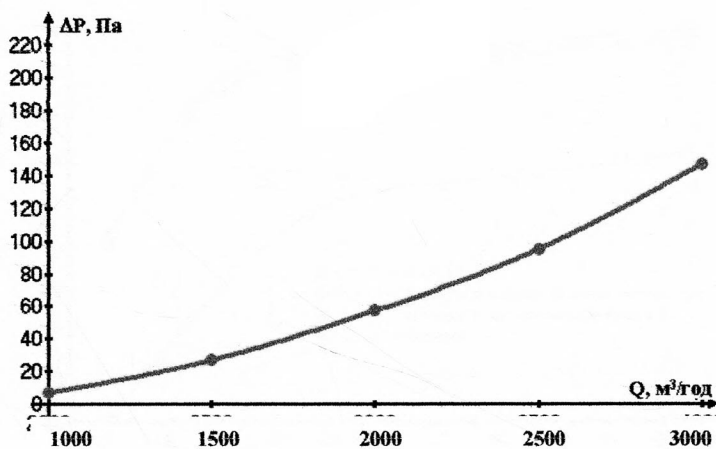


Рисунок 4.13 - Залежність гідравлічного опору пиловловлювача зі змінною кількістю жалюзі без дна (ΔP) від витрат повітря (Q).

У зв'язку з тим, що найбільш поширеним апаратом для вловлення неорганічного пилу є циклон ЦН-11, нами додатково проведені порівняльні дослідження циклона ЦН-11, еталона і двох запропонованих конструкцій апаратів при витратах повітря $3000 \text{ м}^3/\text{год.}$, які встановили: значне підвищення ефективності пиловловлення в кожній наступній конструкції апарата (рисунки 4.14, 4.15, 4.16, 4.17); зменшення гідравлічного опору (рисунки 4.18, 4.19).

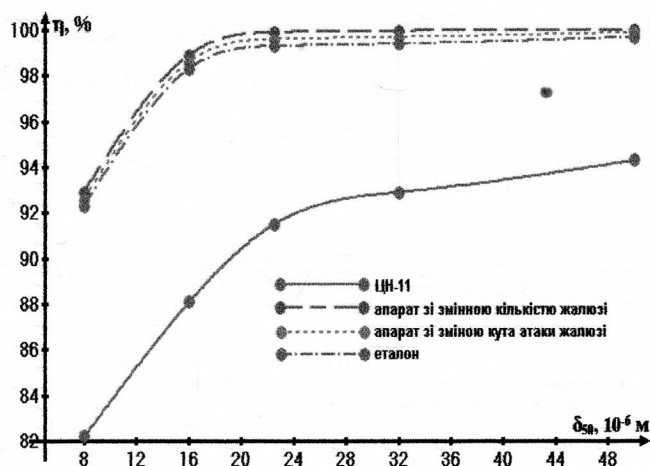


Рисунок 4.14 - Порівняльні дослідження залежності ефективності (η) запропонованих апаратів з дном, еталона та циклона ЦН-11 від медіанного діаметра пилу (δ_{50}).

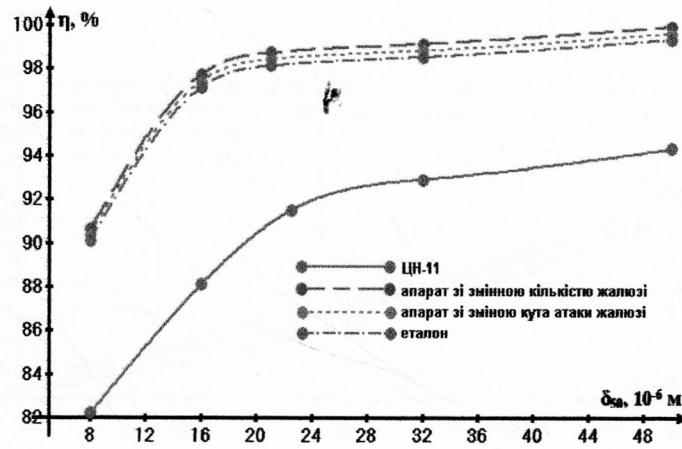


Рисунок 4.15 - Порівняльні дослідження залежності ефективності (η) запропонованих апаратів без дна, еталона та циклона ЦН-11 від медіанного діаметра пилу (δ_{50}).

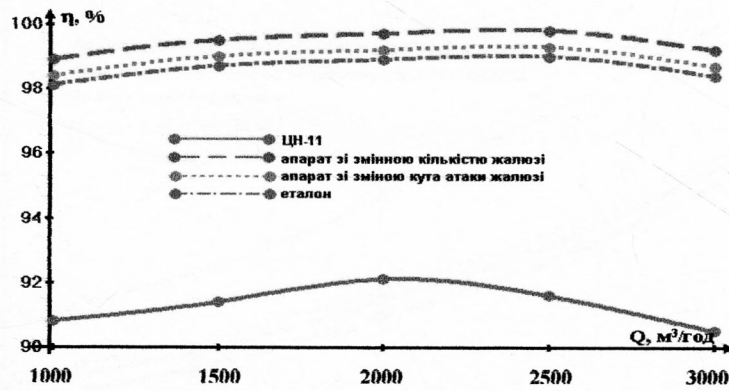


Рисунок 4.16 - Порівняльні дослідження залежності ефективності (η) запропонованих апаратів з дном, еталона та циклона ЦН-11 від витрат повітря (Q).

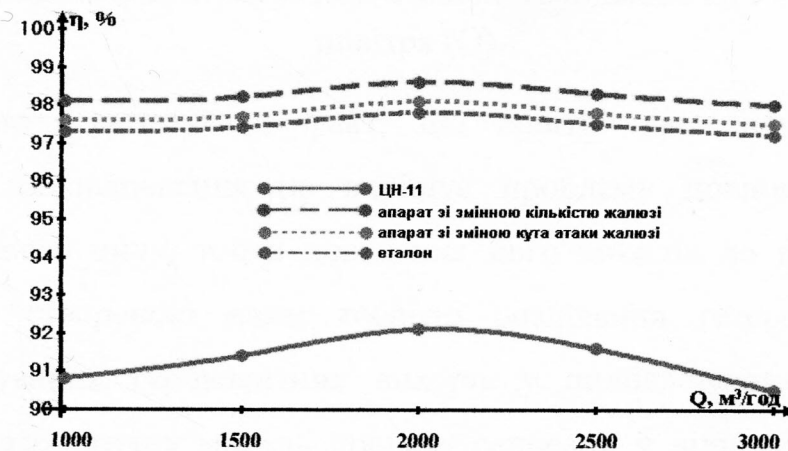


Рисунок 4.17 - Порівняльні дослідження залежності ефективності (η) запропонованих апаратів без дна, еталона та циклона ЦН-11 від витрат повітря (Q).

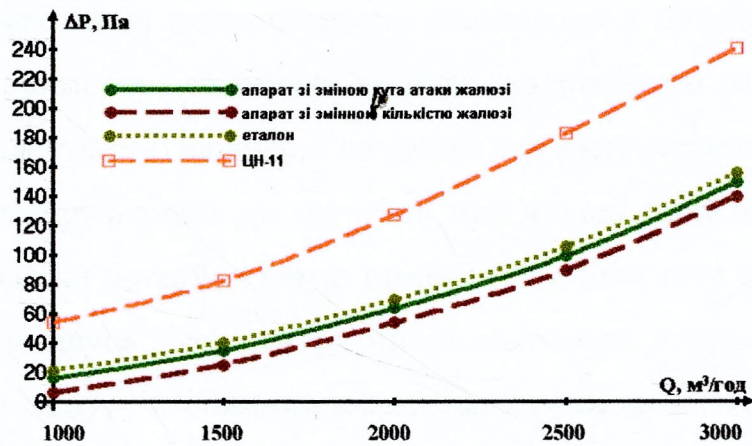


Рисунок 4.18 - Порівняльні дослідження залежності гідравлічного опору (ΔP) запропонованих апаратів з дном, еталона та циклона ЦН-11 від витрат повітря (Q).

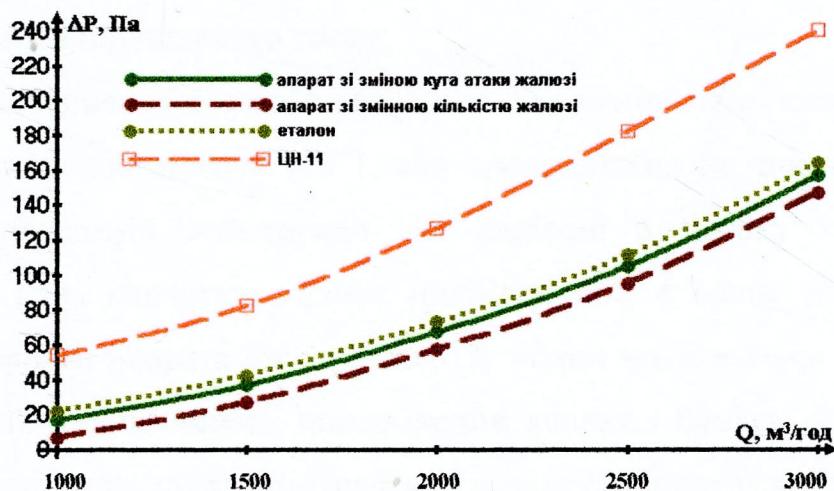


Рисунок 4.19 - Порівняльні дослідження залежності гідравлічного опору (ΔP) запропонованих апаратів без дна, еталона та циклона ЦН-11 від витрат повітря (Q).

Необхідно констатувати факт, що навіть таке значне підвищення ефективності пиловловлення не вирішує проблему повного вловлювання дрібнодисперсного пилу, тобто доведення його викидів до норм ГДВ, тому користуючись створеною нами теорією розділення гетерогенних систем шляхом руйнування турбулентних вихорів у пиловловлювачах [розділ 3], враховуючи математичну модель процесу сепарації у відцентрово-інерційних відокремлювачах, нами виявлено, що значний вплив на роботу пиловловлювачів відцентрово-інерційного типу здійснюють зустрічні турбулентні потоки, в які великий внесок вносять бункери для збору пилу.

Запропоновані нами вище апарати складаються з циліндрично-конічного корпусу, розташованого співвісно з ним жалюзійного відокремлювача і відрізняються відсутністю на виході патрубку для пилу герметично з'єданого з ним бункера, що призводить до того, що при виході пилу з пиловловлювача через пиловипускний патрубок існує: по-перше - підсос газу в місці стику його з бункером, а по-друге - по центру пиловловлювача з бункера утворюється значно меншого радіусу вторинний вихор, який рухається гвинтоподібно знизу вверх назустріч гвинтоподібному руху пилогазової суміші зверху вниз. Вторинний вихор захоплює вже виділений і зібраний в бункері пил, який знов бере участь у процесі пилоочищення в апараті, тому що в його центрі утворюється зона підвищеного тиску.

Для вирішення цієї проблеми нами запропоновано принципово нова конструкція пиловловлювача [107], яка представлена на рисунку 4.20 (III-й апарат). У наведеній конструкції всі виділені з потоку частинки пилу спускаються вниз спочатку вздовж циліндричної, а потім вздовж конічної частини 6 корпусу апарата аж у бункер 2, звідки видаляються через очисний люк 7 назовні. Таким чином, пилоочисний апарат і бункер об'єднані одним корпусом і становлять суцільний апарат для очистки повітря від пилу.

Переваги запропонованої конструкції пояснюються зменшенням сили вторинного вихору, який рухається знизу з дна бункера вверх в корпус апарата і зводить до мінімуму забруднення пилоповітряної суміші, що очищається, пилом, зібраним у його бункері.

Дуже важливим є те, що після заповнення нижньої частини конуса корпусу пилом, що осів (у випадку відсутності бункера) до рівня, де радіальні складові швидкості потоку вже здатні розтрушувати шар, осадження зупиняється. У зв'язку з цим, для забезпечення безперебійної роботи апарати повинні додатково оснащуватись герметичними бункерами певної форми, що ми і

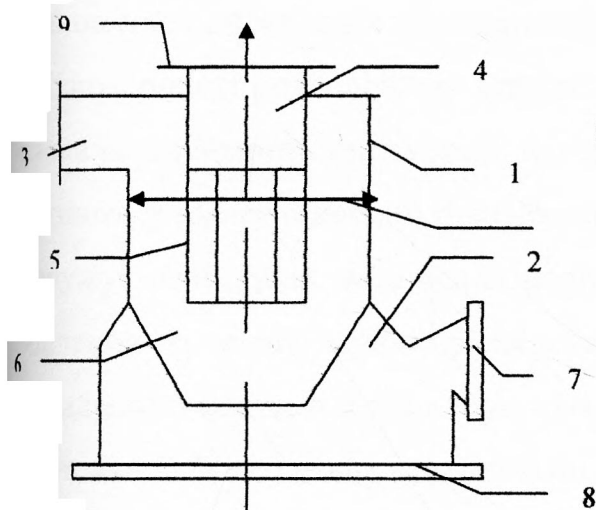


Рисунок 4.20 - Пиловловлювач

1 – корпус апарата; 2 – бункер для збору пилу;
 3 – вхідний патрубок;
 4 – патрубок для виходу очищеного повітря;
 5 – жалюзійний відокремлювач;
 6 – розділюючий конус; 7 – люк для очистки бункера; 8 – фундаментна плита;
 9 – фланець; d – діаметр

пропонуємо. На тому ж стенді (рисунок 2.1) проведені дослідження впливу форми бункера на ефективність пилоочистки, при витратах повітря 3000 м³/год, для експериментального пилу - кварцового піску: 1 - циліндрично-конічний, 2 - прямокутний, 3 - конусний (таблиця 4.4). Переваги циліндрично-конічної форми бункера очевидні.

Таблиця 4.4 Визначення форми бункера циліндрично-конічних апаратів

Розмір пилу, 1·10 ⁻⁶ м	Швидкість повітря у вхідному патрубку, м/с	Ефективність уловлення пилу, % при різній формі бункера		
		1	2	3
32	5	96.9	94.5	95.8
50	5	97.2	94.5	96.1
32	10	98.1	95.3	96.1
50	10	98.3	95.8	96.7
32	15	98.4	96.1	96.6
50	15	98.6	96.6	97.2
32	20	98.5	96.4	97.1
50	20	98.7	96.8	97.4
32	25	98.7	96.2	96.8
50	25	98.9	96.5	97.1

Нехай з тих чи інших причин тиск в корпусі і бункері різний, тоді там, де менший, почнеться підсмоктування повітря, і. таким чином, в апараті

встановиться циркуляція підсмоктаного повітря в очищене повітря, що веде до нерівномірності розподілення швидкостей і тисків. У бункері конусної форми менша інтенсивність циркуляції, що добре сприяє коагуляції дрібнодисперсних частинок, у ньому відносно постійна швидкість радіального стоку, але він зразу ж звужує потік. Для зменшення радіальних швидкостей руху потоку з метою виділення із нього дрібнодисперсних частинок пилу нами запропонована циліндрично-конічна форма бункера з певним відношенням його радіусів і висот, яке вибрано експериментально в залежності від діаметра і висоти самого апарата (таблиці 4.5; 4.6). Розмір пилу – $32 \cdot 10^{-6}$ м, витрати повітря – $3000 \text{ м}^3/\text{год}$.

Таблиця 4.5 Визначення діаметра бункера циліндрично-конічних пиловловлювачів

Діаметр корпусу, $1 \cdot 10^{-3}$ м	Діаметр бункера, 10^{-3} м	Відношення діаметрів корпусу і бункера	Ефективність вловлення пилу, %
500	1250	0,4	98,5
500	1100	0,45	98,7
500	1000	0,5	98,6
500	950	0,53	98,4
500	900	0,55	98,1
500	850	0,59	97,6
500	800	0,625	97,2
500	750	0,67	96,8
500	700	0,71	96,4

Відношення діаметра корпусу до діаметра бункера, яке дорівнює 0,45-0,55, дозволяє отримати максимальну ефективність очистки повітря від пилу, що пояснюється вибором оптимального розміру руху потоку в апараті і бункері з мінімальною турбулізацією потоку.

Таблиця 4.6 Визначення висоти бункера циліндрично-конічних пиловловлювачів

Відношення діаметрів корпусу і бункера	Висота корпусу, 10^{-3} м	Висота бункера, м	Відношення висот корпусу і бункера	Ефективність уловлення пилу, %
0,45	800	1,0	0,8	98,7
0,45	800	0,9	0,89	98,5
0,45	800	0,8	1,0	98,1
0,45	800	0,7	1,14	97,6
0,45	800	0,6	1,33	97,1

Максимальну ефективність уловлювання пилу ми отримали при співвідношенні висот корпусу і бункера, яка дорівнює 0,8-0,9, що пояснюється знову ж заспокоєнням потоку, зниженням швидкості його руху, а відтак меншим пиловиділенням.

Аналогічно попереднім дослідженням вивчаються два варіанти апаратів: перший – жалюзійний відокремлювач 5 знизу навпроти бункера закритий суцільним дном і другий – не закритий суцільним дном, які підтвердили закономірності попередніх досліджень (рисунки 4.21-4.26). Дані експериментальних випробувань записані у таблиці Б10 Додатку Б, а по їх даних побудовані графіки (4.21-4.26).

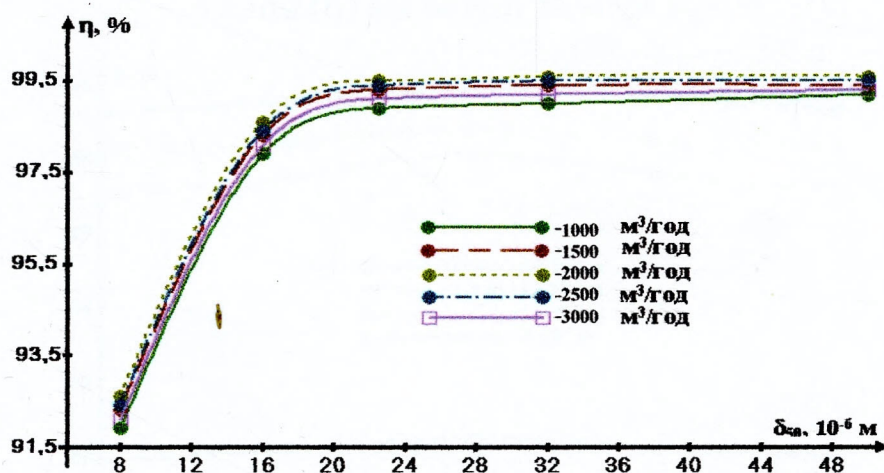


Рисунок 4.21 - Залежність ефективності роботи пиловловлювача з бункером з дном (η) від медіанного діаметру пилу (δ_{50}).

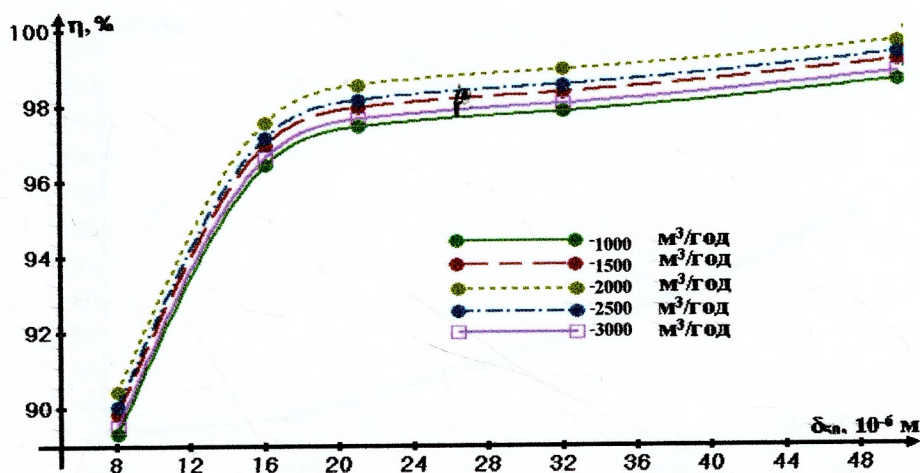


Рисунок 4.22 - Залежність ефективності роботи пиловловлювача з бункером без дна (η) від медіанного діаметру пилю (δ_{50}).

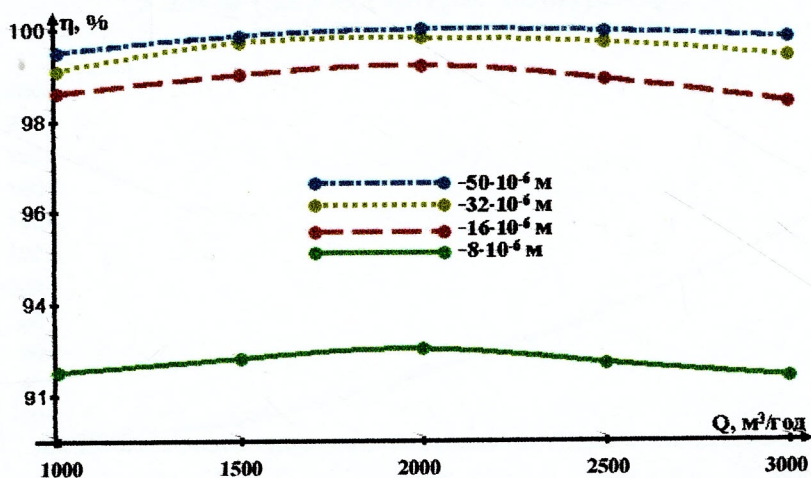


Рисунок 4.23 - Залежність ефективності роботи пиловловлювача з бункером з дном (η) від витрат повітря (Q).

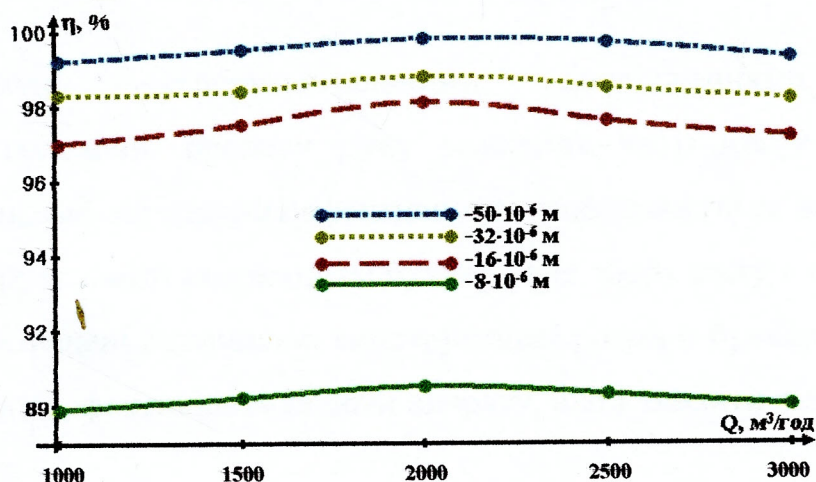


Рисунок 4.24 - Залежність ефективності роботи пиловловлювача з бункером без дна (η) від витрат повітря (Q).

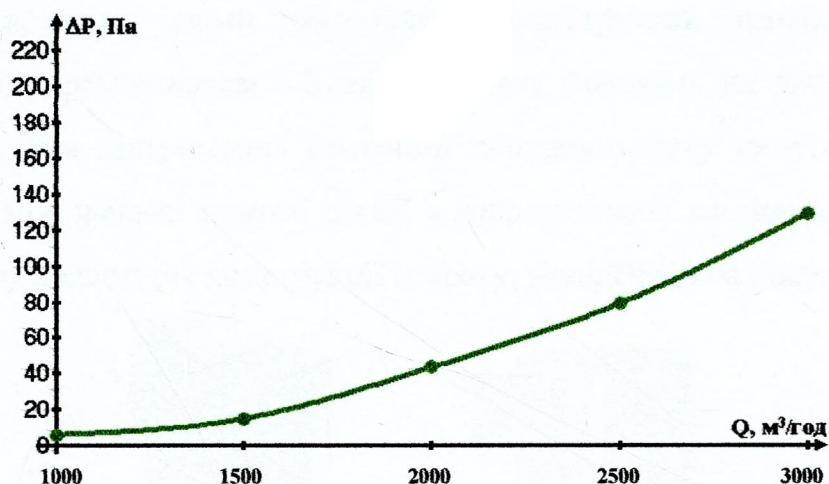


Рисунок 4.25 - Залежність гідравлічного опору пиловловлювача з бункером з дном (ΔP) від витрат повітря (Q).

