

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

ДОНБАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ПРОСКУРИНА ІРИНА ВАЛЕРІЇВНА

УДК 621.928.9

ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА НАВКОЛИЩНЄ
СЕРЕДОВИЩЕ ВІД ПИЛОВИХ ВИКИДІВ МЕТАЛУРГІЙНОЇ
ПРОМИСЛОВОСТІ

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Батлук Вікторія Арсеніївна
доктор технічних наук, професор

Алчевськ – 2011

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В МЕТАЛУРГІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ УКРАЇНИ	13
1.1. Рівень техногенної безпеки металургійних підприємств	13
1.2. Методи виділення частинок пилу з потоку	16
1.3. Способи й апаратура пиловловлювання, які застосовуються на металургійних підприємствах	19
1.4. Вплив різних факторів на вловлювання пилу в циклонах	25
1.5. Області застосування циклонів і батарейних циклонів, їх переваги і недоліки	29
1.6. Вирішення питання очищення повітря від пилу при його транспортуванні	31
1.7. Висновки	39
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАННИХ	40
2.1. Методика і результати поведення досліджень фізико-хімічних властивостей експериментального пилу	40
2.2. Методи вибору проб та підготовки пилу до аналізу	42
2.3. Визначення питомої поверхні проб пилу та виділення фракцій з необхідним розміром частинок	42
2.4. Аналіз дисперсного складу пилу	44
2.4.1. Ситовий аналіз	44
2.4.2. Мікроскопічний аналіз	49
2.5. Визначення швидкості руху й запиленості газів	49
2.6. Опис експериментальної установки	54
2.7. Висновки	57
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОЧИЩУВАННЯ ЗАПИЛЕНОГО ПОТОКУ В ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ НОВОЇ	

КОНСТРУКЦІЇ	58
3.1. Прийняті припущення, граничні і початкові умови	58
3.2. Моделювання руху повітряних потоків у відцентрово-інерційних пиловловлювачах	60
3.3. Модель турбуленції	62
3.4. Модель впливу інерційних сил і сил опору на рух частинок пилу	64
3.5. Результати моделювання	68
3.6. Висновки	79
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОСТВОРЕНИХ ВІДЦЕНТРОВО-ІНЕРЦІЙНИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ	80
4.1. Опис новостворених апаратів	84
4.2. Експериментальні дослідження пиловловлювачів	97
4.3. Оцінка погрішності	100
4.4. Статистичне моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлювання від конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача	101
4.5. Висновок	109
РОЗДІЛ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИЩУВАННЯ ПОВІТРЯ ВІД ПИЛУ	111
5.1. Стан питання	111
5.2. Фізико-хімічні якості пилу	118
5.3. Міроприємства технологічного порядку для покращення екологічних показників роботи	120
5.4. Постановка завдання по реконструкції установки пиловловлювання	122
5.5. Опис установки для очищення повітря від пилу	123
5.6. Дослідження дослідно-промислової установки	130
5.7. Оцінка впливу викидів забруднюючих речовин на стан забруднення атмосферного повітря	132
5.8. Висновки	134

РОЗДІЛ 6. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	
ВПРОВАДЖЕННЯ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ	138
6.1. Техніко-економічні показники пиловловлюючого обладнання	138
6.2. Розрахунок техніко-економічного ефекту від впровадження відцентрово-інерційних апаратів на металургійних підприємствах	139
6.3. Висновки	145
ВИСНОВКИ	146
Додаток А. Програма статистичного моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлювання від конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача	149
Додаток Б. Програма розрахунку переміщення частинок у різних зонах	155
Додаток В. Програма для чисельного розв'язку диференціального рівняння руху матеріальної точки	181
Додаток Д. Експериментальні дослідження пиловловлювачів	189
Додаток Е. Акти впровадження в виробництво та навчальний процес результатів дисертаційної роботи	191
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	200

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

N і N_0 – варійоване і початкове значення розрахункової концентрації, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Z_n і Z_b – початкова і вагова концентрація, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Q_n – загальна витрата повітря, $\text{м}^3/\text{год}$.

a і b – відповідно ширина і висота вхідного патрубку, м.