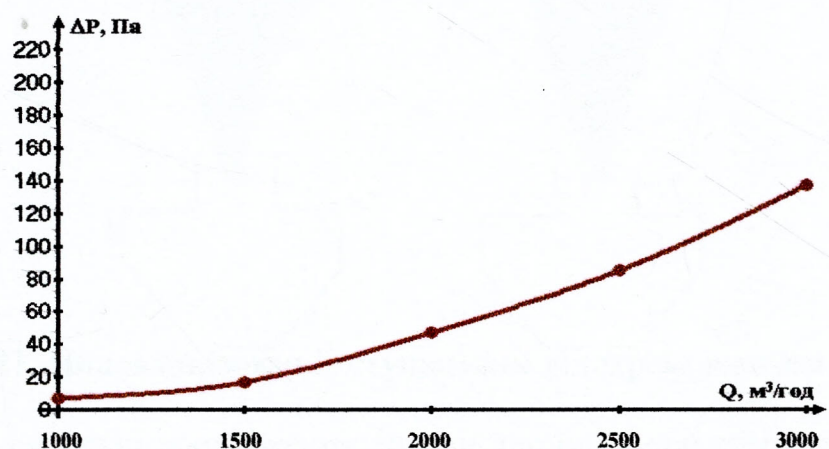


Рисунок 4.26 - Залежність гідравлічного опору пиловловлювача з бункером без дна (ΔP) від витрат повітря (Q).

Підтверджені експериментальними дослідженнями результати теоретичних положень процесу руху зважених частинок у турбулентних вихорах довели, що збільшення ефективності уловлення пилу на 2-3% вдалося досягти конструктивним виконанням бункера для збору пилу в одному корпусі з апаратом. Визначені оптимальні конструктивні розміри бункера дозволили не тільки збільшити ефективність роботи апарату, але і знизити гідравлічний опір його в 1,2 рази.

Аналізуючи результати проведених експериментів, констатуємо факт, що для деяких виробництв, де необхідно високоефективно вловити дрібнодисперсний пил, нам не вдалося отримати необхідної ефективності

пиловловлення, тому нами розроблена конструкція пиловловлювача із ступеневим відокремлювачем і бункером, яка показана на рисунку 4.27-4.28 (IV-й апарат). Для підтримання постійної швидкості руху пилогазового потоку через щілини між жалюзі кожної секції відокремлювача ми зменшили площу їх живого перерізу аналогічно конструкції апарату, наведеного на рисунках 4.6; 4.7.

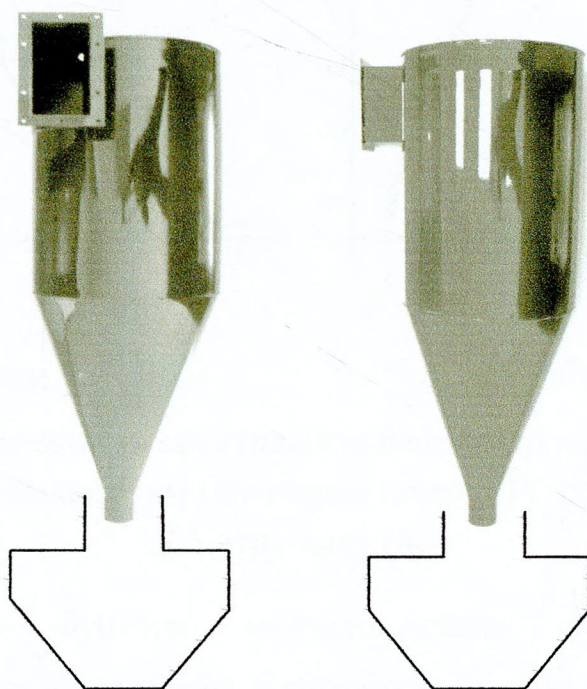


Рисунок 4.27. Пиловловлювач із ступеневим відокремлювачем і бункером.

Експериментальні дослідження довели, що оптимальними умовами роботи апарату є:

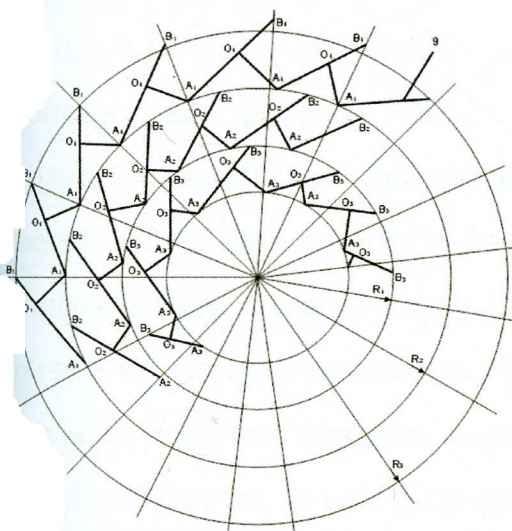


Рисунок 4.28- Жалюзійний відокремлювач пиловловлювача із ступеневим відокремлювачем і бункером

висота бункера складає 0,45-0,55 висоти корпусу апарата;

- відношення діаметра корпусу до діаметра бункера дорівнює 0,8-0,9;
- форма бункера – циліндрично-конічна.

При зменшенні швидкостей руху потоку в корпусі апарата і при проходженні через отвори між жалюзі згідно закону Бернуллі, збільшується статичний тиск навколо відокремлювача.

При наявності наведених вище оптимальних умовах роботи апарата значно зменшується підсос газу в місці стику корпусу з бункером, а по центру

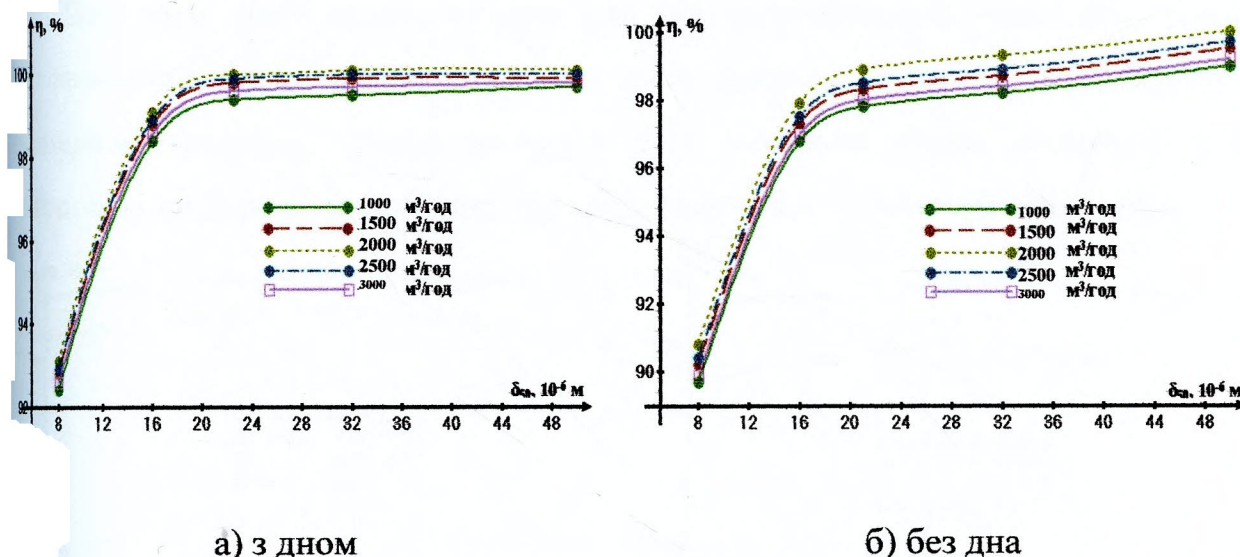
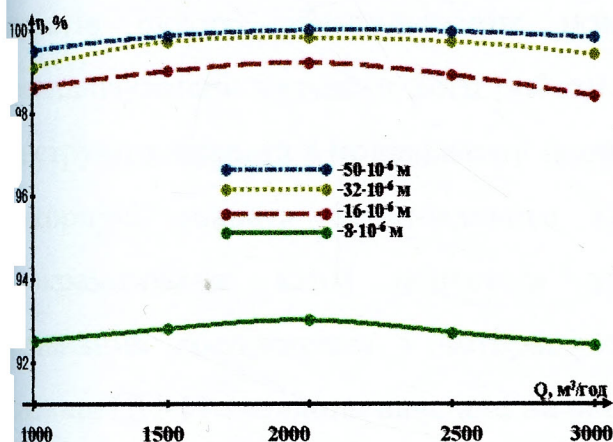


Рисунок 4.29- Залежність ефективності роботи (η) пиловловлювача із ступеневим відокремлювачем і бункером (апарат IV типу) від медіанного діаметру пилу (δ_{50})

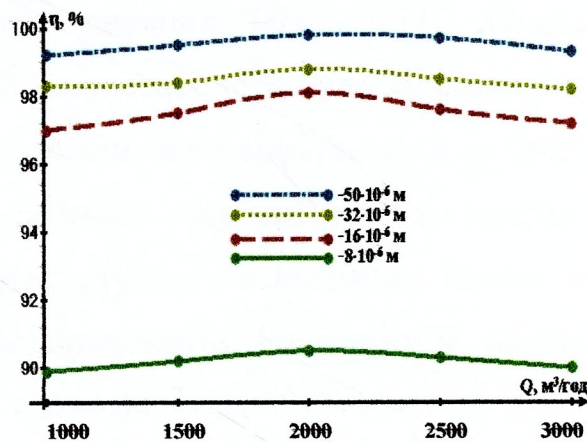
пиловловлювача з бункера пиловловлювача рухається вторинний гвинтоподібний вихор знизу вверх зі значно меншими радіусом і швидкістю, що виключає або зменшує кількість захопленого ним пилу, а це в свою чергу призводить до збільшення ефективності пиловловлення. Результати досліджень наведені в таблиці Б11 Додатку Б, а графіки, які по них побудовані, наведені на рисунках 4.29-4.31. Проведені експериментальні дослідження на стенді, наведеному на рисунку 2.1, підтвердили закономірності попередніх конструкцій апаратів, але довела значне підвищення ефективності його роботи. Перевагою цього апарата є та, що в ньому зберігаються постійними, як швидкість руху пило газового потоку в корпусі пиловловлювача, так і при проходженні через щілини між жалюзі відокремлювача, а наявність герметичного циліндрично-конічного бункера вирівнює тиски всередині корпусу апарата і в бункері. Якщо ж тиск в корпусі і бункері різний, то там, де тиск менший, почнеться підсмоктування газу і таким чином в апараті встановиться циркуляція підсмоктаного газу в очищений, що зразу порушує рівномірність розподілення швидкостей і тисків, тобто зразу знижує ефективність його роботи (аналогічно апарату III типу).

Нам вдалося збільшити ефективність пиловловлення на 4-6 % в порівнянні з еталоном, зменшивши гідравлічний опір його в 1,2-1,4 рази.

Для того, щоб звести в один ряд всі запропоновані нами конструкції пиловловлювачів, проведені дослідження на стандартному експериментальному стенді (рисунок 2.1) чотирьох типів запропонованих втором відцентрово-інерційних пиловловлювачів в порівнянні з еталоном і

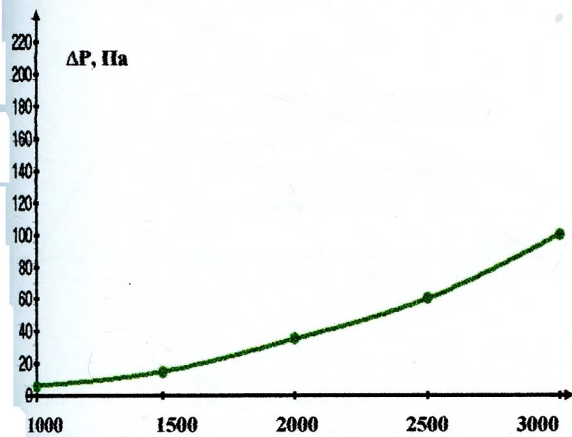


а) з дном

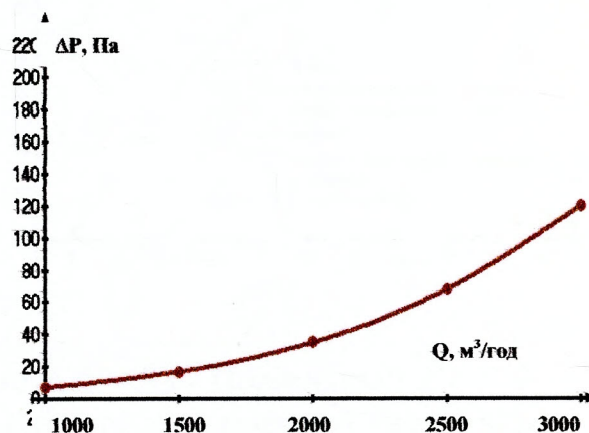


б) без дна

Рисунок 4.30- Залежність ефективності роботи пиловловлювача із ступеневим відокремлювачем і бункером з дном (η) від витрат повітря (Q).



а) з дном



б) без дна

Рисунок 4.31 - Залежність гідравлічного опору пиловловлювача із ступеневим відокремлювачем і бункером (ΔP) від витрат повітря (Q). ΔP , Па

циклоном ЦН – 11 при витратах повітря $3000 \text{ м}^3/\text{год}$ і на кварцовому піску з медіанним діаметром $\delta_{50} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, які встановили значне підвищення ефективності роботи апаратів при переході від апарату до еталону і далі від першого до четвертого типу при зменшенні гідравлічного опору в тому ж порядку. Все це можна пояснити наступним чином. Інженерна думка прямувала по шляху удосконалення конструкції найкращого з існуючих у даний час апаратів сухого обезпилювання повітря циклона ЦН – 11, детально проаналізувавши недоліки його роботи. В результаті чого була запропонована конструкція апарата в подальшому звана - еталон, який відрізняється наявністю корпусі апарата встановленого коаксійного ступеневого жалюзійного відокремлювача, яким додається друга ступінь очищення. Результати порівняння дослідження з чотирьох запропонованих конструкцій апаратів, циклона ЦН-11 і еталона наведені на рис. 4.32-4.34.

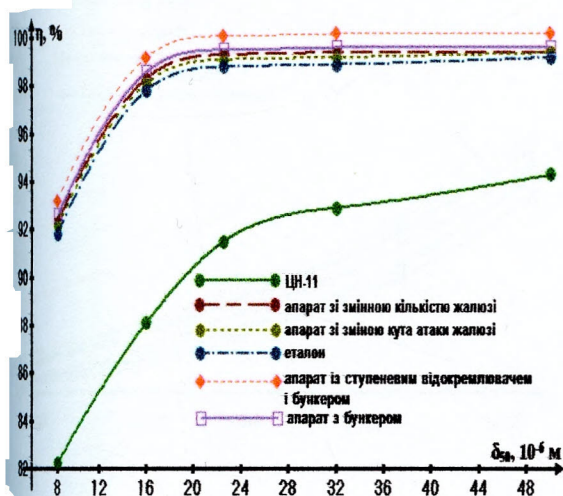


Рисунок 4.32 - Порівняльні дослідження залежності ефективності (η) запропонованих апаратів з дном та циклона ЦН-11 від медіанного діаметра пилу (δ_{50}).

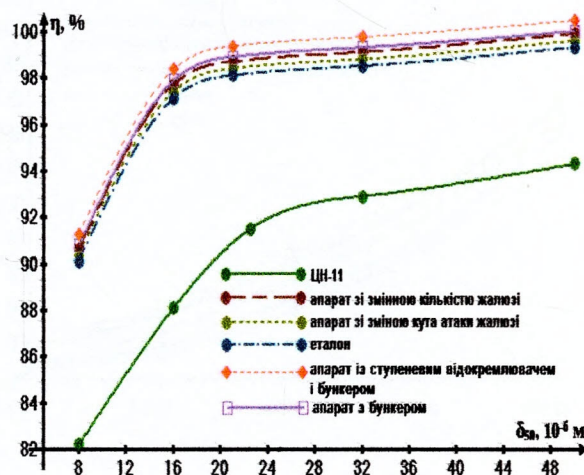


Рисунок 4.33 - Порівняльні дослідження залежності ефективності (η) запропонованих апаратів без дна та циклона ЦН-11 від медіанного діаметра пилу (δ_{50}).

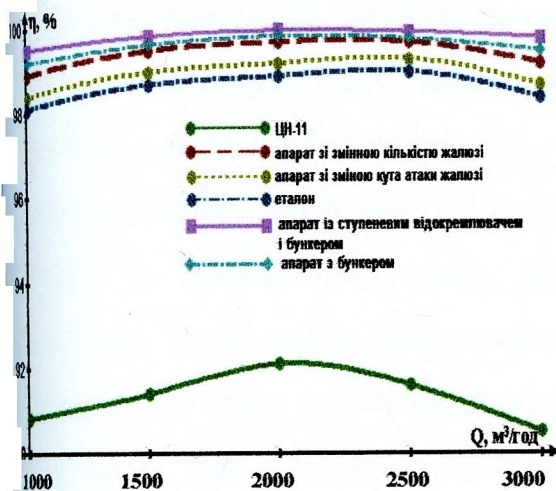


Рисунок 4.34 - Порівняльні дослідження залежності ефективності (η) запропонованих апаратів з дном та циклона ЦН-11 від витрат повітря (Q).

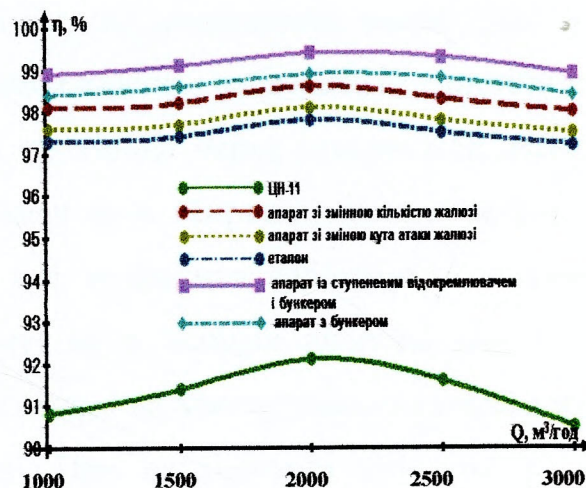


Рисунок 4.35 - Порівняльні дослідження залежності ефективності (η) запропонованих апаратів без дна та циклона ЦН-11 від витрат повітря (Q).

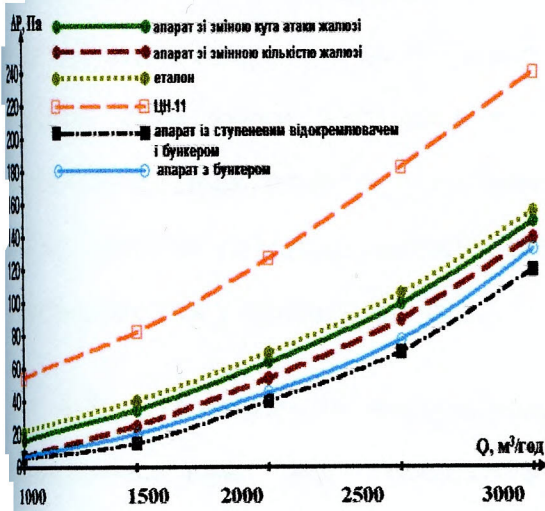


Рисунок 4.36 - Порівняльні дослідження залежності гідравлічного опору (ΔP) запропонованих апаратів з дном та циклона ЦН-11 від витрат повітря (Q).

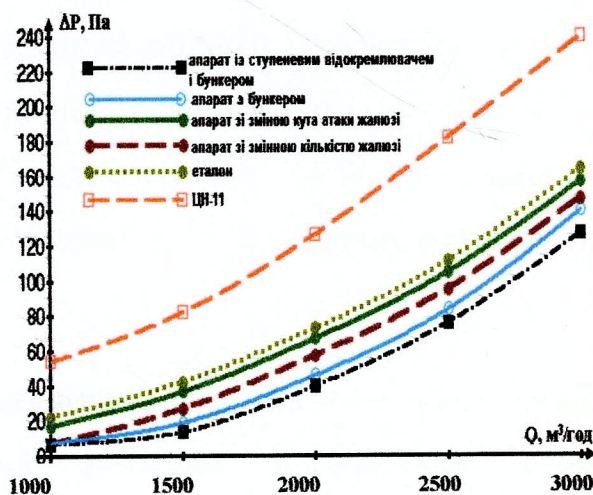


Рисунок 4.37 - Порівняльні дослідження залежності гідравлічного опору (ΔP) запропонованих апаратів без дна та циклона ЦН-11 від витрат повітря (Q).

Прагнення до вдосконалення конструкції жалюзійного відокремлювача з метою забезпечення сталою міжжалюзійної швидкості проходження потоку призвело до пропозиції створення конструкції апарата зі змінною кількістю жалюзі, дослідження якої довели переваги її перед циклоном ЦН-11 і

еталоном, але цього виявилось недостатнім для досягнення вимог ГДК для дрібнодисперсного пилу знов через неможливість забезпечити постійність швидкості руху пилоповітряного потоку не тільки через отвори між жалюзі відокремлювача, а і в корпусі апарата. Нами була запропонована конструкція апарата зі зміною кута атаки жалюзі, яка дозволила забезпечити постійні швидкості руху пило повітряного потоку, як в корпусі апарата, так і при проходженні через жалюзійний відокремлювач, і ця конструкція показала кращі результати ніж у попередній конструкції. При дослідженні цієї конструкції пиловловлювача нам вдалося довести, що провівши вдосконалення в бункері апарата, ми зможемо ще більш підняти параметри роботи апарата, тому нами була розроблена конструкція апарата з бункером, дослідження якої довели її переваги перед попередніми пиловловлювачами, що значно розширило перспективи її впровадження в різних галузях виробництва. Об'єднавши конструкцію апарата з бункером з апаратами зі змінною кількістю жалюзі та зі зміною кута атаки жалюзі в одному корпусі нам нарешті вдалося значно підвищити ефективність уловлення дрібнодисперсного пилу, знизивши при цьому енерго- та металоємності. Цей апарат і буде запропонований для впровадження у промисловість.

4.3. Статистичне моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлення від конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача

Для оцінки значущості впливу входних факторів (довжина секцій жалюзійного відокремлювача частини циліндрично-конічних апаратів, кут нахилу конуса конічної частини апаратів, медіанний діаметр частинки, витрати повітря тощо) на ефективність пиловловлення апарата було застосовано метод статистичного моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлення від конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача, заснований на регресійному аналізі входних та вихідних даних.

Регресійний аналіз є одним із основних методів, які застосовуються для

знаходження багатфакторних моделей. Перевага цього методу полягає в тому, що він практично не накладає ніяких обмежень на умови досліджень. Крім того, запис методу в матричному вигляді дає можливість використання обчислювальної техніки та відповідного програмного забезпечення для отримання коефіцієнтів регресії.

Приклад статистичного моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлення від параметрів пиловловлювача для циліндро-конічного пиловловлювача з бункером наведено нижче.

Нехай нам треба оцінити вплив кількісних факторів, які визначають умови перебігу процесу (X_1 - довжина циліндричної частини корпусу апарата (10^{-3} м) або кут конусу конічної частини корпусу (градус, $^{\circ}$), X_2 - медіанний діаметр частинки (10^{-6} м), X_3 - витрати повітря ($\text{м}^3/\text{год}$), на параметр оптимізації Y - ефективність пиловловлення апарата (%). З цією метою проведено дослідження процесу, в ході якого одержані результати спостережень, що наведені в таблиці

Таблиця 4.7. Експериментальні та обчислені значення параметрів процесу для пиловловлювача (з дном)

№ досліду	X_0	X_1	X_2	X_3	Y	Y_p
1	+1	600	50	3000	94	94,5
2	+1	700	32	2500	94,3	92,4
3	+1	800	8	2000	87,4	89,2
4	+1	850	50	1500	96,6	97,4
5	+1	900	32	1000	96,3	95,1
6	+1	950	8	3000	88,7	88,2
7	+1	1000	50	2000	96,8	97,2
8	+1	1100	32	1000	95,8	95,7

Враховуючи матрицю експериментальних даних X , знаходимо матрицю коефіцієнтів системи нормальних рівнянь:

$$X^* X = \begin{bmatrix} 7 & 3924 & 230 & 15000 \\ 3924 & 2917792 & 124944 & 7934000 \\ 230 & 124944 & 9644 & 477000 \\ 15000 & 7934000 & 477000 & 35500000 \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Запишемо знайдену систему рівнянь, яка має вид:

$$\begin{aligned} 7b_0 &+ 3924b_1 + 230b_2 + 15000b_3 = 677.58 \\ 3924b_0 &+ 2917792b_1 + 124944b_2 + 7934000b_3 = 381175.64 \\ 230b_0 &+ 124944b_1 + 9644b_2 + 477000b_3 = 22302.24 \\ 15000b_0 &+ 7934000b_1 + 477000b_2 + 35500000b_3 = 1449220 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Розв'язуючи систему нормальних рівнянь, знаходимо коефіцієнти рівняння регресії, яке має такий вид:

$$Y = 95,2064 + 0,0018559X_1 + 0,0403768X_2 - 0,000362261X_3. \quad (4.3)$$

В одержане рівняння регресії підставляють відповідні кожному досліді значення X_1 , X_2 та X_3 і таким чином знаходять вектор обчислених значень параметра Y_p .

Для перевірки адекватності одержаного рівняння регресії (5.3) знаходять залишкову регресію і дисперсію відтворення. Залишкова дисперсія, що характеризує відхилення експериментальних від обчислених за одержаною регресійною моделлю даних, становить:

$$S_\mu^2 = \sum_n (Y_e - Y_p)^2 / (7 - 3) = 0,364406. \quad (4.4)$$

Дисперсію відтворення визначають за окремою статистичною вибіркою експериментальних даних, одержаних при однакових значеннях вихідних факторів, зокрема в даному конкретному випадку значення параметра Y в умовах іншого досліді при $X_1 = 238$, $X_2 = 50$, $X_3 = 3000$ є таке: $Y_1 = 98,5$; $Y_2 = 98,4$; $Y_3 = 98,6$; $Y_4 = 98,7$; $Y_5 = 98,6$.

В ході статистичної обробки цих результатів знайдемо математичне подівання $Y_C = 98,56$, та дисперсію відтворення, яка дорівнює:

$$S_B^2 = \sum_i (Y_i - Y_C)^2 / (5 - 1) = 0,129996. \quad (4.5)$$

Висновок стосовно адекватності робимо за величиною критерію Фішера, який розраховуємо за співвідношенням дисперсій:

$$F_p = S_\mu^2 / S_B^2 = 2,80321. \quad (4.6)$$

Значення критерію Фішера, знайдене для відповідного розподілу і наведене у статистичних таблицях для випадку, коли ступені вільності для чисельника $f_1 = 3$ і для знаменника $f_2 = 4$, є $F_T = 6,5914$.

Якщо виконується умова:

$$F_p \leq F_T, \quad (4.7)$$

то одержана модель є адекватною, і її можна застосовувати для ґрунтового вивчення та оптимізації досліджуваного процесу.

Отже виконання умов (5.7) свідчить, що одержане рівняння є адекватним і його можна застосовувати для опису досліджуваного процесу.

Статистичний аналіз рівняння регресії включає також оцінку значущості коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стюдента. З цією метою проводять обчислення дисперсії коефіцієнтів за дисперсійною матрицею D ,

$$D = (X^* X)^{-1} S^2(Y) \quad (4.8)$$

$$D = \begin{bmatrix} S^2(B_0) & \text{cov}(X_0, X_1) & \text{cov}(X_0, X_2) & \dots & \text{cov}(X_0, X_k) \\ \text{cov}(X_1, X_0) & S^2(B_1) & \text{cov}(X_1, X_2) & \dots & \text{cov}(X_1, X_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{cov}(X_k, X_0) & \text{cov}(X_k, X_1) & \text{cov}(X_k, X_2) & \dots & S^2(B_k) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

де

$$S^2(Y) = S_B^2 = 0,129996.$$

Знайдені значення дисперсій коефіцієнтів та відповідні їм величини t - критерію такі:

$$\begin{aligned} S^2(b_0) &= 129,92801, & t(b_0) &= 8,35028, \\ S^2(b_1) &= 87,37936 \cdot 10^{-9}, & t(b_1) &= 6,27761, \\ S^2(b_2) &= 0,13 \cdot 10^{-3}, & t(b_2) &= 3,54133, \\ S^2(b_3) &= 12,996 \cdot 10^{-9}, & t(b_3) &= 3,17729. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Табличне значення критерію Стюдента $t_T(4) = 2,1318$ [i, ii].

Якщо виконується умова

$$t_p \geq t_T \quad (4.11)$$

для коефіцієнта при факторі X_i , то робиться висновок про те, що даний

фактор відчутно впливає на величину Y . Порівняння обчислених і табличних значень критерію Стюдента показує, що для усіх коефіцієнтів у рівняннях регресії виконується умова (5.11), яка дає змогу стверджувати, що коефіцієнти є значущими і відповідні фактори суттєво впливають на параметр Y .

У зв'язку з тим, що проведення регресійного аналізу передбачає значного обсягу обчислень, доцільним є використання обчислювальної техніки та відповідного програмного забезпечення.

На основі наведеного методу статистичного моделювання використовуючи інтегроване середовище Borland C++ 4.5 була створена програма MNK (Додаток Б), яка визначає коефіцієнти рівняння регресії (5.3), залишкову дисперсію (5.4), дисперсію відтворення (5.5), величину критерію Фішера (5.6) та значення критерію Стюдента (5.10) для всіх коефіцієнтів рівняння регресії [13].

За розрахунками одержуємо рівняння регресії досліджуваних процесів, приведені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8. Рівняння регресії досліджуваних процесів

Назва пиловловлювача	Жалюзійний відокремлювач	Рівняння регресії досліджуваних процесів
Циліндрично-конічний	Циліндричний з дном	$Y = 90,625 + 9,97145 \cdot 10^{-5} \cdot X_1 + 0,178219 \cdot X_2 - 0,000715421 \cdot X_3$
	Циліндричний без дна	$Y = 89,8448 + 0,000960825 \cdot X_1 + 0,185764 \cdot X_2 - 0,000812001 \cdot X_3$
ЦН-11	-	$Y = 83,1709 + 0,0848919 \cdot X_2 + 0,0017504 \cdot X_3$

У рівняннях: X_1 - довжина циліндричної частини корпусу апарата (10^{-3} м), X_2 - медіанний діаметр частинки (10^{-6} м), X_3 - витрати повітря ($\text{м}^3/\text{год}$); Y - ефективність пиловловлення апарата (%).

За допомогою одержаних рівнянь регресії визначені значення ефективності пиловловлювання для кожного досліджуваного пиловловлювача при

відповідній зміні конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача. Результати розрахунків приведені в таблицях Б.1, Б.11 (колонка 4), де їх можна порівняти з результатами експериментальних досліджень (колонка 3). Відхилення розрахункових даних від експериментальних не перевищує 5-15 %.

4.4 Висновки до розділу 4

Проаналізовані результати експериментальних досліджень еталонного пиловловлювача довели, що ефективність роботи апарата з дном перевищує ефективність роботи апарата без дна, але цього недостатньо для високоефективного вловлення дрібнодисперсного пилу.

2. Проведені порівняльні дослідження найбільш поширеного пиловловлювача циклона ЦН-11, еталона і двох запропонованих конструкцій пиловловлювачів підтвердили думку про те, що при підтримці постійних швидкостей руху пилоповітряної суміші як в корпусі апарата, так і при проходженні через щілини між жалюзі відокремлювача значно підвищується ефективність роботи апарата, але негативним в їх роботі є наявність підсосів і вторинного вихору з бункера циклона.

3. Об'єднавши конструкцію апарата з бункером з апаратами зі змінною кількістю жалюзі та зі зміною кута атаки жалюзі в одному корпусі нам нарешті вдалося значно підвищити ефективність уловлення дрібнодисперсного пилу, знизивши при цьому енерго- та металоємності, що відкриває широкі перспективи для їх впровадження.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОВІТРЯ ВІД ПИЛУ

В результаті багаторічної роботи, на базі теоретичних і експериментальних досліджень ми створили серію апаратів, які поєднали в собі різні фізичні явища: дію відцентрових, інерційних сил і сил ваги. Всі вони мають корпус певної форми, всередині якого розташований ступеневий жалюзійний відокремлювач, конусоподібну частину якого захищено цілим рядом охоронних документів [106-111].

У попередніх розділах ми довели перевагу кожного з них перед кращим з “сухих” апаратів пилоочищення - циклоном ЦН-11 та апаратом, який вибраний нами в якості еталону.

У кожному конкретному випадку впровадження установки для очистки повітря від пилу визначався дисперсний склад, фізико-хімічні й морфометричні властивості пилу, після аналізу яких підбирався тип пиловловлювача. Запропонований апарат спочатку досліджувався на експериментальному стенді ІНУ “Львівська політехніка” у порівнянні з найкращими з “сухих” пиловловлювачів (розділ 2) циклоном ЦН-11 і еталоном, аналізувалися результати цих досліджень і потім ішло впровадження вибраної схеми очистки у виробництво. Випробування дослідно-промислової установки, як правило, доводило реальність наших пропозицій.

Всі установки, які впроваджені у виробництво, ми умовно розділили на 3 групи:

1. Виробництва, де використовуємо відцентрово-інерційні пиловловлювачі.
2. Виробництва, для яких підготовлена технічна документація для впровадження.
3. Виробництва, по яких підготовлені протоколи намірів про впровадження установок для очистки повітря від пилу.

Розглянемо ці три напрямки роботи.

У результаті багаторічної роботи, на базі теоретичних і експериментальних досліджень, ми створили цілу серію відцентрово-інерційних пиловловлювачів, які при детальному дослідженні виявили, що кожний наступний апарат конструктивно досконаліший попереднього. Саме так і мало бути, тому що кожний наступний пиловловлювач створювався після аналізу недоліків попереднього з метою їх усунення.

У процесі впровадження цих апаратів у промисловість ми виявили, що для кожної групи виробництв підходить своя конструкція апарату, застосувавши яку, ми зможемо досягти максимальної ефективності вловлювання даного конкретного пилу, достатньої для досягнення в даній галузі екологічних та санітарно-гігієнічних норм.

Проаналізуємо це припущення наступними прикладами, де впроваджені запропоновані нами відцентрово-інерційні пиловловлювачі.

5.1. Вдосконалення установок знепилювання на ВАТ «Львівський локомотиворемонтний завод»

На ПАТ «Львівський локомотиворемонтний завод» місцями, що викидають найбільшу кількість пилу, є дробометне обладнання та піскоструйні камери, де для очищення повітря від пилу використовується циклони ЦН-11 (розділ 1), який не в змозі високоефективно вловити дрібнодисперсні фракції пилу. Нами запропоновані схеми очистки із застосуванням нашої конструкції.

За договором проводилися дослідження ефективності застосування нових систем пиловловлювання, у повній відповідності до вимог «Єдиної методики випробувань пиловловлювачів» [57] на пилах, які утворюються при технологічних процесах виробництва.

На якість підготовки поверхні значною мірою впливає також режим дробеструминної обробки. Для отримання позитивних результатів рекомендується швидкість руху дробу 60-70 м/сек., а швидкість досягається при 2400-4000 об/хв. ротора або тиску 50-104 – 59-104 н/м² при відстані від сопла

пневматичної установки до оброблюваної поверхні 250-300мм. На відцентрових установках ця відстань має бути 300-360мм. Найбільша шорсткість виходить при куті падіння, наближеному до $130 \times 10^2 - 157,5 \times 10^2$.

Установка енергетичного забезпечення сепарації поверхні пилу, який утворюється при обробці локомотивів дробом, знепилення робочої зони й попереднього очищення від пилу відбувається в дробометному обладнанні моделі 9.4400, яка призначена для переміщення і очистки від пилу з середнім розміром частинок більших за 2×10^{-5} м при запиленості до 150 г/м³ повітря. Установка використовується, як самостійний агрегат для очистки повітря. Основні технічні характеристики існуючої установки наведені в таблицях 5.1 –

Таблиця 5.1 Технічні характеристики дробометної установки

Назва параметрів і розмірів	Дані
Діаметр робочого колеса, мм	1000
Швидкість обертання, об / хв	980
Продуктивність, м ³ / год	14000
Повний тиск при $t = 20^{\circ} \text{C}$, кгс/м ²	180
Аеродинамічний ККД, %, не менше	47
Запиленість повітря на вході, г / м ³ , не більше	150
Ефективність пилоуловлювання пилу з середнім розміром частинок $1.6 \cdot 10^{-4}$ м, вхідною концентрацією $6 \cdot 10^{-3}$ кг/м ³ і швидкості повітря в вхідному патрубку 19 м/с, % не менше	90
Кількість повітря, що рециркулюється через циклон, %, не більше)	15
Тип циклона	ЦН-11
Габаритні розміри, $1 \cdot 10^{-3}$ м	
Довжина, м	4,9
Ширина, м	4,0
Висота, м	5,0
Потужність електродвигуна, кВт	22

Розміщення основних елементів установки наведено на рисунку 5.1.

Основними вузлами установки є: димар-пиловловлювач, циклон, розвантажувальний пристрій, візок, опора, рама і повітроводи.

Димар-пиловловлювач являє собою комбінований газоочисний апарат, який

складається з наступних частин:

корпуса, який складається з равлика вентилятора 4, розділених загальною стінкою. Розділ равликів проходить у двох площинах під кутом 130° . Для огляду і ремонту робочого колеса 3 і крильчатки 7 передбачені люки;

направляючого радіального апарата, який виконаний із сталевих листів на середній стінці корпуса;

- робочого колеса, яке складається із ступиці, переднього і заднього дисків, між якими приварені 18 лопаток. Для підвищення зносостійкості колеса приварені накладки із зносостійкої сталі;

- додаткового робочого колеса (крильчатки), яке складається зі ступиці і диску, до якого приварені профільні лопатки;

- підшипникових вузлів 2 і електродвигуна 1, які встановлені на зварній опорній рамі, яка кріпиться на загальну раму 8. Підшипники типу 3614 по ГОСТ 5721-75;

- шибер 11, який служить для підвищення ступені очистки повітря від пилу. Для забезпечення ефективної очистки повітря шибер повинен бути закритий на 50%.

Виносний циклон 9 – це зварна конструкція, яка виконана зі сталевих листів. Встановлюється циклон у зручному місці для відвантаження пилу в безпосередній близькості від корпуса димаря на відстані не більше 2-3 метрів.

Розвантажувальний пристрій (затвор) 10 служить для видалення пилу в приймальну ємність (візок) 13, який виконаний зі сталевих листів.

Опора 12 – зварна конструкція, яка виконана з профільного прокату, служить встановлення і кріплення циклона.

Опис роботи установки. Запилений потік повітря зі швидкістю 18-25 м/с через повітровід 14 всмоктується у вхідний спіральний патрубок - равлик 6, де отримує криволінійний рух. Під дією відцентрових сил пил концентрується у периферійній зоні равлика пиловловлювача і разом з невеликою кількістю повітря (біля 15%) відводиться по повітроводу в циклон, де відбувається кінцеве відокремлення пилу. З циклона очищений потік всмоктується в центральну

частину равлика, тобто відбувається рециркуляція. Відсмоктування пилового концентрату через циклон здійснюється за рахунок різниці тиску між центром равлика та його периферією. Різниця тиску в даному випадку збільшується за рахунок роботи допоміжної крильчатки. Знаходячись у центральній частині равликового пиловловлювача, крильчатка додатково розкручує потік, чим підвищує його тангенційну швидкість, завдяки чому збільшується ефективність сепарації пилу до периферії равлика. При цьому коефіцієнт очистки пиловловлювача збільшується. Очищене повітря центральної зони равлика через направляючий апарат поступає в робоче колесо димаря, а потім через равлик і відповідний повітровід 15 викидається зовні. Направляючий апарат служить для випрямлення закрученого потоку і відводу його до робочого колеса димаря-пиловловлювача. При відсутності направляючого апарата тиск і аеродинамічний КД різко зменшуються.

Регулювання продуктивності димаря-пиловловлювача здійснюється шибером. При його закритті потік направляється до периферії равлика і коефіцієнт очистки пиловловлювача підвищується.

Такий спосіб регулювання продуктивності забезпечує стійку ефективність очищення апарата в широкому діапазоні змін повітряних навантажень.

Зниження зносу допоміжної крильчатки досягається шляхом встановлення в тракті рециркуляції високоефективного циклона. Гідравлічний опір циклона не впливає на величину тиску, який розвивається, і продуктивність установки.

Ефективна робота димаря пиловловлювача залежить від його правильного монтажу і відповідного технічного обслуговування.

Повітроводи герметичні і не мають різких викривлень. Радіус заокруглень повітроводів не менший ніж $1,5 \div 2 \text{ Д}$ (Д – діаметр повітроводів).

Порядок роботи установки.

- Закрити шибер равлика-пиловловлювача;
- Провести огляд установки, прибрати сторонні предмети;
- Включити електродвигун;

-Прослухати установку і переконатися у відсутності стуку, шуму і вібрації, в разі їх появи зупинити установку, з'ясувати причини і усунути несприятелі;

-Поступово відкрити шибер, збільшуючи навантаження до необхідної величини.

Нами проведені дослідження процесу пилоуловлювання при очищенні локомотивів дробом в установці продуктивністю 12000м³/год., де була встановлена батарея з 4 циклонів продуктивністю 3000 м³/год кожний.

Для дослідження роботи установки, згідно з методиками, які наведені в розділі 2, нами визначені основні якості пилу дробу.

1. *Морфологія частинок пилу.* Частинки неправильної форми з гострими гранями коричневого і темно-сірого кольору. $\delta_{50} = 26 \cdot 10^{-6}$ м, $\rho_{\text{пит}} = 1640$ кг/м³.

2. *Дисперсний склад пилу.*

Таблиця 5.2 Дисперсний склад пилу

d, 10 ⁻⁶ м	4,0	6,3	10	16	25	40
q, % (по масі)	98,8	97,2	93	80	53	15
V см/с	0,22	0,55	1,4	3,58	8,75	21,5

3. *Хімічний склад пилу.*

Таблиця 5.3 Хімічний склад пилу(седиментація в часі)

Компоненти	SiO ₂ (зв'яз.)	SiO ₂ (вільн.)	CaO	MgO	Fe	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Вміст % (по масі)	1,0	9,3	9,1	1,8	24,6	43,0	7,9

В існуючій установці застосовувався циклон ЦН - 11, ефективність очистки повітря від пилу в якому складала 85 %, що не відповідає ні санітарно - гігієнічним нормам викидів повітря з робочої зони, ні екологічним нормам по ПДВ,

Нами були проведені експериментальні порівняльні дослідження існуючого в даний час циклона ЦН - 11 в порівнянні з запропонованим нами пиловловлювачем четвертого типу, загальний вигляд якого наведений на рисунку 4.20, у промислових умовах ПАТ «Львівський локомотиворемонтний завод» (рисунк 1.2) для пилу дробу, склад якого наведений вище. Дані досліджень наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 Залежність ефективності пилоуловлювання від продуктивності дробометної установки

Продуктивність	Ефективність пилоуловлювання , %	
	Циклон ЦН - 11	Запропонований пиловловлювач (III тип)
1	2	3
1000	70,3	83
1500	73,1	86,2
2000	75	91,0
2500	80	97,1
3000	85	98

З таблиці видно, що тільки заміною циклонів ЦН-11 на пиловловлювачі IV типу можна підвищити ефективність пилоуловлювання на 5-8%, що дозволило зменшити запиленість робочих місць, покращити умови праці, довести викиди пилу в навколишнє середовище до норм ГДВ.

Установка пилоуловлювання показана на рисунку 5.2 (група з 4-х циклонів друга справа).

Враховуючи результати експериментальних досліджень, нами в установці енергетичного забезпечення сепарації і обезпилювання в дробометному обладнанні (рисунк 5.2) на ПАТ «Львівський локомотиворемонтний завод» циклон ЦН – 11 замінений циліндрично-конічним інерційним пиловловлювачем нашої конструкції IV-го типу, що підвищило ефективність пилоуловлювання установки до 99,2%,

Таким чином, нам вдалося вдосконалити установку так, що її робота забезпечує дотримання норм ГДК на робочих місцях і норм викидів в атмосферу.

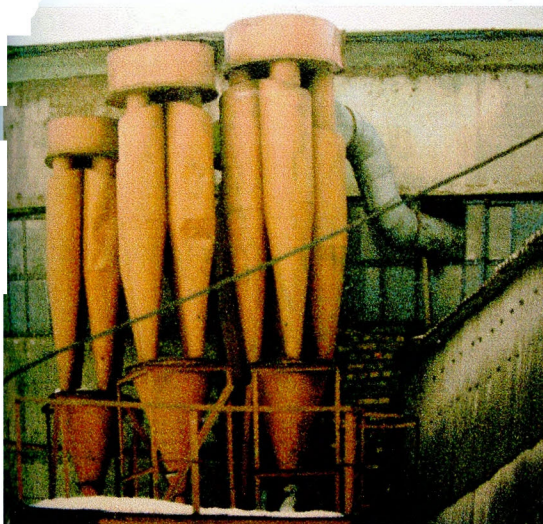


Рисунок 5.2 - Установка
пилувловлювання

Акт впровадження і випробувань
наведений в додатку Д.1.

Піскоструминна камера є металевим
ящиком прямокутної форми на підставках.
У цьому "ящику" є оглядове вікно,
розміщене на передній стінці камери, яке
займає велику частину передньої стінки.
Також на передній стінці, під оглядовим

вікном є отвори з розміщеними в них камерними рукавицями. Просунувши руки
в рукавиці оператор може виконувати піскоструминні роботи. Піскоструминне
устаткування закритого типу або піскоструминні камери призначені для обробки,
як правило невеликих виробів. Піскоструминні камери можуть бути виготовлені
в різних виконаннях - із вбудованими фільтрами і вентилятором, що вирішує
питання підведення відпливної вентиляції. Піскоструминні камери можуть бути
окремою виробничою ділянкою, а можуть бути встановлені в потокову лінію.
Цей вид піскоструминного устаткування технологічний ще і тому, що
піскоструминну камеру можна повністю автоматизувати і виключити, тим
самим, витрати на заробітну плату оператора.

**Установка для вловлювання пилу при очищенні поверхні локомотива в
піскоструминній камері продуктивністю 3000 м³/год, яка виділяє пил
наступного складу:**

1. Морфологія частинок:

частинки розміром більше $1,5 \cdot 10^{-4}$ м - кристалічної форми, безкольорові і
жовтувато - сірі, частинки розміром меншим $1,5 \cdot 10^{-4}$ м - жовто-сірого і
бронзового кольору,

2. Дисперсний склад (ситовий аналіз) наведений в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

d, 10^{-6} м	100	160	200	315	400	630
q, % (по масі)	97	88,7	70	41,3	22,8	7,1

3. Хімічний склад наведений в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Компоненти	SiO ₂ (вільні)	SiO ₂ (зв'язані)	Fe	Ca	MqO
1	2	3	4	5	6
Склад, % (по масі)	42,3	15,3	15,5	1,3	0,9

Пиловлловлювач, який входить в склад цієї установки, розроблений автором цієї роботи і захищений патентом на винахід [108].

У результаті досліджень встановлено, що ефективність уловлення пилу в вищенаведеній установці складає 98,2 %, що на 11% вище ефективності роботи циклонів ЦН-11, які встановлені на аналогічних виробництвах.

Впровадження установки дозволило зменшити запиленість робочих місць, покращити умови праці, довести викиди забруднюючих речовин до норм ГДК і ГДВ.

Ця установка рекомендується для впровадження в аналогічних виробництвах для уловлювання аерозолів пилу, що утворюються при роботі обладнання інструментальних цехів.

Загальний вигляд установки уловлювання пилу показана на рисунках 5.3; 5.4.