G_n – вага пилу, який подається у пиловловлювач за час досліду, кг.

$G_{\text{вл}}$ – вага пилу, який вловився в пиловловлювачі, кг.

ρ_p , ρ_T і ρ_n – відповідно густина: рідини, твердої частинки і повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$.

$\Phi_1, \Phi_2 \dots \Phi_n$ – відношення вагової кількості частинок кожної фракції, що поступає в пиловловлювач до вагової кількості всього сипучого матеріалу, який поступає в апарат, %.

G_1 – вага фільтра після пропускання пилу через апарат, кг.

G_2 – вага фільтра до проведення експериментів, кг.

$G_{\text{вих}}$ – кількість пилу, яка виноситься разом з очищеним повітрям, кг.

a_1 і a_2 – процент пилу данної фракції, відповідно вловленого і поступаючого пилу, %.

σ_R – стандартне відхилення розміру частинок, %.

q_q – дійсна витрата повітря через фільтр, м/с.

$q_{\text{розра}}$ – розрахункова витрата повітря через фільтр, м/с.

R – лінійний розмір частинки, м.

R_1 – радіус вихідного патрубку пилу, м.

V_p – швидкість проходження повітря через щілини між жалюзі відокремлювача, м/с.

$V_{\text{вх}}$ – швидкість входу пилоповітряного потоку в апарат, м/с.

$V_{\text{вих}}$ – швидкість виходу очищеного повітря, м/с.

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасний екологічний стан України (надмірна концентрація екологічно небезпечних виробництв, застаріле та неефективне природоохоронне обладнання на завершальних стадіях технологічних ланцюгів, ненадійність технічних систем, недостатня кваліфікація кадрів на підприємствах підвищеного екологічного ризику тощо) визначає крайню актуальність постійної уваги щодо діяльності по забезпеченню екологічної безпеки країни.

Донбас – це великий промисловий регіон України, в якому налічується кілька тисяч великих промислових підприємств, виробничо-промислових об'єднань і підприємств паливно-енергетичного комплексу, гірничодобувної, металургійної, хімічної промисловості, важкого машинобудування, будівельної галузі, тобто майже всі екологічно небезпечні галузі. Обсяг викидів пилу і газів в атмосферу цими підприємствами становить до 40% всіх викидів країни, а це близько 70 тонн на 1 кв. км, що в 6 разів більше, ніж в середньому по Україні, і це значно ускладнює екологічну ситуацію в Україні. Тому однією з найактуальніших проблем, яка стоїть сьогодні перед промисловістю, є вдосконалення техніки і технології охорони навколишнього середовища в цілому, і, зокрема, зменшення запиленості атмосферного повітря.

Проведений аналіз праць вітчизняних та закордонних дослідників показує, що на даний час через технологічну складність процесу вловлювання пилу й відносно високу його собівартість недостатньо розглянуті питання математичного моделювання процесів уловлювання пилу, методики розрахунку й конструювання пиловловлювачів, що не дозволяє не тільки їх порівнювати, але й прогнозувати енергетичні показники і ефективність роботи на різних стадіях проектування. Це, у свою чергу, гальмує процес покращення екологічної ситуації, як у цілому в регіоні, так і в агломераційному виробництві металургійної промисловості зокрема.