Рисунок 5.3- Установа для уловлення пилю при очистці поверхні локомотива в піскоструйній камері продуктивністю 3000 м³/год

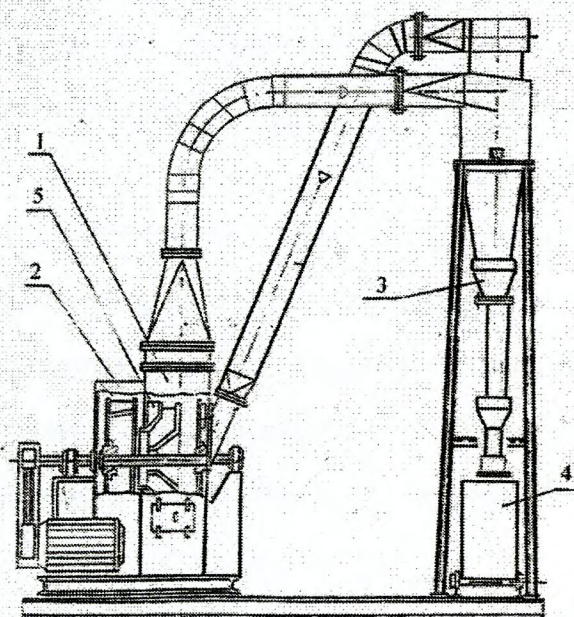


Рисунок 5.4- Установа обезпилювання піскоструйного обладнання: 1-вхідний патрубок; 2-вентилятор; 3-пиловловлювач; 4-бункер; 5-направляючий апарат; 6-піскоструйна камера

5.2. Оцінка впливу викидів забруднюючих речовин на стан забруднення атмосферного повітря

Оцінка впливу викидів забруднюючих речовин на стан забруднення атмосферного повітря здійснювалась за даними результатів розрахунків розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за допомогою "Методики расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86)", Ленинград, Гидрометеиздат, 1987. Аналіз одержаних результатів розрахунків розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі проводився на ЕОМ за допомогою програми ЕОЛ – 2000, погодженою Мінприроди України (5185/18-10 від 22.05.2003).

Розрахунок розсіювання шкідливих речовин в атмосферному повітрі виконано для майданчика в розрахункових прямокутниках з розміром сторін

2000 м на 2000 м та кроком розрахункової сітки 100 м. Шкідливою речовиною в даному випадку є пил дробометного та піскоструминного виробництва (максимально разова граничнодопустима концентрація становить 6 мг/м^3).

Під час проведення розрахунків розсіювання були враховані наступні особливості:

1. Кліматичні характеристики населеного пункту, в якому розташовані джерела забруднення, а саме середня температура самого теплого місяця року, середня температура самого холодного місяця року, швидкість вітру, повторюваність якої протягом року складає більше 5%, регіональний коефіцієнт атмосферної стратифікації (стійкості) та ймовірність повторень напрямків вітрів за 8-ми румбовою розою вітрів.

2. Фонове забруднення атмосферного повітря населеного пункту, в якому розташовані джерела викидів, для пилу дробометного виробництва. Оскільки інструментальні спостереження для цієї речовини в даних населених пунктах не ведуться, то фонове забруднення приймаємо 0,4 частки ГДК для даної речовини.

Результати розрахунку і аналіз карт розсіювання шкідливих речовин в приземному шарі атмосферного повітря показали, що для всіх джерел викиду, які обладнані циклонами ЦН-11, виявлено перевищення ГДК для пилу дробометного виробництва, при цьому максимальні концентрації в частках ГДК дорівнюють: м. Львів (для 1-го пиловловлювача) – 2,137 ГДК.

У випадку джерел викиду, що обладнані розробленими пиловловлювачами нашої конструкції, перевищень ГДК не спостерігається в жодному місці цього району Львова.

Для існуючого пиловловлюючого обладнання та створених і впроваджених пиловловлювачів побудовані карти розсіювання пилу на території підприємств, де працюють дробометні та піскоструйні установки:

1. для дробометної установки продуктивністю $12000 \text{ м}^3/\text{год}$ - на ПАТ «Львівський локомотиворемонтний завод» - батарея з 4 циклонів продуктивністю $3000 \text{ м}^3/\text{год}$ кожний (рисунок 5.2). Ефективність цієї установки дорівнює 99,2 % (циклона 85,0%).

2. для уловлювання пилу при очистці поверхні локомотива в піскоструминній камері продуктивністю 3000 м³/год (рисунок 5.3). Акти випробувань і використання наведені в додатках В.1 – В.5.

Кarti розсіювання пилу на території підприємства, що було обладнано циклонами ЦН-11 (рисунок 5.4) та після впровадження нових пиловловлювачів (рисунок 5.5) наведені нижче.

Параметри розрахункових даних для визначення карти розсіювання наведені в таблиці 5.7.

5.3. Економічне обґрунтування впровадження пиловловлювачів

При техніко-економічному обґрунтуванні застосування апаратів пиловловлювання враховується максимально більша кількість факторів, а саме:

а) найбільш імовірний повний обсяг усіх соціально-економічних наслідків у різних сферах господарства, як у найближчій так і у більш віддалених перспективах;

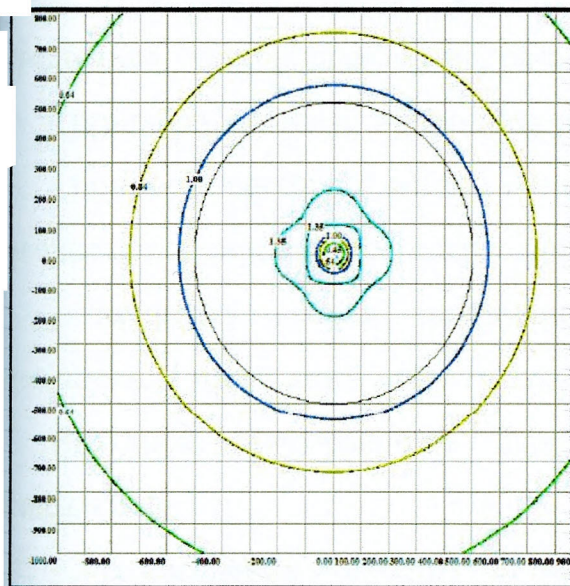


Рисунок 5.4 - Карта розсіювання пилу на ПАТ «Львівський локомотиворемонтний завод», обладнаного циклоном ЦН-11

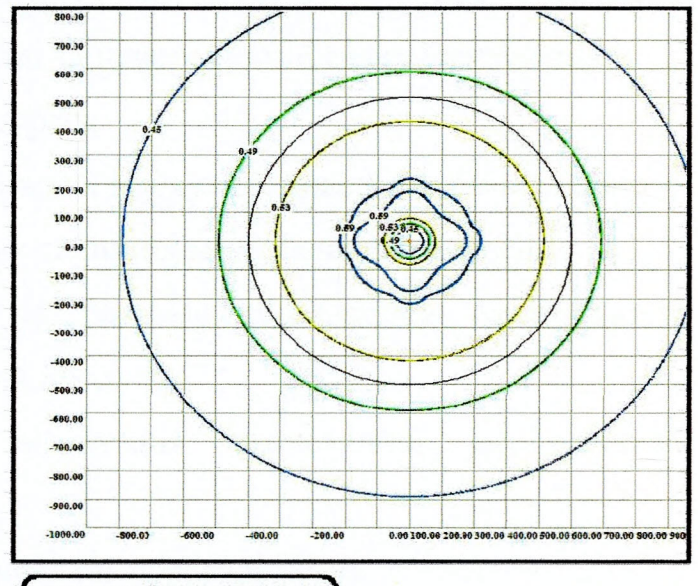


Рисунок 5.5 - Карта розсіювання пилу на ПАТ «Львівський локомотиворемонтний завод», обладнаного пиловловлювачами нашої конструкції

Таблиця 5.7 Параметри розрахункових даних

	Система очистки від пилу	
	циклон ЦН – 11	Пиловловлювач
Потужність викиду, 10^{-3} кг/с	0,4105	0,0804
Потужність викиду за рік, кг/рік	8867	1736
Частка Г ДК	1,1948	0,2339
Витрати пилогазової суміші, $\text{м}^3/\text{с}$	4,44	4,44
Висота джерела викиду, м	11	11
Діаметр джерела викиду, м	0,8	0,8
Температура, $^{\circ}\text{C}$	125	125

б) повний обсяг усіх витрат, пов'язаних з впровадженням апаратів;

в) міжгалузевий підхід з урахуванням необхідності витрат на поліпшення стану навколишнього середовища і забезпечення більш ефективного використання природних ресурсів у масштабах розглянутої території і в цілому.

Економічним ефектом впровадження нових пиловловлюючих апаратів є сума наступних величин:

- запобігання економічним збиткам від забруднення навколишнього середовища у матеріальному виробництві та невиробничій сфері і населення;
- приросту економії природних ресурсів;
- приросту грошової оцінки реалізованої продукції, внаслідок більш повного використання сировинних, енергетичних та інших матеріальних ресурсів;
- приросту готової продукції за рахунок підвищення ефективності уловлювання пилу, який містить готовий продукт.

Вихідною інформацією для визначення економічної ефективності приймається:

- для населення – екологічно обумовлені працездатність, захворюваність та інвалідизація по кожному нозологічному виду (за віком, зайнятості і тривалості захворювання або інвалідності з тимчасовою чи постійною втратою працездатності); витрати організацій та установ охорони здоров'я на стаціонарне амбулаторне лікування населення; виплати населенню з фондів соціального страхування і соціального забезпечення за період тимчасової або постійної

непрацездатності; об'єм недовиробленої чистої продукції за час хвороби й інвалідності для зайнятих у сфері матеріального виробництва;

- для житлово-комунального господарства – термін служби основних фондів; періодичність біжучого та планового (попереджувального) ремонтів житлових і суспільних будівель; тривалість міжремонтних циклів, капітальних ремонтів; простоїв обладнання під час ремонту; площа міських територій, які прибираються від пилу; стан міських зелених насаджень;

- для сільськогосподарських і лісових угідь, рибного промислу – продуктивність угідь та водойм; якість сільськогосподарських і лісових культур; міни об'ємів приросту та всихання дерев; кількість санітарних рубок; об'єм забруднень земельних угідь та водоймищ; кількість площі водойм; чисельність водних біоресурсів (з урахуванням цінності порід); продуктивність тваринництва на кормових угіддях;

- для основних фондів промисловості – терміни фізичного зносу і тривалості міжремонтних циклів; кількість відмов у роботі виробничого обладнання; тривалість простою обладнання під час ремонту; стан вантажного транспорту; екологічно обумовлена продуктивність машин та механізмів; показник фондівіддачі (у натуральних вимірах); вартість основних виробничих фондів, які знаходяться у забрудненій зоні.

Як приклад, розглянемо економічну ефективність від впровадження пилоловлювачів нашої конструкції на ПАТ «Львівський локомотиворемонтний завод» для уловлювання пилу за добу.

Економічна оцінка збитків, що заподіяні річними викидами в атмосферу, визначається за формулою:

$$З = \gamma G F M, \quad (5.1)$$

де: $З$ - оцінка збитку (грн./рік); γ - константа = 2,4 грн./ум.т;

G – безрозмірна величина = 4 (для територій промислових підприємств і промислових вузлів);

$F = 10$ - поправка, яка враховує характер розсіювання в атмосфері дрібнодисперсних частинок пилу зі швидкістю осідання понад $20 \cdot 10^{-2}$ м/с;

М - значення приведеної маси річного викиду забруднень, яке визначається за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^N A_i \cdot m_i \quad (5.2)$$

де: m_i - маси річного викиду домішок i -го виду пилу в атмосферу, залежить від ефективності пиловловлювання застосованого апарату, т/рік;

A_i - показник відносної агресивності домішок i -го виду, для пилу - $A_i = 45$;

N - загальна кількість домішок.

У конкретному випадку до застосування нашого апарату ефективність уловлювання пилу складала 85,2 %, а після впровадження апарату нашої конструкції (розділ 4) ефективність уловлювання складала 98,2 %, тобто вдалося підвищити її на 13% (для піскоструминного обладнання).

За добу в навколишнє середовище виноситься 170-180 кг пилу (візьмемо для розрахунку 175 кг).

При ефективності уловлювання – 98,2 % викидається в атмосферу 3,50 кг пилу за добу; при ефективності 85,2 % - 26,25 кг пилу за добу.

Відповідно m_i до впровадження складає:

$$45 \cdot 365 \cdot 26,25 = 431,156 \text{ т};$$

m_i після впровадження:

$$45 \cdot 365 \cdot 3,50 = 57,475 \text{ т.}$$

Збитки до впровадження установок пилоуловлювання складають (ф.5.1):

$$2,4 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 431,156 = 41391 \text{ грн.}$$

Збитки після впровадження запропонованих установок складають:

$$2,4 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 57,475 = 5517,8 \text{ грн.}$$

Наведений приклад розрахунку економічної оцінки збитків, що спричиняють викиди пилу в атмосферу, показує, що використання розробленого пиловловлювача в установці для очистки повітря від пилу зменшує збитки у 7,5 рази.

Розрахуємо чистий економічний ефект від впровадження запропонованих

нами пиловловлювачів. Чистий економічний ефект в даному випадку визначається, як вартість додаткового продукту (в даному випадку дробу), вловленого з пилоповітряної суміші, завдяки підвищенню ефективності пилоуловлювання системи з 85,2 % до 98,2 %. Розрахунок проводиться за формулою:

$$E_{\text{ч}} = (M_{\text{ст}} - M_{\text{н}}) \cdot B, \quad (5.3)$$

де $E_{\text{ч}}$ - чистий економічний ефект, грн.;

$M_{\text{ст}}$ – маса пилу, що викидається у повітря в старій системі пилоуловлювання,

$M_{\text{н}}$ - маса пилу, що викидається у повітря у впровадженій системі пиловловлювання, т;

B – вартість пилу, 20 грн./т.

$$E_{\text{ч}} = (431,156 - 57,475) \cdot 20 = 7473,62 \text{ грн.}$$

Таким чином, сумарний економічний ефект від впровадження наших пиловловлювачів у піскоструминній установці становить суму всіх складових даного розрахунку:

$$\Sigma = (41391 - 5517,8) + 7473,62 = 43346,82 \text{ грн.}$$

При впровадженні запропонованих пиловловлювачів при дробометній обробці локомотиву у конкретному випадку ефективність уловлювання пилу в існуючій установці становить 97,2%, а після впровадження пиловловлювачів, розроблених нами, склала 99,2%, тобто вдалося збільшити її на 12%.

За добу в навколишнє середовище викидається 290-310 кг пилу (візьмемо для розрахунку 300 кг дробу).

При ефективності уловлювання 87,2% сьогодні викидається в атмосферу 840 кг дробу, а після встановлення апаратів нашої конструкції ($\eta=99,2\%$) – всього 2,4 кг.

Відповідно M_1 до впровадження становить:

$$45 \cdot 365 \cdot 68,40 = 1123,47 \text{ т,}$$

а після впровадження:

$$45 \cdot 365 \cdot 2,4 = 39,42 \text{ т}$$

Збитки на існуючій установці складають

$$2,4 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 1123,47 = 107853,12 \text{ грн.}$$

Збитки після впровадження пиловловлювачів складають:

$$2,4 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 39,42 = 3784,32 \text{ грн.}$$

тобто збитки зменшилися майже в 30 разів.

Чистий економічний ефект за формулою 5.3 складає:

$$E_{\text{ч}} = (1123,47 - 39,42) \cdot 45 = 48783,15 \text{ грн.}$$

де 45 – вартість 1 кг дробу, грн.

Таким чином, сумарний економічний ефект:

$$\Sigma = (107853,12 - 3784,32) + 48783,15 = 152851,95 \text{ грн.}$$

Сумуючи економічні ефекти від впровадження запропонованих пиловловлювачів у піскоструйній і дробометні установках, отримуємо загальний економічний ефект від впровадження:

$$\Sigma = 152851,95 + 43\,346,82 = 196198,77 \text{ грн.}$$

5.4. Перспективи використання розроблених пиловловлювачів

5.4.1. Видобуток сланцевого газу. Сланцевий та вугільний газ, газ із піщаників, інші види газу, які накопичилися в різних гірських породах, називають «нетрадиційним», тобто не тим, який звично видобувають в стандартному вигляді. Газ із сланців сьогодні в Україні не видобувається, а видобуток шахтного метану ведеться на шахтах Донбасу.

В Україні теоретично є великі родовища сланцю, зокрема родовище на кордоні Кіровоградської і Черкаської областей (Бовтиське родовище.), яке є

ретім за своїми розмірами в Європі. Крім того, є і інші потужні райони, в яких потрібно проводити пошукові та геологорозвідувальні роботи, вивчати ці сланці, наносити їх на мапу і описувати, наскільки готові вони до розробки. Це - Волино-Подільський вугільний басейн, менілітові сланці Карпат, Крим, Дніпровсько-Донецька западина, Український щит. Для вивчення цих районів потрібні значні інвестиції.

На сьогодні сланцевий газ є надзвичайно актуальним для України вже навіть з огляду на здобуття енергетичної незалежності України, проте його видобуток має ряд суттєвих особливостей.

Уже кілька років Україна залишається в центрі міжнародної дискусії про перспективи видобутку сланцевого газу. За попередніми оцінками експертів, його запаси на нашій території становлять від 2 до 30 трлн. кубометрів, що за умови його інноваційного видобутку та використання дасть можливість у майбутньому подвоїти запаси вітчизняного газу. Так званий нетрадиційний газ у перспективі зможе кардинально вплинути на український ринок, який сьогодні потерпає від потужної політичної складової, та забезпечити енергетичну безпеку держави.

Питання стає особливо актуальним, якщо оцінити ситуацію з видобутком традиційного природного газу в Україні. Держава на сьогодні не володіє достатніми ресурсними можливостями на розробку нових родовищ. Сьогодні в Україні, за реальними оцінками, щорічний видобуток становить близько 20 млрд. кубометрів газу, 18 млрд. з яких видобуває поки що національна компанія «Нафтогаз України», ще 2 млрд. - приватні компанії. При цьому видобуток НАКу постійно зменшується, чого не скажеш про видобуток іноземних компаній, який або залишається стабільним, або зростає, якщо зважити на його мізерні 10% від загальної кількості видобутого в Україні газу.

У публічній і дипломатичній площині керівництво України декларує неприхований інтерес до питання видобутку сланцевого газу, тому 9 лютого 2011 року Кабінет міністрів України схвалив проект Меморандуму про взаєморозуміння між урядом України та урядом США стосовно ресурсів газу з

нетрадиційних джерел. Документ покликаний створити умови для обміну знаннями та експертними напрацюваннями між урядами в сфері оцінки та кваліфікації ресурсів сланцевого газу в Україні, заохочувати і розвивати прямі контакти і співробітництво між органами влади, університетами, дослідними центрами, інститутами, розвідувальними та видобувними компаніями. А в березні 2011 р. на засіданні міжвідомчої комісії за ініціативи компаній Shell і Chevron було прийнято рішення про проведення у червні – липні 2011 року тендеру на укладення угоди про розподіл продукції на двох родовищах: на ділянці Олеської площі розміром 6,3 тис. кв. км (Львівська область) та на Юзівській площі розміром 8 тис. кв. км (межа Харківської та Донецької областей). Цікавість до цих родовищ проявляють і такі компанії, як ТНК-ВР та Exxon/Mobil, а також вітчизняні інвестори (Постанова КМУ від 30.11.11 №1297, 1292).

Перевагою сланцевого газу є і термін, що буде витрачений на його розвідку та видобуток: 6 - 7 років проти 11-12 років для так званих традиційних вуглеводнів. Так, якщо бурити глибоководні свердловини на шельфі Чорного моря, тобто відновити ці роботи на Прикерченському шельфі або площі «Таврія», то перші вуглеводні буде видобуто лише через 11-12 років. А при розробці сланцевого газу його можна отримати вже на етапі дослідно-промислового видобутку - навіть через чотири-п'ять років. А вже через шість-сім років від початку можливий повномасштабний видобуток. Відтак, це може бути найбільший інвестиційний проект на території України, внаслідок впровадження якого Львівщина отримає мільярдні інвестиції, тисячі нових робочих місць. Видобуток нетрадиційного газу ведеться наступним чином: пробурюється декілька вертикальних свердловин з подальшим відхиленням від вертикалі та бурінням горизонтальної свердловини, знаходяться «пастки» з газом, з яких шляхом застосування технології гідроудару сумішшю води, піску та хімреагентів, руйнується материнська газоносна сланцева порода і газ виштовхується назовні.

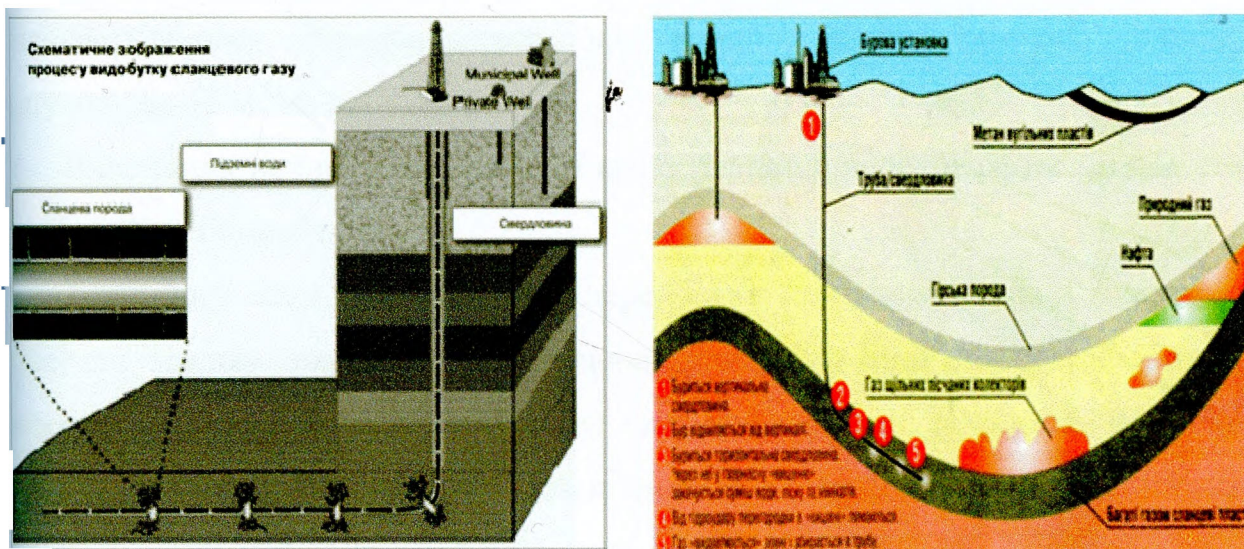


Рисунок 5.6 - Схема зображення процесу видобутку сланцевого газу

через те, що нетрадиційний газ знаходиться в самій материнській породі і його треба видобувати безпосередньо з неї, тому для його видобутку необхідно пробурити сотні і тисячі свердловин.

На Львівщині, територія якої займає 21,833 тис. км², під майбутні розробки планується виділити 2,992 тис. км² Олеської площі (загальний розмір площі 6,3 тис. км²), тобто майже сьому частину території області. Безумовно, видобувати газ зі сланців потрібно, але робити це слід цивілізованим способом і в цих проектах окремо необхідно виділити питання очистки повітря від пилу при роботі бурового обладнання за допомогою розроблених нами пиловловлювачів.

5.4.2. Рекультивація сміттєзвалища. Львівський полігон ТПВ розташований в природній балці біля с. Великі Грибовичі, в 5 кілометрах на північ від м. Львова і охоплює територію 38,8 га, під складування сміття відведено 26,5 га. За більше ніж 50 років експлуатації на полігоні накопичено близько 6,0 млн. тонн відходів. З 2000 року на звалище вивозиться щорічно 230-250 тис. тонн сміття, з них промислові відходи становлять 2%. Більшість території масиву звалища виведена з експлуатації і підлягає рекультивації. Полігон відноситься до категорії високонавантажених.

Біля південно-східного підніжжя масиву сміттєзвалища знаходяться ставки накопичувачі поверхневих стоків і фільтрату площею понад 2,0 га, знешкодження

фільтрату яких передбачається на станції фізико-хімічного очищення потужністю 15 м^3 на добу.

Виконання повної рекультивації сміттєзвалища передбачається в два етапи: технічний та біологічний.

Технічний етап рекультивації передбачає: виположування і терасування поверхні масиву звалища; влаштування багатофункціонального покриття на поверхні сміттєзвалища; влаштування системи дегазації; гідротехнічні споруди відводу атмосферних опадів. Дозаповнення полігону планується по схемі розвитку трьох основних робочих карт. За проектну висоту нарощування тіла звалища прийнята абсолютна відмітка 350 м (центральна частина верхньої тераси полігону).

Перша робоча карта полігону є основною ділянкою складування відходів. При загальній площі 3,6 га вона розрахована на прийом 920-1000 тис.м³ відходів в рік. Нахил її поверхні становитиме $7,5^\circ$.

Друга карта охопить північно-східну частину середньої тераси масиву. В її межах є можливість складувати до 400 тис. м відходів. Нахил поверхні становитиме $5-7,5^\circ$.

Третя карта складування відходів буде розташована в південній частині сміттєзвалища. її площа становитиме 1,3-1,5 га і в її межах є можливість складувати до 200 тис.м³ відходів. Кут нахилу поверхні масиву буде становити 10° (боки карти) і 5° (осьовий напрям розвитку карти).

Враховуючи те, що щорічно в межах полігону складається 230 тис. тонн відходів, стабілізація окремих карт полігону для здійснення на їх площах етапів технічної рекультивації становитиме: для першої карти полігону - 2014р. (термін закінчення складування - 2012р.); для другої карти-2015-2016р.р. (термін закінчення складування - 2013р.); для третьої карти - 2017р. (термін закінчення складування - 2015р.).

Для перекриття доступу атмосферних опадів в тіло звалища і припинення неконтрольованих викидів в атмосферу звалищних газів проектом передбачається влаштування захисного екрану поверхні сміттєзвалища з глини з

коєфіцієнтом фільтрації 10^{-6} - 10^{-9} м/с. Товщина гідроізоляційного покриття по всій площі становитиме 0,5 м, а на крутих схилах масиву 0,2-0,3 м. Загальна площа покриття становить 26,5 га, з них поверхні масиву 23 га.

Етапом біологічної рекультивації, який розрахований на 4 роки, передбачається: добір асортименту багаторічних трав, підготовка ґрунту, сівба і догляд за посівами у разі, коли цільовим призначенням закритого полігону є його використання під сінокіс та пасовище.

Відбір звалищного газу здійснюватиметься з 150 свердловин. Біогаз з газовідвідних свердловин вакуумним насосом через викидні трубопроводи втягується на гребінки-газозбірники, які об'єднують потоки газу та одночасно виконують функцію грубого відбору фільтрату. З гребінок-газозбірників газозбірними трубопроводами газ подається до магістрального трубопроводу і далі, через центральну гребінку центральним трубопроводом, транспортується до вузла збору, обліку та утилізації. На основному майданчику біогаз проходить попередню підготовку. Частиною газу відбуватиметься живлення газопоршневого електрогенератора, а основний обсяг газу спалюватиметься на факельній установці закритого типу "HOFGAS- Ready", яка включає: вакуумний насос, газопоршневий агрегат, блок моніторингу газу, факельну установку, операторну.

В стабільному стані фільтрат насичує тіло масиву звалища на висоту 10-15 м від його підшви, що не обмежує проектні глибини газорозвідувальних свердловин. В періоди інтенсивних атмосферних опадів створюються умови до утворення «висячих» лінз фільтрату. В такому стані інфільтраційні води спроможні на певний термін, заповнити стовбури газовідвідних свердловин і таким чином обмежувати процес вилучення біогазу з тіла звалища.

З метою збору і відводу витоків фільтрату пропонується підготувати каналу для відводу фільтрату, яка сполучатиметься з комунікаціями станції фізико-хімічної очистки, загальна довжина якої становитиме 1684 метри.

Система інтенсифікації процесу утворення біогазу забезпечує постійне пониження рівня фільтрату в тілі звалища способом його відкачки з дренажних

свердловин. Вилучення фільтрату з дренажних свердловин буде здійснюватися насосом, що занурюється, «Водолій» ВПМ 062612.004 РЕ, який призначений для відкачки ґрунтових вод, нафтопродуктів і хімічно агресивних рідин. Більша частина фільтрату буде подаватися на існуючу станцію фізико-хімічної очистки. Разом з покриттям звалищного масиву ізолюючим шаром глини система відкачки дозволить значно знизити навантаження на ґрунтові води з боку фільтратів.

Для відведення поверхневих вод з прилеглих територій і ділянки рекультивованого сміттєзвалища будуть використовуватись існуючі нагріні водовідвідні канали.

Застосування запропонованих нами пиловловлювачів планується при очистці викидів забруднюючих речовин в процесах видобування та спалення біогазу, а ефективність їх роботи буде підтверджена розрахунком розсіювання на ЕОМ, згідно вимог ОНД- 86.

5.5. Висновки до розділу 5

1. У результаті багаторічної роботи, на базі теоретичних і експериментальних досліджень, створено серію відцентрово-інерційних пиловловлювачів, детальне дослідження яких виявило, що кожний наступний апарат конструктивно досконаліший попереднього.

2. У процесі впровадження цих апаратів у промисловість доведено, що для кожної групи виробництв підходить своя конструкція апарату, застосувавши яку, ми змогли досягти максимальної ефективності уловлювання даного конкретного пилу.

3. Заміною на ПАТ «Львівський локомотиворемонтний завод» в процесі очистки локомотивів дробом в установці продуктивністю $12000 \text{ м}^3/\text{год}$ з циклонів ЦН-11 на інерційні пиловловлювачі у вигляді батареї з 4 пиловловлювачів продуктивністю $3000 \text{ м}^3/\text{год}$ кожний, розроблені автором цієї роботи і захищені патентом на винахід, можна підвищити ефективність пилоуловлювання на 10 - 15 % і досягти 99,2%, а це дозволило зменшити

запиленість робочих місць, покращити умови праці, довести викиди пилу до норм ГДК і ГДВ.

4. В установці для очищення локомотивів у піскоструминній установці на ПАТ «Львівський локомотиворемонтний завод» заміна циклона ЦН-11 на пиловловлювач нашої конструкції продуктивністю 3000 м³/год дозволило підвищити ефективність роботи установки з 85% до 98%, що також дозволило досягти нормованих значень ГДК і ГДВ.

5. Наведений приклад розрахунку економічної оцінки збитків, що спричиняють викиди пилу в атмосферу, показує, що використання розроблених пиловловлювачів в установках для очистки повітря від пилу при очищенні локомотивів зменшує збитки у декілька разів, а сумарний економічний ефект становить 196198,77 грн. на рік.

6. Наведені перспективи використання розроблених пиловловлювачів в процесах видобутку сланцевого газу та при очистці викидів забруднюючих речовин від процесу спалення біогазу, який утворюється на сміттєсховищах, підтверджують їх високу ефективність.

ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень у дисертації вирішене важливе наукове завдання удосконалення пилоочисного статкування для зменшення забруднення довкілля неорганічним пилом шляхом розроблення ефективних пиловловлювачів зі ступеневим жалюзійним відокремлювачем з покращеними аеродинамічними характеристиками та зниженим рівнем енергоспоживання.

1. На основі проведеного аналізу сучасного стану проблеми з екологічної безпеки при забрудненні атмосфери неорганічним пилом в промисловості доведено необхідність проведення досліджень (теоретичних та експериментальних) процесів очищення аспіраційного повітря від неорганічного пилу шляхом створення нових конструкцій пиловловлюючого обладнання. Перспективним напрямком вдосконалення існуючих конструкцій пиловловлювачів є поєднання в корпусі одного апарата двох ступенів очищення: відцентрового та інерційного.

2. Встановлена взаємозалежність технологічних і геометричних параметрів пиловловлювачів від величини сил, які діють в апараті і на їх основі визначені його конструктивні параметри, що визначають ефективність роботи та гідравлічний опір на стадії інженерного проектування.

3. Створена математична модель процесу руху частинки в системі «пиловловлювач – пилоповітряна суміш». Застосовуючи лінійні спрощення до рівнянь руху пилоповітряної суміші, отримана можливість реалізувати їх чисельними методами для конкретних значень вихідних параметрів та початкових (граничних) умов, тобто умов однозначності.

4. Розроблені інженерні методики розрахунку і створені принципово нові конструкції пиловловлювачів з багатоступеневою системою очистки, експериментальні дослідження яких довели, що з переходом від апаратів першого типу до апаратів четвертого типу ефективність роботи підвищується завдяки використанню теоретичного і експериментально дослідженого

механізму підвищення ефективності в кожній наступній групі, з аналізом їх недоліків. Підтверджено експериментальним шляхом підвищення ефективності роботи апаратів відцентрово-інерційних у порівнянні з циклоном ЦН-11і еталоном, причому, ефективність найгіршого із запропонованих апаратів (першого типу) перевищує ефективність роботи найкращого з існуючих – еталона – циклона ЦН-11, а гідравлічний опір апаратів падає у протилежному напрямку. За допомогою одержаних рівнянь регресії визначені значення ефективності роботи для всіх апаратів, що досліджувалися, при відповідній зміні конструктивних розмірів та режимів роботи. Відхилення розрахункових та експериментальних даних не перевищує 5-15%.

5. Дослідженнями впливу жалюзійного відокремлювача на характеристики циклонного апарата встановлено, що перепад статичного тиску в сепараційній зоні пиловловлювача з жалюзійним відокремлювачем в 4-12 разів менший у порівнянні з еталоном і циклоном. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень експлуатаційних і технологічних характеристик циклонів обґрунтовано доцільність встановлення ступеневого жалюзійного відокремлювача, наявність якого підвищує ефективність роботи пиловловлювача на 1,5 – 1,7 % при зниженні швидкості руху потоку повітря у вхідному патрубку з 18-20 м/с до 11-16 м/с, а гідравлічний опір апарата при цьому знижується порівняно з еталоном у 1,7 – 2,4 рази.

6. Проведені дослідження запропонованих конструкцій пиловловлювачів на експериментальному та дослідно-промисловому стендах довели їх переваги перед найкращими з існуючих апаратів, що дозволило збільшити ефективність уловлення дрібнодисперсного пилу на 1,5 – 1,7 %, знизивши при цьому енерго- і металоємність. Створено чотири конструкції пиловловлювачів, у кращого з яких гідравлічний опір становить 865 Па, а ефективність досягає 99,2%. Економічний ефект від впровадження складає **196198,77 грн.** на рік.

7. Сформульовано рекомендації щодо подальших вдосконалень конструкцій пиловловлювачів і намічені шляхи їх впровадження у процеси видобування газів і утилізації відходів сміттєзвалищ.

ДОДАТКИ

Додаток А

Програма MS.mcd – програма для чисельного розв’язку диференційного рівняння руху матеріальної точки при початкових умовах з використанням математичного пакету “MathCad 2001”.

$$:= 1000.3000$$

$$\delta t(a, b) := a \cdot b$$

$$a := 0.09$$

$$b := 0.165$$

$$\rho_0 := 1.023$$

$$\rho_{\text{quartz}} := 2500$$

Таблиця А.1 Результати чисельного експерименту проведеного з використанням математичного пакету “Mathcad 2001” та алгоритму приведенного в MS.mcd

$\delta_{50}, 10^{-6} \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{год}$	$t, 10^{-3} \text{ с}$	$z, 10^{-3} \text{ м}$
1	2	3	4
конструкція пиловловлювача з відокремлювачем зі змінною кута атаки жалюзі (рис.4.1; 4.8)			
8	1000	10,5	56
	1500	9,2	53
	2000	8,8	50
	2500	8,3	48
	3000	7,9	46
32	1000	9,3	52
	1500	8,9	49
	2000	8,5	46
	2500	7,9	44
	3000	7,5	42
50	1000	9,1	48
	1500	8,7	45
	2000	8,4	43
	2500	7,7	41
	3000	7,3	39
Пиловловлювач зі змінною кількістю жалюзі (апарат II, рис.4.6; 4.7)			
8	1000	11,5	65
	1500	10,3	62
	2000	9,7	58
	2500	9,5	56

Продовж.табл. А1			
	3000	9,3	53
32	1000	10,2	61
	1500	9,6	57
	2000	9,4	53
	2500	9,1	50
	3000	8,9	47
50	1000	9,7	56
	1500	9,4	52
	2000	9,0	49
	2500	8,8	46
	3000	8,6	44
пиловловлювач (апарат III, рисунок 4.2)			
8	1000	8,3	47
	1500	8,1	42
	2000	7,9	39
	2500	7,6	37
1	2	3	4
8	3000	7,4	36
32	1000	8,4	43
	1500	8,1	39
	2000	7,7	36
	2500	7,5	34
	3000	7,2	33
50	1000	8,1	41
	1500	7,7	37
	2000	7,5	34
	2500	7,3	32
	3000	7,1	30

Додаток Б

Програма MNK.cpp – програма статистичного моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлення від конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача. Результати розрахунків наведені в таблицях Б.1, Б.10 (колонка 4), де їх можна порівняти з результатами експериментальних досліджень (колонка 3).

/ MNK.cpp - program of statistical data manipulation

```
#include <iostream.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
int i;
```

```
int n;           // n - number of experiments for Ye[n] and Yp[n]
```

```
int k;           // k - number factors of equation regression for Szal_in2
```

```
int t;           // t - number of experiments, when we finding Y1[t]
```

```
int f2;          // f2 - number factors of equation regression for Svid_in2
```

```
int f1;          // f1 = n-k - number factors for Szal_in2
```

```
float X0[10], X1[10], X2[10], X3[10];           // variables
```

```
float Ye[10], Yp[10];                           // experimental & theoretical Y
```

```
values
```

```
float Yc;                                           // average value of Y1[i]
```

```
float Y1[10];                                       // Y1[t] value
```

```
float Szal_in2, Svid_in2;                          // dispersions
```

```
float Ff_p, Ff_t;                                  // Fisher's criterion
```

```
double St_p[10], St_t[10];                        // Stjudent's criterion
```

```
float A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11;
```

```
float A12, A13, A14, A15, A16, A17, A18, A19;
```

```
float C0, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11;
```

```
float D0, D1, D2, D3, D4, D5;
```

```
float B0, B1, B2, B3;                             // factors of equation regression
```

```
void database(void);
```

```
void temp(void);
```

```
void Yp_count(void);
```

```
void Szal(void);
```

```
void Svid(void);
```

```
void Ffisher_p(void);
```

```
void Fstjudent_p(void);
```

```
void main()
```

```
cout << "Enter n - number of experiments" << endl;
```



```

cin >> n;
cout << "k - number factors of regression = 4 (for this matmodel (ftm))" << endl;
cin >> k;
cout << "t - number of experiments, when we finding Y1[t], = 5 (ftm)" << endl;
cin >> t;
cout << "f1 - number factors of regression for Szal_in2 = n-k = 1 (ftm)" << endl;
cin >> f2;
cout << "f2 - number factors of regression for Svid_in2 = t-1 = 4 (ftm)" << endl;
cin >> f2;

```

```

database();          // function for input initial values X0[i]...X3[i], Ye[i]

```

```

temp();             // function for temporary values

```

```

Yp_count();         // function for finding Yp[i]

```

```

Szal();             // function for finding dispersions Szal_in2

```

```

Svid();             // function for finding dispersions Svid_in2

```

```

Ffisher_p();        // function for finding Fisher's criterion Ff_p

```

```

Fstjudent_p();     // function for finding Stjudent's criterion Fs_p

```

```

cout << "Program finished" << endl;

```

```

void database(void){
    cout << "Enter X0[i], X1[i], X2[i], X3[i], Ye[i]" << endl;
    for (i = 0; i < n; i++){
        cout << "Enter X0[" << i << "] = ";
        cin >> X0[i];
        cout << "Enter X1[" << i << "] = ";
        cin >> X1[i];
        cout << "Enter X2[" << i << "] = ";
        cin >> X2[i];
        cout << "Enter X3[" << i << "] = ";
        cin >> X3[i];
        cout << "Enter Ye[" << i << "] = ";
        cin >> Ye[i];
    }
    cout << "Enter Y1[t] for founding dispersion Svid_in2" << endl;
    for (i = 0; i < t; i++){
        cout << "Enter Y1[" << i << "] = ";

```

```
cin >> Y1[i];
```

```
void temp(void){
```

```

    A0 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A0 = A0 + X0[i]*X0[i];}
    A1 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A1 = A1 + X0[i]*X1[i];}
    A2 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A2 = A2 + X0[i]*X2[i];}
    A3 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A3 = A3 + X0[i]*X3[i];}
    A4 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A4 = A4 + Ye[i]*X0[i];}
    A5 = A1;
    A6 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A6 = A6 + X1[i]*X1[i];}
    A7 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A7 = A7 + X1[i]*X2[i];}
    A8 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A8 = A8 + X1[i]*X3[i];}
    A9 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A9 = A9 + Ye[i]*X1[i];}
    A10 = A2;
    A11 = A7;
    A12 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A12 = A12 + X2[i]*X2[i];}
    A13 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A13 = A13 + X2[i]*X3[i];}
    A14 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A14 = A14 + Ye[i]*X2[i];}
    A15 = A3;
    A16 = A8;
    A17 = A13;
    A18 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A18 = A18 + X3[i]*X3[i];}
    A19 = 0;
    for (i = 0; i < n; i++){A19 = A19 + Ye[i]*X3[i];}

    C0 = (A6*A0 - A1*A5)/(A5*A0);
    C1 = (A7*A0 - A2*A5)/(A5*A0);
    C2 = (A8*A0 - A3*A5)/(A5*A0);

```

```

C3 = (A9*A0 - A4*A5)/(A5*A0);
C4 = (A11*A0 - A1*A10)/(A10*A0);
C5 = (A12*A0 - A2*A10)/(A10*A0);
C6 = (A13*A0 - A3*A10)/(A10*A0);
C7 = (A14*A0 - A4*A10)/(A10*A0);
C8 = (A16*A0 - A1*A15)/(A15*A0);
C9 = (A17*A0 - A2*A15)/(A15*A0);
C10 = (A18*A0 - A3*A15)/(A15*A0);
C11 = (A19*A0 - A4*A15)/(A15*A0);
D0 = (C5*C0 - C1*C4)/(C4*C0);
D1 = (C6*C0 - C2*C4)/(C4*C0);
D2 = (C7*C0 - C3*C4)/(C4*C0);
D3 = (C9*C0 - C1*C8)/(C8*C0);
D4 = (C10*C0 - C2*C8)/(C8*C0);
D5 = (C11*C0 - C3*C8)/(C8*C0);
B3 = (D5*D0 - D2*D3)/(D4*D0 - D1*D3);
B2 = (D2 - D1*B3)/D0;
B1 = (C3 - C1*B2 - C2*B3)/C0;
B0 = (A4 - A1*B1 - A2*B2 - A3*B3)/A0;

```

```

cout << "B0 = " << B0 << "; B1 = " << B1
<< "; B2 = " << B2 << "; B3 = " << B3 << endl;
cout << "Yp = " << B0 << " + " << B1 << "X1 + "
<< B2 << "X2 + " << B3 << "X3" << endl;

```

```
void Yp_count(void)
```

```

cout << "Founding Yp[i]" << endl;
for (i = 0; i < n; i++){
    Yp[i] = B0*X0[i] + B1*X1[i] + B2*X2[i] + B3*X3[i];
    cout << "Yp["<<i<<"] = " << Yp[i] << endl;
}

```

```
void Szal(void)
```

```

cout << "Founding dispersions Szal_in2" << endl;
float temp = 0;
for (i = 0; i < n; i++){
    temp = temp + (Ye[i] - Yp[i])*(Ye[i] - Yp[i]);
}
f1 = n - k;
Szal_in2 = temp /f1;
cout << "Szal_in2 = " << Szal_in2 << endl;

```

```
void Svid(void){
```

```

cout << "Founding dispersions Svid_in2" << endl;
float temp1 = 0;
for (i = 0; i < t; i++){
    temp1 = temp1 + Y1[i];
}

```

```

Yc = temp1/t;
cout << "Yc = " << Yc << endl;

float temp = 0;
    for (i = 0; i < t; i++){
        temp = temp + (Y1[i] - Yc)*(Y1[i] - Yc);
f2 = t - 1;
Svid_in2 = temp/f2;
cout << "Svid_in2 = " << Svid_in2 << endl;
void Ffisher_p(void){
    Ff_p = Szal_in2/Svid_in2;
    cout << "Fisher's criterion Ff_p = Szal_in2/Svid_in2 = " << Ff_p << endl;
    cout << "And now look Fisher's criterion Ff_t in book (for f1/f2= "
    << f1 << "/" << f2 << ")" << endl;
    cout << "Compare Ff_t in book and Ff_p" << endl;
    cout << "If Ff_p < Ff_t, then decision of equation correct" << endl;

void Fstjudent_p(void){
    double root;
    root = sqrt(Svid_in2);
    St_p[0] = B0/root;
    St_p[1] = B1/root;
    St_p[2] = B2/root;
    St_p[3] = B3/root;
    cout << "Stjudent's criterion St_p[i] = Bi/sqrt(Svid_in2)" << endl;
    cout << "St_p[0] = " << St_p[0] << "; St_p[1] = " << St_p[1]
    << "; St_p[2] = " << St_p[2] << "; St_p[3] = " << St_p[3] << endl;
    cout << "And now look Stjudent's criterion St_t[i] in book for f2 = "
    << f2 << endl;
    cout << "Compare St_t[i] in book and St_p[i]" << endl;
    cout << "If St_p[i] >= St_t[i], then factor Xi vastly influences upon parameter Y"
    << endl.