Викладене вище обумовлює актуальність обраної теми дисертації, спрямованої на вирішення важливої науково-практичної та прикладної задачі –

зниження техногенного навантаження на довкілля від пилових викидів агломераційного виробництва металургійної промисловості, вирішення якої дозволяє на основі теоретичного обґрунтування та дослідження процесів пилоочищення в умовах металургійного виробництва створити конструкції апаратів, які відповідали б цим вимогам.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота має науково-прикладний характер. Напрямок роботи пов'язаний 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 (№ держреєстрації 0107U010240).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є локалізація екологічної загрози забруднення атмосфери від пилу в металургійному виробництві, що спричиняє негативні наслідки для навколишнього середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану проблеми з екологічної безпеки в металургійному виробництві в цілому і в агломераційному виробництві, зокрема; довести необхідність зниження техногенного навантаження на довкілля за рахунок створення високоефективних уловлювачів дрібнодисперсного пилу;

- дослідити траєкторії руху повітряних потоків і характер розподілу швидкостей і тисків у горизонтальних і вертикальних перерізах у запропонованому пиловловлювачі, створити математичну модель процесу руху частинки пилу в криволінійних потоках і отримати залежності його сепараційної здатності від геометричних параметрів самого апарата й жалюзійного відокремлювача в ньому;

- для проведення розрахунку створити модель апарата із жалюзійним відокремлювачем, аналіз якої дасть змогу розкрити фізичну суть руху повітряних потоків і значно знизити кількість експериментальних досліджень;

- дослідити вплив конструктивних, технологічних і експлуатаційних характеристик створених пиловловлювачів на аеродинамічні процеси, які визначають ступінь очищення повітря від пилу. Довести доцільність установлення жалюзійного відокремлювача коаксіально корпусу апарата для поліпшення екологічної обстановки в регіоні;

- обґрунтувати конструкції перспективних відцентрово-інерційних пиловловлювачів, які забезпечують зниження аеродинамічних втрат і підвищення ефективності очищення повітря від пилу під час роботи транспортерних ліній в агломераційних цехах металургійного виробництва із врахуванням дисперсного складу, фізико-хімічних та механічних властивостей пилу, який при цьому утворюється. Розробити схеми обезпилювання із використанням запропонованих пиловловлювачів під час роботи аспіраційних установок для цехів розмелення збагачувальних фабрик з метою значного зменшення викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферу й зниження техногенного навантаження на довкілля;

- провести екологічне та економічне обґрунтування впровадження запропонованих пиловловлювачів на пересипних ділянках стрічкових транспортерів агломераційного виробництва металургійних заводів. Визначити річний сумарний економічний ефект і довести факт вирішення еколого-гігієнічних проблем.

Об'єкт дослідження – процеси забруднення атмосфери дрібнодисперсними частинками аерозолі, що утворюються в агломераційному виробництві металургійної промисловості.

Предмет дослідження – очищення відхідних газів від пилових викидів металургійної промисловості за допомогою відцентрового пиловловлювача із жалюзійним відокремлювачем.

Методи дослідження базуються на проведенні моніторингу стану забруднення навколишнього середовища викидами від процесів агломераційного виробництва металургійної промисловості, для чого використано: гідродинамічний метод для визначення швидкостей і витрат потоків та втрат

тиску; ваговий – для визначення ступеня очищування; дисперсний – для визначення складу пилу. Використано сучасні методи математичної фізики, теорію ймовірності при теоретичних дослідженнях і моделюванні динамічних процесів руху повітряних потоків у сепараторах з використанням САПР Cosmos Floworks. Для обробки експериментальних результатів досліджень застосовані основні методи математичної статистики, які проведено у програмі статистичного моделювання MNK.cpp.

Наукова новизна полягає в підвищенні екологічної безпеки за рахунок зменшення викидів в атмосферу на базі комплексних теоретичних, практичних і експериментальних досліджень, зокрема:

- вперше на основі теоретичних та експериментальних досліджень створена математична модель процесу руху частинки пилу в криволінійних потоках і отримані залежності розрахунку сепараційної здатності відцентрово-інерційних пиловловлювачів, які, на відміну від інших, ураховують геометричні параметри жалюзійного відокремлювача, що дозволяє забезпечити дотримання нормативів викидів пилу в атмосферу і сприяє зменшенню техногенного навантаження на довкілля;