```

Таблиця Б.1 Дослідження циклона ЦН-11

Медіанний діаметр частинки, 10^{-6} м	Витрати повітря, м ³ /год	Ефективність η , %	Розрахункова ефективність η_p , %
1	2	3	4
8	3500	83,6	89,1
	3000	83,0	87,5
	2000	82,4	86,7
	1000	79,2	84,9
32	3500	91,0	91,1

Продовж.табл. Б.1

32	3000	90,2	87,5
	2000	89,5	86,7
	1000	86,6	84,9
50	3500	92,2	92,7
	3000	91,8	87,5
	2000	90,1	86,7
	1000	87,2	84,9

Таблиця Б.2 Дослідження секційного пиловловлювача (тип 1)

Витрата повітря, м ³ /год.	Медіанний діаметр пилу, 10 ⁻⁶ м	Ефективність роботи, %		Гідравлічний тиск, Па	
		Запропонованого	Циклона ЦН-11	Запропонованого	Еталону
1000	8	91,0	79,2	900	1200
2000		91,9	82,4	1100	1500
3000		92,5	83,0	1360	1600
3500		91,8	83,6	1400	1650
1000	32	93,1	86,6	900	1200
2000		94,3	89,5	1100	1500
3000		95,2	90,2	1360	1600
3500		94,6	91,0	1400	1650
1000	50	96,6	87,2	900	1200
2000		97,3	90,1	1100	1500
3000		97,5	91,8	1360	1600
3500		97,2	92,2	1400	1650

Таблиця Б.3 Дослідження ступеневого пиловловлювача із змінною кількістю жалюзі (тип 2)

Розхід повітря, м ³ /год	Медіанний діаметр пилу, 10 ⁻⁶ м.	Ефективність роботи, %	
		Запропонованого	Циклона ЦН-11
1000	8	91,8	79,2
2000		92,7	82,4
3000		93,2	83,0
1000	50	97,4	87,2
2000		98,1	90,1
3000		99,45	91,8

Таблиця Б.4 Дослідження ступеневого пиловловлювача із змінною кута атаки жалюзі (тип 3)

Розхід повітря, м ³ /год	Медіанний діаметр пилу , 10 ⁻⁶ м.	Ефективність роботи апаратів, %	
		Запропонованого	Циклона ЦН-11
1000	8	92,8	79,2
2000		93,5	82,4
3000		94,1	83,0
1000	50	97,8	87,2
2000		98,6	90,1
3000		99,5	91,8

Таблиця Б.5 Дослідження пиловловлювача із ступеневим відокремлювачем і бункером (тип 4)

Витрата повітря, м ³ /год.	Медіанний діаметр пилу, 10 ⁻⁶ м	Ефективність роботи, %	
		Запропонованого	Циклона ЦН-11
1000	8	92,0	79,2
2000		92,9	82,4
3000		93,5	83,0
3500		92,8	83,6
1000	32	94,1	86,6
2000		95,3	89,5
3000		96,2	90,2
3500		95,6	91,0
1000	50	97,6	87,2
2000		98,3	90,1
3000		98,51	91,8
3500		98,2	92,2

Таблиця Б.6 Визначення конструктивних розмірів корпусу пиловловлювача

Розмір пилу, 10 ⁻⁶ м	Довжина корпусу, 10 ⁻³ м	
	Циліндрино-конічної частини	Циліндричної частини
8	925	800
32	825	700
50	725	600

Таблиця Б.7 Порівняльні дослідження секційного пиловловлювача (апарата першого типу) і еталона

Витрата повітря, м ³ /год.	Медіанний діаметр пилу, 10 ⁻⁶ м	Ефективність роботи, %		Гідравлічний тиск, Па	
		Запропонованого	еталону	Запропонованого	еталону
1000	8	91,0	84,4	900	1200
2000		91,9	87,5	1100	1500
3000		92,5	88,6	1360	1600
3500		91,8	87,4	1400	1650
1000	32	93,1	91,1	900	1200
2000		94,3	92,9	1100	1500
3000		95,2	93,5	1360	1600
3500		94,6	92,8	1400	1650
1000	50	96,6	95,1	900	1200
2000		97,3	95,8	1100	1500
3000		97,5	96,7	1360	1600
3500		97,2	95,9	1400	1650

Таблиця Б.8 Порівняння дослідження ступеневого пиловловлювача із змінною кількістю жалюзі (апарат другого типу) і еталона

Розхід повітря, м ³ /год	Медіанний діаметр пилу, 10 ⁻⁶ м.	Ефективність роботи, %	
		Запропонованого	Прототипа
1000	8	91,8	86,4
2000		92,7	87,5
3000		93,2	88,6
1000	50	97,4	95,1
2000		98,1	95,8
3000		99,45	96,7

Таблиця Б.9 Порівняльні дослідження ступеневого пиловловлювача з відокремлювачем зі зміною кута атаки жалюзі (апарат третього типу) і еталона

Розхід повітря, м ³ /год	Медіанний діаметр пилу, 10 ⁻⁶ м.	Ефективність роботи апаратів, %	
		Запропонованого	Еталона
1000	8	92,8	86,5
2000		93,5	87,4
3000		94,1	88,7
1000	50	97,8	95,2
2000		98,6	95,7
3000		99,5	96,8

Таблиця Б.10 Порівняльні дослідження пиловловлювача із ступеневим відокремлювачем і бункером (апарат четвертого типу) і еталона

Витрата повітря, м ³ /год.	Медіанний діаметр пилу, 10 ⁻⁶ м	Ефективність роботи, %	
		Запропонованого	Еталона
1000	8	92,0	84,4
2000		92,9	87,5
3000		93,5	88,6
3500		92,8	87,4
1000		94,1	91,1
2000		95,3	92,9
3000		96,2	93,5
3500		95,6	92,8
1000		97,6	95,1
2000		98,3	95,8
3000		98,51	96,7
3500		98,2	95,9

Додаток В

Таблиця В1 Матриця для апарата зі змінною кута атаки жалюзі з дном
Обробка результатів, експерименту, що планується

Матриця планування експерименту

Результати обробки

№ п.п	X1	X2	X3	X4	X5	Y	Урозн.	
1	1	1	1	1	1	138	137,9793	0,021
2	-1	1	1	1	1	137	137,719	-0,719
3	1	-1	1	1	1	128	127,2014	0,799
4	-1	-1	1	1	1	127	126,9411	0,059
5	1	1	-1	1	1	126	125,5621	0,438
6	-1	1	-1	1	1	125	125,3018	-0,302
7	1	-1	-1	1	1	116	114,7842	1,216
8	-1	-1	-1	1	1	115	114,5239	0,476
9	1	1	1	-1	1	135	134,7029	0,297
10	-1	1	1	-1	1	134	134,4426	-0,443
11	1	-1	1	-1	1	125	123,925	1,075
12	-1	-1	1	-1	1	124	123,6647	0,335
13	1	1	-1	-1	1	123	122,2857	0,714
14	-1	1	-1	-1	1	122	122,0254	-0,025
15	1	-1	-1	-1	1	113	111,5078	1,492
16	-1	-1	-1	-1	1	112	111,2475	0,752
17	1	1	1	1	-1	64	64,67665	-0,677
18	-1	1	1	1	-1	63	64,41634	-1,416
19	1	-1	1	1	-1	54	53,89876	0,101
20	-1	-1	1	1	-1	53	53,63845	-0,638
21	1	1	-1	1	-1	52	52,25948	-0,259
22	-1	1	-1	1	-1	51	51,99917	-0,999
23	1	-1	-1	1	-1	42	41,48158	0,518
24	-1	-1	-1	1	-1	41	41,22127	-0,221
25	1	1	1	-1	-1	61	61,40026	-0,400
26	-1	1	1	-1	-1	60	61,13995	-1,140
27	1	-1	1	-1	-1	51	50,62236	0,378
28	-1	-1	1	-1	-1	50	50,36205	-0,362
29	1	1	-1	-1	-1	49	48,98308	0,017
30	-1	1	-1	-1	-1	48	48,72278	-0,723
31	1	-1	-1	-1	-1	39	38,20519	0,795
32	-1	-1	-1	-1	-1	38	37,94488	0,055
33	1,596	0	0	0	0	73	76,94586	-3,946
34	-1,596	0	0	0	0	80	76,53041	3,470
35	0	1,596	0	0	0	83	79,3389	3,661
36	0	-1,596	0	0	0	58	62,1374	-4,137
37	0	0	1,596	0	0	83	81,1470	1,853
38	0	0	-1,596	0	0	59	61,3292	-2,329
39	0	0	0	1,596	0	58	56,8527	1,147
40	0	0	0	-1,596	0	50	51,6236	-1,624
41	0	0	0	0	1,596	133	136,7336	-3,734
42	0	0	0	0	-1,596	23	19,7426	3,257
43	0	0	0	0	0	53	51,8318	1,168

Коефіцієнти регресійного рівняння

№	Позначення	Значення
1	A(0,0)	51,83181
2	A(0,1)	0,130154
3	A(0,2)	5,388949
4	A(0,3)	6,208587
5	A(0,4)	1,638197
6	A(0,5)	36,65132
7	A(1,1)	9,777861
8	A(1,2)	0
9	A(1,3)	0
10	A(1,4)	0
11	A(1,5)	0
12	A(2,2)	7,422348
13	A(2,3)	0
14	A(2,4)	0
15	A(2,5)	0
16	A(3,3)	7,618641
17	A(3,4)	0
18	A(3,5)	0
19	A(4,4)	0,944688
20	A(4,5)	0
21	A(5,5)	10,36674

Розрізи факторного простору
Фиксовані значення

X1	X2	X3	X4	X5
0	-1,25	-0,5	1	0

X	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
-2	96,92743	72,12656	77,33332	55,99577	26,24061
-1,6	82,89937	63,59396	68,84591	55,2907	25,97303
-1,2	72,00023	57,43651	62,79647	54,88792	29,02281
-0,8	64,23	53,65421	59,18499	54,78745	35,38995
-0,4	59,58869	52,24706	58,01148	54,98928	45,07445
0	58,0763	53,21506	59,27593	55,49341	58,0763
0,4	59,69282	56,55822	62,97835	56,29984	74,3955
0,8	64,43825	62,27653	69,11873	57,40857	94,03207
1,2	72,3126	70,36998	77,69708	58,8196	116,986
1,6	83,31587	80,83859	88,71339	60,53293	143,2573
2	97,44805	93,68235	102,1677	62,54856	172,8459

Таблиця В2 Матриця для апарата зі зміною кута атаки жалюзі без дна
Обробка результатів, експерименту, що планується

Матриця планування експерименту

Результати обробки

№ п.п	X1	X2	X3	X4	X5	Y	Yрозр.	Y- Yрозр.
1	1	1	1	1	1	93,04	93,11682	-0,077
2	-1	1	1	1	1	93,24	93,28935	-0,049
3	1	-1	1	1	1	94,74	94,72103	0,019
4	-1	-1	1	1	1	94,94	94,89356	0,046
5	1	1	-1	1	1	93,64	93,70326	-0,063
6	-1	1	-1	1	1	93,84	93,87579	-0,036
7	1	-1	-1	1	1	95,34	95,30747	0,033
8	-1	-1	-1	1	1	95,54	95,48	0,060
9	1	1	1	-1	1	90,64	90,70223	-0,062
10	-1	1	1	-1	1	90,84	90,87476	-0,035
11	1	-1	1	-1	1	92,34	92,30644	0,034
12	-1	-1	1	-1	1	92,54	92,47897	0,061
13	1	1	-1	-1	1	91,24	91,28867	-0,049
14	-1	1	-1	-1	1	91,44	91,4612	-0,021
15	1	-1	-1	-1	1	92,94	92,89287	0,047
16	-1	-1	-1	-1	1	93,14	93,06541	0,075
17	1	1	1	1	-1	92,96	93,04781	-0,088
18	-1	1	1	1	-1	93,16	93,22034	-0,060
19	1	-1	1	1	-1	94,66	94,65202	0,008
20	-1	-1	1	1	-1	94,86	94,82455	0,035
21	1	1	-1	1	-1	93,56	93,63425	-0,074
22	-1	1	-1	1	-1	93,76	93,80678	-0,047
23	1	-1	-1	1	-1	95,26	95,23846	0,022
24	-1	-1	-1	1	-1	95,46	95,41099	0,049
25	1	1	1	-1	-1	90,56	90,63321	-0,073
26	-1	1	1	-1	-1	90,76	90,80575	-0,046
27	1	-1	1	-1	-1	92,26	92,23742	0,023
28	-1	-1	1	-1	-1	92,46	92,40996	0,050
29	1	1	-1	-1	-1	91,16	91,21965	-0,060
30	-1	1	-1	-1	-1	91,36	91,39219	-0,032
31	1	-1	-1	-1	-1	92,86	92,82386	0,036
32	-1	-1	-1	-1	-1	93,06	92,99639	0,064
33	1,596	0	0	0	0	93,2	93,02082	0,179
34	-1,596	0	0	0	0	93,2	93,29618	-0,096
35	0	1,596	0	0	0	94,5	93,97834	0,522
36	0	-1,596	0	0	0	96,1	96,5387	-0,439
37	0	0	1,596	0	0	94,4	94,2905	0,109
38	0	0	-1,596	0	0	95,2	95,2265	-0,026
39	0	0	0	1,596	0	97	96,8853	0,115
40	0	0	0	-1,596	0	93	93,0317	-0,032
41	0	0	0	0	1,596	95,4	95,4136	-0,014
42	0	0	0	0	-1,596	95,4	95,3034	0,097
43	0	0	0	0	0	96,2	96,4036	-0,204

Коефіцієнти регресійного рівняння

№	Коефіцієнти	Значення
1	A(0,0)	96,4036
2	A(0,1)	-0,08627
3	A(0,2)	-0,8021
4	A(0,3)	-0,29322
5	A(0,4)	1,207297
6	A(0,5)	0,034507
7	A(1,1)	-1,27398
8	A(1,2)	4,44E-16
9	A(1,3)	4,44E-16
10	A(1,4)	4,44E-16
11	A(1,5)	4,44E-16
12	A(2,2)	-0,44955
13	A(2,3)	4,44E-16
14	A(2,4)	4,44E-16
15	A(2,5)	1,33E-15
16	A(3,3)	-0,64584
17	A(3,4)	-2,2E-15
18	A(3,5)	1,33E-15
19	A(4,4)	-0,56733
20	A(4,5)	-2,2E-15
21	A(5,5)	-0,41029

Розрізи факторного простору
Фіксовані значення

X1	X2	X3	X4	X5
0	-1,25	-0,5	1	0

X	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
-2	92,40554	96,83473	95,34684	92,00506	95,61875
-1,6	94,20556	97,16124	96,15957	93,30493	96,22337
-1,2	95,59791	97,34389	96,76563	94,42325	96,6967
-0,8	96,58259	97,38269	97,16501	95,36003	97,03873
-0,4	97,1596	97,27763	97,35773	96,11526	97,24948
0	97,32893	97,02872	97,34378	96,68895	97,32893
0,4	97,09058	96,63595	97,12315	97,0811	97,27708
0,8	96,44457	96,09932	96,69586	97,2917	97,09394
1,2	95,39088	95,41884	96,0619	97,32076	96,77951
1,6	93,92951	94,5945	95,22127	97,16828	96,33379
2	92,06047	93,62631	94,17397	96,83425	95,75677

Таблиця В3 Матриця для апарата зі змінною кількістю жалюзі

Обробка результатів, експерименту, що планується

Матриця планування експерименту

Результати обробки

№ п.п	X1	X2	X3	X4	X5	Y	Yрозр.	Y- Yрозр.
1	1	1	1	1	1	121	120,3701	0,630
2	-1	1	1	1	1	120	120,2819	-0,282
3	1	-1	1	1	1	113	112,178	0,822
4	-1	-1	1	1	1	112	112,0898	-0,090
5	1	1	-1	1	1	114	113,3849	0,615
6	-1	1	-1	1	1	113	113,2967	-0,297
7	1	-1	-1	1	1	106	105,1928	0,807
8	-1	-1	-1	1	1	105	105,1046	-0,105
9	1	1	1	-1	1	118	117,0937	0,906
10	-1	1	1	-1	1	117	117,0055	-0,005
11	1	-1	1	-1	1	110	108,9016	1,098
12	-1	-1	1	-1	1	109	108,8134	0,187
13	1	1	-1	-1	1	111	110,1085	0,892
14	-1	1	-1	-1	1	110	110,0203	-0,020
15	1	-1	-1	-1	1	103	101,9164	1,084
16	-1	-1	-1	-1	1	102	101,8282	0,172
17	1	1	1	1	-1	51	50,94834	0,052
18	-1	1	1	1	-1	50	50,86013	-0,860
19	1	-1	1	1	-1	43	42,75628	0,244
20	-1	-1	1	1	-1	42	42,66807	-0,668
21	1	1	-1	1	-1	44	43,96314	0,037
22	-1	1	-1	1	-1	43	43,87493	-0,875
23	1	-1	-1	1	-1	36	35,77108	0,229
24	-1	-1	-1	1	-1	35	35,68287	-0,683
25	1	1	1	-1	-1	48	47,67195	0,328
26	-1	1	1	-1	-1	47	47,58374	-0,584
27	1	-1	1	-1	-1	40	39,47988	0,520
28	-1	-1	1	-1	-1	39	39,39167	-0,392
29	1	1	-1	-1	-1	41	40,68675	0,313
30	-1	1	-1	-1	-1	40	40,59854	-0,599
31	1	-1	-1	-1	-1	33	32,49468	0,505
32	-1	-1	-1	-1	-1	32	32,40647	-0,406
33	1,596	0	0	0	0	60	65,27216	-5,272
34	-1,596	0	0	0	0	69	65,13138	3,869
35	0	1,596	0	0	0	65	64,73904	0,261
36	0	-1,596	0	0	0	50	51,6645	-1,665
37	0	0	1,596	0	0	58	58,7760	-0,776
38	0	0	-1,596	0	0	47	47,6276	-0,628
39	0	0	0	1,596	0	50	49,3163	0,684
40	0	0	0	-1,596	0	42	44,0872	-2,087
41	0	0	0	0	1,596	125	128,6003	-3,600
42	0	0	0	0	-1,596	20	17,8032	2,197
43	0	0	0	0	0	45	41,5574	3,443

Коефіцієнти регресійного рівняння

№	Коефіцієнти	Значення
1	A(0,0)	41,55743
2	A(0,1)	0,044104
3	A(0,2)	4,096033
4	A(0,3)	3,4926
5	A(0,4)	1,638197
6	A(0,5)	34,71087
7	A(1,1)	9,282424
8	A(1,2)	0
9	A(1,3)	0
10	A(1,4)	0
11	A(1,5)	0
12	A(2,2)	6,534326
13	A(2,3)	0
14	A(2,4)	0
15	A(2,5)	0
16	A(3,3)	4,571398
17	A(3,4)	0
18	A(3,5)	0
19	A(4,4)	2,019593
20	A(4,5)	0
21	A(5,5)	12,42311

Розрізи факторного простору

Фиксовані значення

X1	X2	X3	X4	X5
0	-1,25	-0,5	1	0

X	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
-2	86,7431	62,55701	61,60546	50,8458	29,9723
-1,6	73,39405	54,78599	56,41968	48,59286	25,96738
-1,2	63,01538	49,10596	52,69676	46,9862	25,93784
-0,8	55,60708	45,51691	50,43668	46,0258	29,88371
-0,4	51,16916	44,01885	49,63945	45,71168	37,80496
0	49,70161	44,61177	50,30506	46,04382	49,70161
0,4	51,20444	47,29567	52,43353	47,02224	65,57366
0,8	55,67765	52,07056	56,02484	48,64692	85,4211
1,2	63,12123	58,93644	61,079	50,91787	109,2439
1,6	73,53518	67,89329	67,596	53,8351	137,0422
2	86,91952	78,94114	75,57586	57,39859	168,8158

Таблиця В4 Матриця для ступеневого апарата зі зміною кута атаки жалюзі

Обробка результатів, експерименту, що планується

Матриця планування експерименту

Результати обробки

№ п.п	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y	Y _{расч.}	Y-Y _{расч.}
1	1	1	1	1	1	1	96,12	96,19069	-0,07069
2	-1	1	1	1	1	-1	96,48	96,53972	-0,05972
3	1	-1	1	1	1	-1	96,93	96,99192	-0,06192
4	-1	-1	1	1	1	1	97,37	97,40843	-0,03843
5	1	1	-1	1	1	-1	96,83	96,84398	-0,01398
6	-1	1	-1	1	1	1	97,27	97,26048	0,009516
7	1	-1	-1	1	1	1	97,72	97,71268	0,007317
8	-1	-1	-1	1	1	-1	98,08	98,06172	0,018279
9	1	1	1	-1	1	-1	97,28	97,278	0,001995
10	-1	1	1	-1	1	1	97,72	97,69451	0,025491
11	1	-1	1	-1	1	1	98,17	98,14671	0,023292
12	-1	-1	1	-1	1	-1	98,53	98,49575	0,034254
13	1	1	-1	-1	1	1	98,07	97,99877	0,071235
14	-1	1	-1	-1	1	-1	98,43	98,3478	0,082197
15	1	-1	-1	-1	1	-1	98,88	98,8	0,079998
16	-1	-1	-1	-1	1	1	99,32	99,21651	0,103494
17	1	1	1	1	-1	-1	93,68	93,76946	-0,08946
18	-1	1	1	1	-1	1	94,12	94,18596	-0,06596
19	1	-1	1	1	-1	1	94,57	94,63816	-0,06816
20	-1	-1	1	1	-1	-1	94,93	94,9872	-0,0572
21	1	1	-1	1	-1	1	94,47	94,49022	-0,02022
22	-1	1	-1	1	-1	-1	94,83	94,83925	-0,00925
23	1	-1	-1	1	-1	-1	95,28	95,29145	-0,01145
24	-1	-1	-1	1	-1	1	95,72	95,70796	0,012042
25	1	1	1	-1	-1	1	94,92	94,92424	-0,00424
26	-1	1	1	-1	-1	-1	95,28	95,27328	0,006721
27	1	-1	1	-1	-1	-1	95,73	95,72548	0,004522
28	-1	-1	1	-1	-1	1	96,17	96,14198	0,028017
29	1	1	-1	-1	-1	-1	95,63	95,57754	0,052465
30	-1	1	-1	-1	-1	1	96,07	95,99404	0,07596
31	1	-1	-1	-1	-1	1	96,52	96,44624	0,073761
32	-1	-1	-1	-1	-1	-1	96,88	96,79528	0,084723
33	1,724	0	0	0	0	0	96,55	96,50784	0,042165
34	-1,724	0	0	0	0	0	97,05	97,16773	-0,11773
35	0	1,724	0	0	0	0	96,45	96,41804	0,03196
36	0	-1,724	0	0	0	0	97,75	97,8575	0,107528
37	0	0	1,724	0	0	0	97,1	96,8456	0,254434
38	0	0	-1,724	0	0	0	97,7	98,0300	0,330001
39	0	0	0	1,724	0	0	96,65	96,3214	0,328563
40	0	0	0	-1,724	0	0	97,85	98,2541	0,404131
41	0	0	0	0	1,724	0	98,75	98,8458	0,095806
42	0	0	0	0	-1,724	0	94,75	94,7298	0,020238
43	0	0	0	0	0	1,724	97,15	97,2169	0,066862
44	0	0	0	0	0	-1,724	97,15	97,1587	0,008705
45	0	0	0	0	0	0	97,95	97,7212	0,228805

Коефіцієнти регресійного рівняння

№	Позначення	Значення
1	A(0,0)	97,72119
2	A(0,1)	-0,19139
3	A(0,2)	-0,41749
4	A(0,3)	-0,34351
5	A(0,4)	-0,56053
6	A(0,5)	1,193748
7	A(0,6)	0,016867
8	A(1,1)	-0,29723
9	A(1,2)	0
10	A(1,3)	8,88E-16
11	A(1,4)	-8,9E-16
12	A(1,5)	0
13	A(1,6)	-4,4E-16
14	A(2,2)	-0,19629
15	A(2,3)	-4,4E-16
16	A(2,4)	1,33E-15
17	A(2,5)	1,33E-15
18	A(2,6)	0
19	A(3,3)	-0,09535
20	A(3,4)	3,11E-15
21	A(3,5)	-2,2E-15
22	A(3,6)	8,88E-16
23	A(4,4)	-0,14582
24	A(4,5)	-2,2E-15
25	A(4,6)	-8,9E-16
26	A(5,5)	-0,31405
27	A(5,6)	0
28	A(6,6)	-0,17947

Перерізи факторного простору
Фіксовані значення

X1	X2	X3	X4	X5	X6
-0,5	-0,8	-1,2	-1	1	0

X	Y5(X1)	Y5(X2)	Y5(X3)	Y5(X4)	Y5(X5)	Y5(X6)
-2	98,69273	99,36169	99,55095	99,64331	94,99686	98,76864
-1,6	99,04418	99,47736	99,55086	99,62908	95,92659	99,03382
-1,2	99,30052	99,53021	99,52025	99,56819	96,75582	99,24158
-0,8	99,46175	99,52025	99,45913	99,46064	97,48456	99,3919
-0,4	99,52786	99,44748	99,36749	99,30643	98,1128	99,48479
0	99,49886	99,31189	99,24534	99,10555	98,64055	99,52025
0,4	99,37475	99,11349	99,09268	98,858	99,0678	99,49828
0,8	99,15553	98,85227	98,90951	98,5638	99,39456	99,41888
1,2	98,84119	98,52825	98,69582	98,22293	99,62082	99,28206
1,6	98,43175	98,14141	98,45161	97,8354	99,74658	99,0878

Таблиця В5 Матриця для апарата із ступеневим відокремлювачем і бункером
Обробка результатів, експерименту, що планується

Матриця планування експерименту

Результати обробки

№ п.п	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y	Y _{расч.}	Y-Y _{расч.}
1	1	1	1	1	1	1	95	95,11463	-0,11463
2	-1	1	1	1	1	-1	38	37,86637	0,133631
3	1	-1	1	1	1	-1	41,5	41,18154	0,31846
4	-1	-1	1	1	1	1	82,5	82,93721	-0,43721
5	1	1	-1	1	1	-1	34,5	34,18772	0,312281
6	-1	1	-1	1	1	1	75,5	75,94339	-0,44339
7	1	-1	-1	1	1	1	79	79,25856	-0,25856
8	-1	-1	-1	1	1	-1	22	22,01031	-0,01031
9	1	1	1	-1	1	-1	43	42,62829	0,37171
10	-1	1	1	-1	1	1	84	84,38396	-0,38396
11	1	-1	1	-1	1	1	87,5	87,69914	-0,19914
12	-1	-1	1	-1	1	-1	30,5	30,45088	0,049122
13	1	1	-1	-1	1	1	80,5	80,70531	-0,20531
14	-1	1	-1	-1	1	-1	23,5	23,45706	0,042942
15	1	-1	-1	-1	1	-1	27	26,77223	0,227772
16	-1	-1	-1	-1	1	1	68	68,5279	-0,5279
17	1	1	1	1	-1	-1	42,4	41,84968	0,550324
18	-1	1	1	1	-1	1	83,4	83,60535	-0,20535
19	1	-1	1	1	-1	1	86,9	86,92052	-0,02052
20	-1	-1	1	1	-1	-1	29,9	29,67226	0,227735
21	1	1	-1	1	-1	1	79,9	79,9267	-0,0267
22	-1	1	-1	1	-1	-1	22,9	22,67844	0,221556
23	1	-1	-1	1	-1	-1	26,4	25,99361	0,406386
24	-1	-1	-1	1	-1	1	67,4	67,74929	-0,34929
25	1	1	1	-1	-1	1	88,4	88,36727	0,032729
26	-1	1	1	-1	-1	-1	31,4	31,11901	0,280985
27	1	-1	1	-1	-1	-1	34,9	34,43419	0,465815
28	-1	-1	1	-1	-1	1	75,9	76,18986	-0,28986
29	1	1	-1	-1	-1	-1	27,9	27,44036	0,459635
30	-1	1	-1	-1	-1	1	68,9	69,19604	-0,29604
31	1	-1	-1	-1	-1	1	72,4	72,51121	-0,11121
32	-1	-1	-1	-1	-1	-1	15,4	15,26295	0,137047
33	1,724	0	0	0	0	0	56,3	57,53765	-1,23765
34	-1,724	0	0	0	0	0	45,3	44,18305	1,116954
35	0	1,724	0	0	0	0	44,3	44,67998	-0,37998
36	0	-1,724	0	0	0	0	37,3	37,0407	0,259276
37	0	0	1,724	0	0	0	53,3	53,7086	0,408649
38	0	0	-1,724	0	0	0	34,3	34,0120	0,287950
39	0	0	0	1,724	0	0	42	42,1329	0,132877
40	0	0	0	-1,724	0	0	37	36,9878	0,012178
41	0	0	0	0	1,724	0	42,3	41,6040	0,695958
42	0	0	0	0	-1,724	0	34,3	35,1167	0,816657
43	0	0	0	0	0	1,724	107,3	105,0310	2,268956
44	0	0	0	0	0	-1,724	17,3	19,6897	2,389655
45	0	0	0	0	0	0	37,3	36,9345	0,365455

Коефіцієнти регресійного рівняння

№	Позначення	Значення
1	A(0,0)	36,93454
2	A(0,1)	3,873146
3	A(0,2)	2,21556
4	A(0,3)	5,712471
5	A(0,4)	1,492185
6	A(0,5)	1,881492
7	A(0,6)	24,75098
8	A(1,1)	4,68539
9	A(1,2)	7,22E-16
10	A(1,3)	5,55E-17
11	A(1,4)	5,55E-17
12	A(1,5)	-1,7E-16
13	A(1,6)	-1,7E-16
14	A(2,2)	1,320852
15	A(2,3)	-1,7E-16
16	A(2,4)	-1,7E-16
17	A(2,5)	-1,7E-16
18	A(2,6)	5,55E-17
19	A(3,3)	2,330213
20	A(3,4)	-1,7E-16
21	A(3,5)	-1,7E-16
22	A(3,6)	-1,7E-16
23	A(4,4)	0,883462
24	A(4,5)	7,22E-16
25	A(4,6)	-1,7E-16
26	A(5,5)	0,479717
27	A(5,6)	-1,1E-15
28	A(6,6)	8,554609

Розрізи факторного простору

Фіксовані значення

X1	X2	X3	X4	X5	X6
-0,5	-0,8	-1,2	-1	1	0

X	Y5(X1)	Y5(X2)	Y5(X3)	Y5(X4)	Y5(X5)	Y5(X6)
-2	45,25574	35,27464	34,89062	34,65345	29,28992	18,21172
-1,6	40,05804	34,25883	33,8201	33,97814	29,35173	15,79347
-1,2	36,35966	33,6657	33,49525	33,58553	29,56704	16,1127
-0,8	34,1606	33,49525	33,91606	33,47564	29,93586	19,16941
-0,4	33,46088	33,74746	35,08255	33,64845	30,45819	24,96359
0	34,26047	34,42235	36,9947	34,10397	31,13404	33,49525
0,4	36,55939	35,51991	39,65253	34,8422	31,96339	44,76438
0,8	40,35764	37,04014	43,05602	35,86313	32,94625	58,77098
1,2	45,65521	38,98305	47,20518	37,16678	34,08262	75,51506
1,6	52,4521	41,34863	52,1	38,75313	35,3725	94,99662
2	60,74832	44,13688	57,7405	40,62219	36,81589	117,2156

Додаток Д.1

Договір про неприбуткову спільну діяльність.

м. Львів

«01» 06 2009 року

ВАТ «Львівський локомотиво-ремонтний завод» в особі Голови Правління Рудевича Івана Івановича (далі – Сторона 1), що діє на підставі Статуту, та Національний університет "Львівська Політехніка" в особі ректора Бобала Юрія Ярославовича (далі – Сторона 2), що діє на підставі Статуту уклали даний договір про наступне:

1. Предмет і мета договору.

Сторони за даним договором домовляються проводити дослідження ефективності застосування нових систем пиловловлення, розроблених на кафедрі «Охорона праці», із використанням створених на кафедрі «Охорона праці» Національного університету "Львівська Політехніка" нових систем пиловловлення, що відповідає умовам «Єдиної методики випробувань пиловловлювачів», на пилах, які утворюються під час експлуатації різноманітного обладнання інструментального цеху Сторони 1.

2. Взаємні обов'язки сторін.

Сторони зобов'язуються:

2.1. Обмінюватися отриманими в результаті досліджень результатами, для використання їх у подальшому в процесі впровадження через госпдоговірну тематику у виробництво з метою поліпшення умов праці, зведення шкідливих викидів до норм ГДВ і ГДК, поліпшення екологічної безпеки виробництва.

2.2. Проводити спільні консультації та семінари з проблем очистки повітря від пилу.

2.3. Проводити випробування пиловловлювачів на експериментальному стенді кафедри «Охорона праці», на пилах, представлених Стороною 1, за попередньою домовленістю щодо часу та термінів випробувань.

3. Обов'язки Сторони 1.

3.1. Надавати у спільне користування зразки матеріалів і пилу Стороні 2 для проведення випробувань пиловловлювачів у необхідній кількості та регламентовані терміни.

3.2. Приймати активну участь у випробуваннях нових систем пиловловлення, створених Стороною 2, та на стандартному експериментальному стенді кафедри «Охорона праці» на зразках пилу, представлених Стороною 1.

3.3. Забезпечити зберігання нових дослідно-промислових систем пиловловлення.

3.4. Сприяти в ремонті обладнання Сторони 2 у разі виникнення несправностей.

4. Обов'язки Сторони 2.

4.1. Спільно зі Стороною 1 проводити випробування дослідних зразків пилу, наданих Стороною 1 у відповідності до п.3.1 цього Договору.

4.2. Брати участь у зберіганні дослідно-промислового обладнання і організовувати разом зі Стороною 1 його ремонт у разі виникнення несправностей.

5. Термін дії даного договору.

5. 1. Даний договір діє 2-а роки з моменту його підписання до «01» 06 2011 року.

5. 2. Даний договір може бути продовжений Сторонами за взаємною згодою шляхом укладення додатку до нього.

6. Інші умови.

6. 1. Даний договір укладено в двох оригінальних примірниках по одному для кожної зі Сторін.

6. 2. У випадках, непередбачених данім договором, Сторони керуються чинним законодавством України.

6. 3. Сторони зобов'язуються всі проблеми, які виникають при виконанні даного договору, вирішувати шляхом переговорів.

Сторона 1.

Сторона 2.

ВАТ «Львівський локомотиво-
ремонтний завод».

Національний університет
«Львівська політехніка».

Голова Президія

РУДЕВИЧ І.І.

Ректор

БОБАЛО Ю.Я.

Додаток Д.2

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Голова Правління ВАТ

«Львівський локомотиво-ремонтний

завод»

ЯРЕМА Р.Я.

2011 року.

АКТ

випробувань установки для очистки повітря від пилу.

(виконано за угодою № _____ від 01.06.2009 р.)

Комісія в складі:

- від “ЗАМОВНИКА” - ВАТ “Львівський локомотиво-ремонтний завод”:
 - головний інженер Колесніков Володимир Петрович,
 - начальник інструментального цеху Голяк Юрій Михайлович;
- від “ВИКОНАВЦЯ” - Національний університет “Львівська політехніка”:
 - керівник робіт професор Батлук В.А.,
 - аспірант Макачук В.Г.

в період з 18.11.09 по 24.01.11 провела експериментальні дослідження розробленої, запроектованої і виготовленої “ВИКОНАВЦЯМИ” установки для очистки повітря від аерозолей, що утворюються при роботі обладнання інструментального цеху заводу продуктивністю 12000 м³/год (чотири апарати продуктивністю по 3000 м³/год).

В результаті досліджень встановлено, що ефективність уловлення пилу в вищесказаній установці складає 99,2 %, що на 5-8 відсотків вище ефективності роботи циклонів ЦН-11, які встановлені на аналогічних виробництвах.

Впровадження установки дозволило зменшити запиленість робочих місць, покращити умови праці, довести викиди до норм ГДК і ГДВ, а відтак зменшити антропогенне навантаження на довкілля.

Ця установка рекомендується для впровадження в аналогічних виробництвах для уловлення аерозолей пилу, що утворюються при роботі обладнання інструментальних цехів.

Представники

“ЗАМОВНИКА”

Колесніков В. П.

Голяк Ю.М.

Представники

“ВИКОНАВЦЯ”

Батлук В.А.

Макачук В.Г.

Додаток Д.3

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Голова Правління ВАТ

«Львівський локомотиво-ремонтний завод»



ПРЕМА Р.Я.

2011 року.

АКТ

про використання впровадженої наукової роботи

(виконано за угодою № _____ від 01.06.2009 р.)

Цим актом, підтверджуємо, що установка для очищення повітря від пилу продуктивністю 3000 м³/год розроблена, запроектована та виготовлена науковим колективом кафедри "Охорона праці" Національного університету "Львівська політехніка" професором Батлук В.А. та аспірантом Макарчук В.Г. і впроваджена для експериментального випробування в інструментальному цеху ВАТ "Львівський локомотиво-ремонтний завод" продуктивністю 12000 м³/год (чотири апарати продуктивністю по 3000 м³/год). Ефективність її роботи складає 99,2%.

Пиловловлювачі, який входить в склад цієї установки, розроблені авторами цієї роботи захищені патентами на корисну модель: № 42581 а200901592 від 24.02.09. Опубл. 10.12.2009. Бюл. № 23; № 504043 заявка № и200912036801Д45/00 від 23.11.2009. Опубл. 10.06.2010. Бюл. № 11 2010р.

Експериментальне впровадження установки дозволило зменшити запиленість робочих місць, покращити умови праці, довести викиди до норм ГДК і ГДВ, а відтак зменшити антропогенне навантаження на довкілля.

Ця установка рекомендується для впровадження в аналогічних виробництвах для уловлення аерозолей пилу, що утворюються при роботі обладнання інструментальних цехів.

У зв'язку із успішним завершенням випробувань, установка демонтована та повернена «Виконавцю». Вирішується питання щодо виготовлення та промислового впровадження установки «Виконавця» на виробництві «Замовника».

Представники

Колесніков В.П.

"ЗАМОВНИКА"

Голяк Ю.М.

Представники

Батлук В.А.

"ВИКОНАВЦЯ"

Макарчук В.Г.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович – Г.:Физматгиз, 1960.
2. Адлер Д. Розрахунок тривимірного плин у круглого струменя в поперечному потоці / Д.Адлер, А. Барон // Ракетна техніка і космонавтика, 1979 (17.02). – С.53-60.
3. Азарський К.І. Моделювання, розробка і дослідження високоефективних пиловловлювачів з жалюзійним відокремлюванням / К.І. Азарський // «Науковий вісник будівництва», вип. 13, Харків. – ДТУБА ХОТБ - 2001 – С.54-59.
4. Акімов В.І. Стан атмосферного повітря в м. Кременчуці та вплив на здоров'я мешканців міста / В.І. Акімов, М.Д. Закіпний // Довкілля та здоров'я. – 2001.- №2(17).-С.70.
5. Александров А.Н. Пневмотранспорт и пылеулавливающие сооружения деревообрабатывающих предприятий: [справочник] / А.Н. Александров, Г.Ф. Козориз // под. ред. А.Н. Александров. – М.: Лесн. пром-ть, 1988. –С.248.
6. Александрова Т. Нормирование антропогенно-техногенных нагрузок на ландшафт. Состояние проблемы. Возможности и ограничения / Т.Александрова // Изв. АН СССР. Сер.: География. - 1990. - №1. - С.46-55.
7. Алексеев. Качественный анализ, “Количественный анализ”.
8. Алиев Г.М.-А.М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок / Г.М.-А.М. Алиев – М.: Металлургия, 1983. – С. 296.
9. Аппарат для удаления аэрозолей из воздуха: А.с. 180084. СССР. / А.И.Гальченко, А.А. Башаров, Г.Ф.Юмашев;- Оpubл. 1966. Бюл. №6.
10. Бабицкий Л.Ф. Основы научных исследований / Л.Ф. Бабицкий , В.М. Булгаков, Д.Г. Войтюк – К.: Изд-во НАУ - 1999. –С.205.

11. Батлук В.А. Принципиально новая конструкция пылеуловителя / В.А. Батлук, В.В. Батлук, В.Г. Макаrchук // Науково-технічний збірник "Поліграфія і видавнича справ", Українська академія друкарства, вип. №2 (46) - Львів- 2007 - С.221 - 223.

12. Батлук В.А. Основи безпеки життя та діяльності людини / В.А. Батлук, О.В. Мельников, А.В. Ляшеник, Е.В. Романцов, В.Г. Макаrchук // Матеріали доповідей на VII міжнародній науково-методичній конференції «Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика». – Миколаїв: НУК. – 2008. – С.33 – 37.

13. Батлук В.А. Принципово новий метод очищення повітря від пилу, який утворюється при спалюванні твердих побутових відходів / В.А. Батлук, Я.В. Мота, С.В. Шибанов, В.Г. Макаrchук, Е.В. Романцов // Збірник матеріалів міжнародної наукової конференції «Охорона праці та соціальний захист працівників». – К. – 2008. – С.22 – 24.

14. Батлук В.А. Некоторые аспекты решение вопроса пылеочистки в горной промышленности / В.А. Батлук, І.В. Проскурина, І.М. Козира, В.Г. Макаrchук // Матеріали VII міжнародної науково-технічної студентської конференції. – Донецьк: ДонНТУ. – 2008. – С. 228 – 233. 19.

15. Батлук В.А. Основи безпеки життя та діяльності людини / В.А. Батлук, О.В. Мельников, А.В. Ляшеник, Е.В. Романцов, В.Г. Макаrchук // Матеріали доповідей на VII міжнародній науково-методичній конференції «Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика». – Миколаїв: НУК. – 2008. – С.33 – 37.

16. Батлук В.А. Принципово новий метод очищення повітря від пилу, який утворюється при спалюванні твердих побутових відходів / В.А. Батлук, Я.В. Мота, С.В. Шибанов, В.Г. Макаrchук, Е.В. Романцов // Збірник матеріалів міжнародної наукової конференції «Охорона праці та соціальний захист працівників». – К. – 2008. – С.22 – 24.

17. Батлук В.А. Некоторые аспекты решение вопроса пылеочистки в горной промышленности / В.А. Батлук, І.В. Проскурина, І.М. Козира,

В.Г. Макарьчук // Матеріали VII міжнародної науково-технічної студентської конференції. – Донецьк: ДонНТУ. – 2008. – С.228 – 233.

18. Батлук В.А. Визначення оптимальних конструктивних розмірів відцентрово-інерційних пиловловлювачів / В.А. Батлук, В.В. Батлук, Ю.Є. Шелюх, В.Г. Макарьчук, Е.В. Романцов // Промислова гідравліка і пневматика: IX міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП, 22 – 23 квіт., 2008 р.: тези доповідей. – Кременчук, 2008. – С.44 – 45.

19. Батлук В.А. Дослідження апаратів для вловлення дрібнодисперсного пилю / В.А. Батлук, В.Г. Макарьчук // Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції з проблем видавничо-поліграфічної галузі: тези доповідей – К. – 2010, С. 16 – 17.

20. Батлук В.А. Основи безпеки життя та діяльності людини / В.А. Батлук, Е.В. Романцов, В.Г. Макарьчук // Безпека життя і діяльності людини – освіта, наука, практика: XI міжнародна науково-методична конференція: тези доповідей – Львів. – 2010. – С.246 – 247.

21. Батлук В.А. Динаміка руху частинок у внутрішній області стаціонарного турбулентного потоку в циклоні / В.А. Батлук, В.Г. Макарьчук, Е.В. Романцов // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: XVII міжнародна науково-технічна конференція, – 17 – 20 квітня 2012 р.: тези доповідей. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля. – 2012. – С.44.

22. Батлук В.А. Наукові основи створення високоефективного пиловловлюючого обладнання /Дис. д-ра техн. наук: 05.05.02. – Львів: НУ "Львівська політехніка", 2001. –С.370.

23. Батлук В.А. Основы экологии и охрана окружающей природной среды: учебное пособие] / В.А. Батлук – Львов: Афиша, 2001. –С.333.

24. Батлук В.А., Азарський К.І. Експериментальні дослідження відцентрово-інерційних апаратів // Вісник Черкаського державного технічного університету.- Черкаси - 2004 - № 4.- С.147-152.

25. Батлук В.А. Принципиально новая конструкция пылеуловителя / В.А. Батлук, В.В. Батлук, В.Г. Макарьчук // Науково-технічний збірник

“Поліграфія і видавнича справа”. – Львів: Українська академія друкарства. – 2007. – Вип. №2(46). – С.221 – 223.

26. Зниження концентрації дрібнодисперсного пилю, як метод усунення пожежо-вибухонебезпечних якостей пилю / В.А. Батлук, В.Г. Макаrchук, Р.Ю. Сукач, І.В. Проскуріна // Науково-технічний збірник “Наукові записки”. – Львів: Українська академія друкарства. – 2010. – №2 (52). – С.164 – 172.

27. Батлук В.А. Високоєфективне вловлювання полідисперсного пилю / В.А. Батлук, В.Г. Макаrchук, Е.В. Романцов, Р.Є. Стець // Науково-технічний збірник “Наукові записки”. – Львів: Українська академія друкарства. – 2009. – №1 (15). – С.139 – 145.

28. Батлук В.А. Залежність ефективності пиловловлення відцентрово-нерційних апаратів від конструкції бункера / В.А. Батлук, М.В. Басов, В.Г. Макаrchук., Р.Ю. Сукач // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця: ВДАУ. – 2009. – № 3 (25). – С.40 – 44.

29. Батлук В.А. Рівень забруднення атмосферного повітря та його вплив на стан здоров'я населення України / В.А. Батлук, Н.М. Параняк, В.Г. Макаrchук // Збірник наукових праць «Строительство, материаловедение, машиностроение». Серія «Безопасность жизнедеятельности». – Дніпропетровськ. – 2010. – № 52. – С.205 – 210.

30. Батлук В.А. The Problem of Highly Effective Cleaning of air from dust / В.А. Батлук, В.В. Батлук, В.Г. Макаrchук // Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power in Agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin. – 2009. – Vol. 11B. – P.26 – 31.

31. Батлук В.А. A mathematical model of vacuum cleaners, taking into account the motion of particles near the wall part of the dust collector / В.А. Батлук, В.В. Батлук, В.Г. Макаrchук // Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power industry in Agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin. – 2010. – Vol. 12C. – P.97–105.

32. Батлук В.А. Водные ресурсы и пути решения проблемы чистой воды / В.А. Батлук, В.Г. Макаруч, Е.В. Романцов, І.В. Проскуріна // Науково-технічний збірник "Наукові записки". – Львів: Українська академія друкарства. – 2008. – №1 (13). – С.231 – 238.

33. Батлук В.А. Вплив бункера на ефективність уловлення пилу / В.А. Батлук, В.В. Батлук, В.Г. Макаруч, І.В. Проскуріна // Науково-технічний збірник «Поліграфія і видавнича справа». – Львів: Українська академія друкарства. – 2008. – №2 (48). – С.132 – 141.

34. Белов С.В. Средства защиты в машиностроении: Расчёт и проектирование: [справочник] / С.В. Белов, А.Ф. Козьяков, О.Ф. Партолини др.; под ред. С.В.Белова. – М.: Машиностроение, 1989. – С.386.

35. Бердник О.В. Екологічні аспекти оцінки стану здоров'я населення / О.В. Бердник, Л.В. Серих //Довкілля та здоров'я. –2001.- №2(17).-С. 32-33.

36. Берлянд М.Е. Сучасні проблеми атмосферної дифузії й забруднення атмосфери / М.Е.Берлянд - Л.: Гідрометеоиздат, 1975. –С.448.

37. Брэдшоу П., Себеси Т., Фернгольц Г.Г. и др. Турбулентность. - М.: Машиностроение, 1980. –С.344.

38. Бруяцкий Е.В. Турбулентні стратифіковані плинн / Е.В. Бруяцкий – Київ: Наукова думка, 1986. –С.295.

39. Бусарев Е.А, Исследование гидравлического сопротивления аппаратов вихревого типа для комплексной очистки газов / Е.А. Бусарев, В.В. Алексеев, И.И. Поникаров // Химия и компьютерное моделирование. Вуглеровские сообщения– 2004. – т.5. – №2.

40. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами / Р. Буйройс – М.: Мир, 1975. –С.378.

41. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г.В. Веденяпин – М.: Колос, 1973. –С.199.

42. Виклику Н.Л. Розсіювання домішки в прикордонному шарі атмосфери / Н.В. Виклику – Л.: Гидром. – 1974. –С.191.

43. Винарский М.С, Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье – К.: Техніка, 1975. –С.168.
44. Власов А.Ф. Удаление пыли и стружки от режущих инструментов /А.Ф. Власов – М.: Машиностроение, 1982. –С.183.
45. Власов Е.В. Исследование волновой структуры течений в начальном участке струи при различных уровнях начальной турбулентности / Е.В.Власов, А.С.Гиневский, Р.К.Каравосов // Ученые записки ЦАГИ. – 1978. – Т. 9. – С.251-255.
46. Власов Е.В., Гиневский А.С., Каравосов Р.К. Исследование волновой структуры течений в начальном участке струи при различных уровнях начальной турбулентности// Ученые записки ЦАГИ. - 1978. - Т. 9, №1. - С.251-255.
47. Воронин Ю.Б. Пневмотранспорт измельченной древесины / Ю.Б. Воронин – М.: Лесн. пром-ть, 1977. –С.208.
48. Гальченко А.И. Аппарат для удаления аэрозолей из воздуха: А.с. 80084. СССР. / А.И.Гальченко, А.А. Башаров, Г.Ф.Юмашев;- Оpubл. 1966. Бюл. №6.
49. Гервасьев А.М. Пылеуловители / А.М. Гервасьев – М.: СИОТ, 1954. – С.4.
50. Гидроциклон: А.с. 598651. СССР. МКИ В04С 3/06. / В.А.Вайдуков, Н.И.Глаголев (СССР) – №2433636 / 23 – 26; Заявл. 27.12.76. Оpubл. 5.10.77. Бюл. №15. – С.2.
51. Гидроциклон: А.с. 638382. СССР. МКИ В01С 3/06 / И.И.Кравченко (СССР) – №2483313/23-26; Заявл. 11.05.77; Оpubл. 05.06.79. Бюл. №13. – С.1.
52. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов / А.С. Гиневский -Г.: Машиностроение, 1969. – С.400.
53. Гольдштик М.А. Вихревые потоки / М.А. Гольдштик – Новосибирск.: Наука, 1981. – С.366.

54. Горбис З.Р. Физическая модель и математическое описание процесса движения мелких частиц в турбулентном потоке газов / З.Р. Горбис, Ф.Е. Спокойный // ТВТ. – 1977. – 15, №2. – С.399-408.

55. Горбис З.Р. Влияние основных силовых факторов на поперечную скорость мелких частиц, движущихся в турбулентном потоке газа / З.Р. Горбис, Ф.Е. Спокойный, Р.В. Загайнова // ИФЖ. – 1976. – 30, №4. – С.657-664.

56. Гордон Г.М. Пылеулавливание и очистка газов / Г.М. Гордон, И.Л. Пейсахов – М.: Металлургия, 1968. – С.396.

57. Гордон Г.М. Единая методика сравнительных испытаний пылеуловителей / Г.М. Гордон, М.М. Зайцев, П.А. Коузов – Л.: Наука, 1967. – С.120.

58. Гоц Т.Ю. Захворюваність населення України на бронхіальну астму і поширеність алергенних чинників повітря / Т.Ю. Гоц // Довкілля та здоров'я. – 2004. – №3(30). – С.8-10.

59. Градус Л.Я. Эксплуатация газоочистного оборудования на машиностроительных предприятиях / Л.Я. Градус, И.Л. Тарнавский, М.И. Иванова – М.: Машиностроение, 1988. – С.212.

60. Градус Л.Я. Руководство по дисперсному анализу методом микроскопии / Л.Я. Градус – М.: Химия, 1979. – С.245.

61. Двофазні моно- і полідисперсні плинн газу із частинками / під ред. Л.Е.Стернина. – Г.: Машинобудування. – С.170.

62. Евстифеев В.Н. Трубопроводный транспорт пластических и сыпучих материалов в строительстве / В.Н. Евстифеев – М.: Стройиздат, 1989. – С.248.

63. Ершов А.И. Новые конструкции сепараторов для очистки промышленных газов. Обзорная информация / А.И. Ершов, И.М. Плехов, А.И. Бершевец – Минск: БелНИИТИ, 1973. – С.35.

64. Завалишин Ф.С. Методы исследований по механизации сельскохозяйственного производства / Ф.С. Завалишин, М.Г. Мацнев – М.: Колос, 1982. – С.231.

65. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: [справ. изд. в 2 ч.] / под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда ; пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1988. – С.760.

66. Зубик С.В. Техноекологія. Джерела забруднення і захист навколишнього середовища: [навчальний посібник для студентів вищих і середній спеціальних навчальних закладів] / С.В. Зубик - Івано-Франківськ: Вид-во "Полум'я", 2004.- С.452.

67. Иевлев Н.А. Эксплуатация пневмотранспортных установок / Н.А. Иевлев – М.: Лесн. пром-ть, 1973. – С.112.

68. Измоленов Ю.А. Тенденция в совершенствовании процессов интерционной сепарации / Ю.А. Измоленов, В.Г. Харитонов // Труды конф. НИПИОТСТРОМА. – Новороссийск, – 1976. Вып. 12. – С.85-97.

69. Инструкция по проведению анализа дисперсного состава пыли седиментационными методами в жидкой среде. – Л.: Мир, 1965. – С.50.

70. Калашников А.Н. Особенности газодинамики и эффективность прямоточных каплеуловителей компрессорных станций / А.Н. Калашников – Сумы: ОАО Сумское машиностроительное НПО им. М.В. Фрунзе. – 2003 - С.194.

71. Качинський А. Екологічна безпека України: аналіз, оцінка та державна політика / А. Качинський, Г. Хміль –Сер. "Екологічна безпека"; Вип. 3: К НІСД, 1997 – С.127.

72. Климчук М.А. Стан навколишнього середовища та його вплив на здоров'я населення Львівської області / М.А. Климчук // Довкілля та здоров'я.- 2005.-№3(34).-С.43-48.

73. Козориз Г.Ф. Разработка и исследование регулируемых пневмотранспортных устройств для деревообрабатывающих производств / Г.Ф. Козориз, А.И. Гофман // Реферат. докум. о законч. науч.-исслед. работах в вузах УССР. – 1974. – Вып. 6. –С.13.

74. Козориз Г.Ф. Пневматический транспорт деревообрабатывающих предприятий / Г.Ф. Козориз – М.: Машиностроение, 1968. –С.122.

75. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов – Л.: Химия, 1987. –С. 264.
76. Коузов П.А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности / Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. – Л.: Химия, 1982. –С.256.
77. Коузов П.А. Анализ дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – 3-е изд. перераб. / П.А. Коузов – Л.: Химия, 1974 – С.205.
78. Кроу. Численные модели течений газа с небольшим содержанием частиц /Кроу // Теорет. основы инж. расчетов. – 1982. – 104, №3. – С.114-122.
79. Кузнецов И.Е. Оборудование санитарной очистки газов / И.Е. Кузнецов, К.И. Шмат, С.И. Кузнецов – К.: Техніка, 1989. –С.304.
80. Кучерук В.В. Очистка вентиляционного воздуха от пыли / В.В. Кучерук – М.: Машгиз, 1963. – С.144.
81. Куц В.П. Повышение эффективности пылеулавливания в центробежно-инерционных пылеуловителях с жалюзийным отводом воздуха: Дис. . канд. техн. наук: 05.17.08. – Львов. 1986. –С.221.
82. Левин Л.М. Исследования по физике крупнодисперсных аэрозолей Л.М. Левин – М.: АН СССР, 1961. –С.265.
83. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмперических формул: Учебн. пособие. - М.: Высш. школа, 1982. – С.224.
84. Макаrchук В.Г. Зниження концентрації дрібнодисперсного пилу, як метод усунення якостей пилу / В.Г. Макаrchук, Р.Ю. Сукач, І.В. Проскуріна // Науково-технічний збірник "Наукові записки". – Львів: Українська академія друкарства. – 2010. – №2 (52). – С.164 – 172.
85. Макаrchук В.Г. Очистка повітря від пилу при роботі гірничих комбайнів і комплексів / В.Г. Макаrchук, Р.Ю. Сукач // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця: ВДАУ. – 2010. – № 4 (30). – С.39 – 46.

86. Макаrchук В.Г. Автоматичний вибір системи зменшення концентрації пилу / В.Г. Макаrchук, М.В. Басов // Наукове видання «Наука та освіта». Збірник праць Міжнародного науково-методичного семінару. – Рим (Італія). – 2011. – С. 81 – 82.

87. Макаrchук В.Г. Розробка високоефективних апаратів для очистки повітря від пилу / В.Г. Макаrchук, Н.М. Параняк // Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power inlustry in Agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin. – 2011. – Vol. 13C. – P.32 – 42.

88. Макаrchук В.Г. Математична модель пилоочистки з врахуванням руху частинок у пристінковому шарі пиловловлювача / В.Г. Макаrchук, Н.М. Параняк // Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power inlustry in Agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin. – 2011. – Vol. 13D. – P.122 – 129.

89. Макаrchук В.Г. Динаміка руху частинок у пристінній області стаціонарного турбулентного потоку / В.Г. Макаrchук, В.В. Батлук // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Машинобудування. – К.: НТУУ "КПІ". – 2011. – №63. – С.175 – 180

90. Макаrchук В.Г. Створення математичної моделі руху частинок в криволінійному каналі в осесиметричному потоці / В.Г. Макаrchук // Збірник наукових статей 3-го Всеукраїнського з'їзду екологів із міжнародною участю (ECOLOGY-2011). – Вінниця. – 2011. – Том 1. – С.158 – 160.

91. Макаrchук В.Г. Динаміка руху частинок у внутрішній області стаціонарного турбулентного потоку в циклоні / В.Г. Макаrchук, Е.В. Романцов // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця: ВДАУ. – 2012. – № 2 (36). – С.38 – 45.

92. Макаrchук В.Г. Місце радіоекології при підготовці спеціалістів у вищих навчальних закладах / В.Г. Макаrchук // Матеріали 5-го з'їзду радіобіологічного товариства України. – Ужгород. – 2009. – С.176 – 179.

93. Макаrchук В.Г. Створення санітарно-гігієнічних умов праці в коксохімічному виробництві / В.Г. Макаrchук, І.В. Проскуріна // Матеріали III

міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». – Херсон: Херсонський державний морський інститут. – 2011. – Том 2. – С.222 – 227.

94. Макарьчук В.Г. Нові методи зменшення забруднення навколишнього середовища / В.Г. Макарьчук, Р.Є. Стець // Збірник наукових праць «Львівські хімічні читання»: XIII наукова конференція, 28 трав. – 1 черв. 2011 р.: тези доповіді – Львів: Видавничий центр Львівського національного університету ім. Івана Франка, 2011. – С.13.

95. Менчер Э.М. Основы планирования эксперимента с элементами математической статистики в исследованиях по виноградарству / Э.М. Менчер, А.Я. Земшман – Кишинев: «Штиинца», 1986. –С.238.

96. Меньшиков В.В. Методы оценки окружающей среды / В.В. Меньшиков, Т.В. Савельева – М.: Из-во МНЭГУ, 2000.

97. Монин Л.С. Статистическая гидромеханика / Л.С. Монин, А.М. Яглом – Т.1. – С.Пет., Гидр., 1992. –С.694.

98. Музичук Н.Т. Вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення / Н.Т. Музичук // Довкілля та здоров'я. –2000.- №2(13).-С.38-42.

99. Мухин В.В. Новые подходы к оценке загрязнения атмосферного воздуха по результатам анализа выбросов промышленных предприятий / Мухин В.В., Путилина О.Н., Теплова Т.Е., Козлова О.И. // Довкілля та здоров'я –2001.- №2(17).-С.53-57.

100. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2000 році. - К., Міністерство екології та природних ресурсів України, 2001.

101. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред / Р.И. Нигматулин – М.: Наука, 1978. –С.336.

102. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль [Б.Бретшнайдер., И. Курфюст]; под ред. А.Ф. Туболкина / Пер. с англ./– Л.: Химия, 1989. –С.288.

103. Охрана воздушной среды на деревообрабатывающих предприятиях / О.Н.Русак, В.В.Милохов, Ю.А.Яковлев, В.П.Щеголев – М.: Лесн. пром-сть, 1989. –С.240.

104. Охрана окружающей среды / С.В. Белов, Ф.А. Барбинов, Козьяков и др. под. ред. С.В. Белова - [2-е изд., перераб. и доп.].– М.: Высш. шк., 1991. – С.319.

105. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов – М.: Химия, 1981. –С.390.

106. Пылеуловитель / В.А. Батлук, А.П. Кулик, В.Г. Макаrchук // А.с. 1233913 СССР, МКИ В01Д 45/00, (SU). – № 3846016/ 23–26; Заявлено 1.02.86; Опубл. 30.05.86, Бюл. № 20. – С.3.

107. Патент 42581 Україна. Пиловловлювач із ступеневим відокремлювачем з бункером / Батлук В.А., Макаrchук В.Г. – № 4258а200901592; заявл. 24.02.09; опубл.10.12.2009, Бюл. № 23.

108. Патент 50404 Україна. Секційний пиловловлювач / Батлук В.А., Макаrchук В.Г. – № 200912036, В01Д45/00, заявл. 23.11.09; опубл. 10.06.10, Бюл. № 11.

109. Патент на винахід №53864А В01Д45/00 від 04.12.2001. Вихровий пиловловлювач / Ю.Є. Шелюх; опубл. 17.02.2003. Бюл.№1.

110. Патент на винахід №54119А В01Д45/00 від 20.05.2002. Вихровий пиловловлювач / Ю.Є. Шелюх, В.К. Батлук; опубл. 17.02.2003. Бюл.№2.

111. Патент на винахід №55787А В01Д45/00 від 18.06.2002. Прямотечійний пиловловлювач / Ю.Є. Шелюх; опубл. 15.04.2003. Бюл.№4.

112. Патент №161604 Польща, МКИ В04 С 5/181, Циклон, Witos Wincenty, Gaweda Zbigniew/ – Заявлено 28.04.89; опубл. 30.07.93.

113. Патент №2021856 Россия, МКИ В 04 С5/30.Инерционно-вихревой сепаратор / Геллер С.В. – Заявлено 5.12.91; опубл. 30.10.94.

114. Патент 262955 ЧСФР. МКИ В04 Д49/00. Sebor Vaclav. – Заявлено 29.04.87; опубл. 01.03.90.

115. Патент №157832 Польши, МКИ В04С 5/00. Устройство для очистки газа / Switka Kristofor, Ciszek Tadeusz. – Заявлено 20.03.89; опубл. 31.07.92.

116. Патент 2062139 РФ, МКИ В01 Д 45/08. Газожидкостной сепаратор / О.И. Квасенков, О.И. Андропова // Всероссийский НИИ консервной и овощесушильной промышленности. – Заявлено 09.09.93; опубл. 20.06.96; Бюл. №17.

117. Патент №4971613 США, МКИ В01 Д45/00/ Vane extractor with extended drain/ Valliant Charter D/\$ Peerless Manufacturing Co. – Заявлено 19.07.89; опубл. 20.11.90, НКИ 55/440.

118. Пирумов А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации /; под ред. Н.Я. Фабриканта. – М.: Госстройиздат, 1961. – С.121.

119. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха / А.И. Пирумов – М.: Стройиздат, 1981. – С.296.

120. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха в системах вентиляции и кондиционирования: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08. – М., 1975. – С.35.

121. Пирятинская С.Ф. Методы поиска новых технических решений / С.Ф. Пирятинская, Г.И. Иванов, Л.М. Киселев // Сер. Изобретательство и патентное дело: Обз. информ. – К.: УкрНИИНТИ, 1988. – Вып. 4. – С.236.

122. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И.Л. Повх – Л.: Стройиздат, 1974. – С.479.

123. Проскуріна І.В. Принципово нові перспективні методи очистки повітря від дрібнодисперсного пилу / І.В. Проскуріна, Н.В. Ступницька, Я.В. Мота, Е.В. Романцов, В.Г. Макарчук // Наукові вісті. – Івано-Франківськ: Інститут менеджменту та економіки «Галицька академія». – 2008. – № 13 (1). – С.115 – 124.

124. Реймерс Н. Борьба с пылью на деревообрабатывающих предприятиях / Н. Реймерс, О.Н. Русак, В.В. Милохов – М.: Лесн. пром-сть, 1975. – С. 152.

125. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшицкий – М.: Наука, 1971. – С.192.

126. Сажин Б.С. Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Обзорная информация / Б.С. Сажин, Л.И. Гудин // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов. – 1982. – №1(38), – С.47.
127. Сажин Б.С. Моделирование движения газа в аппаратах со встречными закрученными потоками / Б.С. Сажин // ТОХТ. – 1985. – Т.19, №5, – С.687-690.
128. Святков С.Н. Пневматический транспорт измельчённой древесины / С.Н. Святков – М.: Лесн. пром-ть, 1966. – С.320.
129. Сепаратор: А.с. №389816. СССР. / В.А.Лефенко, А.Т.Еремин, В.П. Ермаков, А.Е. Нимцович; Оpubл.1973. Бюл. №30.
130. Сидоренко В.М. Основы научных исследований / В.М. Сидоренко, И.М. Грушко – Харьков: Вища школа, 1977. –С.200.
131. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / [В.А. Ананьев, Л.Н. Балужева, А.Д. Гальперин и др.] – М.: Евроклимат, изд. Арина, 2000. – С.416.
132. Скиннер Б. Хватит ли человечеству земных ресурсов / Б. Скиннер - М.: Мир, 1989. - С.264.
133. Современные методы и средства улавливания пыли на промышленных предприятиях за рубежом. – К.: УкрНИИНТИ, 1983. – С. 15.
134. Солтис М.М. Статистичне моделювання хіміко-технологічних процесів: Текст лекцій. - Львів. Ред.-вид. відділ Львівського ун-ту. - 1988. – С.64.
135. Соу С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. – М.: Мир, 1971. – С.536.
136. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под общ. ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1975. – С.236.
137. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах / Л.Е. Стернин – М.: Машиностроение, 1974. – С.212.
138. Страус В.П. Промышленная очистка газов / В.П. Страус – М.: Мир: Химия, 1981. – С.616.

139. Теория статистики / под ред. Р.А.Шмойловой. – М.: Финансы и статистика, 1996. – С.460.
140. Турбулентность. [П. Брэдшоу, Т. Себеси, Г.Г. Фернгольд и др.] – М.: Машиностроение, 1980. – С.343-344.
141. Турбулентные двухфазные течения. – Таллин: Анэср, 1976.
142. Фурасов В. Динамика развития природных и техногенных чрезвычайных ситуаций / В. Фурасов, Е. Пастухова // ВИНТИ. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 1999. – №9. – С.46-57.
143. Фукс Н. А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс – М: Изд-во АН СССР, 1955. – С.352.
144. Физико-химические свойства элементов: [справочник] / под ред. Г.В.Самсонова. – Киев.: Наукова думка.– 1965. – С.807.
145. Фортье А. Механика суспензии / А. Фортье – М.: Мир, 1971. – С.264.
146. Хинце И.О. Турбулентность / И.О. Хинце– М.: Физматгиз, 1963. – С.680.
147. Хайкин С.Э. Физические основы механики / С.Э. Хайкин – М.: Наука, 1971. – С.751.
148. Центробежный сепаратор: А.с. 464319. СССР. МКИ В01 d 45/12 / В.В.Хаженович, В.Е.Бабенко, И.Д.Гойхман, В.Т.Цыбульский, И.Н. Позднеев, В.М.Марсин, Г.К.Савинов, Г.Л.Грошев, В.И.Рыбин, В.Е.Карев (СССР) – №1854485 / 23-26; Заявл. 08.12.72; опубл. 09.10.75. Бюл. №3. – С.2.
149. Циклон: А.с. 443686 (2). СССР. МКИ В04С 5/11/ В.М.Бочкарев, В.А.Синеужбовик, К.И. Филипова (СССР). – №1803983/23-26; Заявл. 29.06.72; опубл. 03.07.74. Бюл. №35. – С.2.
150. Циклон: А.с. 546378. СССР. МКИ В04С 5/14/ Б.Я.Грицай, Е.А.Капустин, Б.Г.Халеф, С.Ф.Сидоренко, В.Т.Лаврусь, В.И.Мыльников (СССР) – №2128923/26; Заявл. 28.04.75; опубл. 10.05.76. Бюл. №12. – С.1.
151. Циклон: А.с. 1041161. СССР. МКИ В04С 7/00/ А.П.Кулик, Б.П.Гончарук (СССР) – №3400160 / 23-26; Заявл. 25.02.82; опубл. 15.09.83. Бюл. №34. – С.2.

152. Циклон для очистки воздуха: А.с. 939098. СРСР / Г.Ф. Козориз; Опубл. 30.06.1982. Бюл. №24.

153. Циклон для очистки воздуха: А.с. 956035. СРСР / Г.Ф. Козориз; опубл. 07.09.1982. Бюл. №33.

154. Циклонный каплеуловитель: А.с. 341530. СССР. МКИ В04С 5/00/ А.Д.Швецов, Я.С.Постников (СССР) – №1386781/ 23-26; Заявл. 22.12.69; опубл. 14.06.72. Бюл. №19. – С.2.

155. Циклонный элемент: А.с. 1096003. СССР. МКИ В04С 5/02/ А.К.Панов, Т.Ф.Ильина, Н.А. Артамонов (СССР) – №3476933/ 23-26; Заявл. 23.07.82; опубл. 7.07.84. Бюл. №21. – С.2.

156. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг; [пер. с нем.] – М.: Наука, 1974. – С.712.

157. Шрайбер А.А. Турбулентные течения газовзвеси / А.А. Шрайбер, А.Б. Гавин, В.А. Наумов. – Киев: Научная мысль, 1987. – С.240.

158. Щукин В.К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов – М.: Машиностроение, 1982. – С.200.

159. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов ; под ред. Л.В. Чекалова. – Ярославль: Русь, 2004. –С. 424.

160. Якуба А.Р. Гидродинамика и эффективность пылеуловителей с закрученными потоками в процессах химической технологии красителей, пигментов и вспомогательных веществ: Дисс. док. тех. наук, – Сумы. 1996. – С.378.

161. Якуба Б.С. Структура потоков прямоточных вихревых аппаратов / Б.С. Якуба, С.А. Кузько // Гидравлические машины и аппараты. – Киев.: ИСНУ. – 1994. – С.291 – 299.

162. Якуба А.Р. Анализ и оценка сил, действующих на частицы в сепараторах с закрученными потоками / А.Р. Якуба, А.Н. Калашников // Вестник Сумского Государственного университета. – 1998. – №2(10). – С.41-45.

163. Якуба А.Р. Анализ и оценка сил, действующих на частицы в закрученном потоке / А.Р. Якуба, А.Н. Калашников // Труды 11 Украинской научно-технической конференции «Гидроаэромеханика в инженерной практике» Черкасы: ЧИТИ. – 1998. – С.98-102.

164. Якуба А.Р. Структура потоков прямоочных вихревых аппаратов / А.Р. Якуба, С.А. Кузько // Гидравлические машины и аппараты. – Киев: ИСНУ, 1994. – С.291-299.

165. Янковский С.С. Основные пути совершенствования аппаратов инерционной очистки газов / С.С. Янковский, Л.Я. Градус – М.: Машиностроение, 1989. – С.46.

166. Baranovsky S.I., Shetz J.f. Effect of injection angle on liquid injection in supersonic flow. – AIAA 79-0383, 1979.

167. Bauckhade K. Die Rolle der Teilchenrotation bei den Entmischungsgängen schwachsedimentierender, hochverbünnter Kugelsuspensionen in Vertikaler Poiseuille — Strömung // Chem— Ing,— Tech.— 1983— 55, N 9.— S.734 – 735.

168. Barth W. Berechnung und Auslegung von Zyklonenabscheidern auf Neuerer Grund Untersuchungen / Brennstoff— Wärme — Kruft. Bd.8, №1, 1956. – S.1 – 10.

169. Ogawa A. Separation mechanism for fine solid particles in the uniflow type of the cyclone dust collector / A. Ogawa, K. Sugiyama, K. Nagasaki // Paper presented at Filtech Conference, Horsham, West Sussex, UK, 1993. – PP.627-640.

170. Peng W. Determining the best modeling assumptions for cyclones and swirl tubes by CFD and LDA / W. Peng, P. Boot, A. Udding, A.C. Hoffmann and other // International Congress for particle Technology PARTEC 2001. Nuremberg, Germany March, 2001. – PP.27-29.

171. Roth J. Energy Saving in Cyclone Systems PMT / J. Roth, M. Scot – Zyklontechnik GmbH, Krems, Austria, 2000. – P.12.

172. Caporaloni et al (1975) та Reeks (1983).

173. Ciliberti D.F. Performanst of rotary floj cyclones / D.F. Ciliberti, B.W. Lancaster // Alche journal. – 1976. – Vol. 22, №2, – P.394 – 399.

174. Cyclone dust collector. – Chem. Eng. 1977, February 14. – P.65 – 72.

175. Fletcher R. D. Suspension stratification in the atmosphere // Phys. Fluids Suppl. - 1967.— 10, N 9, pt 2— P.223—236.

176. Fredriksson C. Exploratory Experimental and Theoretical Studies of Cyclone Gasification of Wood Powder. Doctoral thesis // Lulea university of technology. –Sweden, 1999. – P.169.

177. Frank Th. Application of Eulerian – Lagrangian prediction of gas – particle flow to cyclone separators. Lecture series 1999-2000. "Theoretical and experimental modeling of particle flow". – Brussels, Belgium. – 03-07 April, 2000. – P.52.

178. Fuchshuber G. Сэкономить на пылеочистке воздуха // Деревообрабатывающее оборудование Восточной Европы. – Австрия, Scheuch GmbH. 2001. – С.1-2.

179. Frank Th., Wassen E., Q. Yu. Lagrangian Prediction of Disperse Gas – Particle Flow in Cyclone Separators. Third International Conference on Multiphase Flow – ICMF'98. Lyon, France, June 8-12, 1998. Paper No. 217 - PP.1-8.

180. Hoffmann A.C. The use of swirl tubes for dedusting. Dept. of Chemical Engineering, University of Groningen. World Congress on Particle Technology 3, 2000. – P.6-20.

181. Ishii R. Motion of small particles in a gas flow // Phys. Fluids.-1984. 27, N 1 — P.33-41.

182. Yuanhui Zh. Modeling and Sensitivity Analysis of Dust Particle Separation for Uniflow Dedusters. University of Illinois Urbana. – Champaign, 2000- P.1-13.

183. Armenio et al. 1999; Boivin et al. 2000; Yamamoto et al., 2001; Kuerten & Vreman, 2005; Fede & Simonin, 2006.

184. Druzhinin & Elghobashi, 1998; Ferry & Balachandar, 2001, 2005; Pandya & Mashayek, 2002a; Rani & Balachandar, 2003; Kaufman et al., 2004; Moreau et al, 2005.

185. Saffman P. G. The lift on a small sphere in a slow shear flow // J. Fluid Mech. - 1965.— 22, N 2.— P.385- 400.

186. Simonin et al., 2002; Fevrier et al., 2005.

187. Buyevich, 1972b; Koch, 1990.

188. Oesterle & Petitjean (1991, 1993), Sommerfeld & Zivkovic (1992), Sommerfeld (1999).

189. Reeks M. W., McKee S. The dispersive effects of Basset history forces on particle motion in a turbulent flow// Phys. Fluids.— 1984.— 27, N 7— P.1573-1582.

190. Tanaka et al., 1991; Fede et al., 2002; Moreau et al., 2004.29. Tchen C. M. Mean value and correlation problems connected with the motion of small particles suspended in a turbulent fluid.— Hague : Martinus Nijhoff. — 1947. — P.123.