- вперше експериментально встановлені та теоретично пояснені залежності траєкторій руху пилоповітряної суміші від вхідних параметрів потоку і геометричних розмірів як самого пиловловлювача, так і жалюзійного відокремлювача;

- вперше побудовано твердотільну модель пиловловлювача, дослідження якого здійснено на основі рівнянь Нав'є-Стокса та методів скінченних елементів, здатного високоефективно вловлювати дрібнодисперсні фракції пилу, що у свою чергу покращує екологічну ситуацію в металургійному виробництві;

- отримало подальший розвиток теоретичне та експериментальне обґрунтування доцільності поєднання відцентрового та інерційного способів уловлювання пилу в одному апараті для покращення стану атмосферного повітря й екологічної ситуації в цілому.

Практична цінність роботи. Розв’язані в дисертації задачі, отримані результати і використані методи досліджень дозволяють ставити, розв’язувати різноманітні задачі, пов’язані з екологічною безпекою та технологією металургійного виробництва. З метою підвищення рівня екологічної безпеки та зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище вперше створено принципово нові конструкції апаратів для вловлювання дрібнодисперсних фракцій пилу при транспортуванні шихти в агломераційному виробництві та вдосконалено методику їх розрахунку, яку можна застосовувати для будь-яких співвідношень конструктивних особливостей аналогічних апаратів.

Вперше за результатами експериментальних досліджень та математичного моделювання процесу пиловловлювання у відцентрово-інерційних пиловловлювачах визначені їх оптимальні геометричні параметри, які враховані при конструюванні принципово нових апаратів мокрого типу (отримано патенти на винахід).

За результатами проведених досліджень запропоновано та впроваджено на комбінаті ВАТ “АМК” (м. Алчевськ) на дільниці подрібнення коксової дрібноти та коксового вугілля (акт впровадження від 18 травня 2009 року) установку для очищення повітря від пилу, що дозволило значно знизити запиленість на місцях пересипів та поліпшити санітарно-гігієнічні умови праці через зменшення кількості пилу на конвеєрних лініях, а також зменшити викиди його в атмосферу, локалізуючи таким чином екологічну загрозу.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються при викладанні курсів “Експлуатація гідравлічного обладнання” у розділі “Очистка рідин і газів” і “Об’ємний гідропривід” в розділі “Кондиціонування робочих середовищ” для студентів спеціальності “Гідравлічні і пневматичні машини” Донбаського державного технічного університету (акт впровадження від 01 червня 2011 року).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійним завершеним дослідженням автора в галузі екологічної безпеки. Особистий

внесок здобувача у роботах, опублікованих у співавторстві, полягає у наступному: проведено аналіз джерел викидів пилу у металургійному виробництві та визначено його негативний вплив на навколишнє середовище і населення [128 – 138], розроблена конструкція експериментального стенду та проведені експериментальні дослідження [129, 131, 132, 134, 138], проведені аналіз і обробка експериментальних даних, визначені морфометричні, фізико-хімічні й дисперсні характеристики пилу [128, 130, 132, 134]. Взята участь у проведенні теоретичного аналізу класичних рівнянь та створенні математичної моделі руху твердих частинок в апараті [134 – 136, 138]. Створені дослідні моделі апаратів [129], при комп'ютерному моделюванні досліджуваних процесів, створені та експериментально досліджені моделі пиловловлювачів [134 – 136, 138], впроваджені результати роботи у виробництво [131, 133, 137]. Постановка досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів, формування мети й завдань дисертаційної роботи та безпосередня участь на всіх етапах її виконання від збору інформації до її опрацювання й застосування в проведених дослідженнях, виконувалися здобувачем спільно з науковим керівником.

Апробація результатів роботи. Матеріали дисертації обговорювалися на міжнародних та українських конференціях: III міжнародна науково-практична конференція «Управління в освіті» (Львів, 2007 р.); VIII міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка і технологія» (Київ – Севастополь, 2007 р.); IV міжнародна науково-технічна конференція «Еколого-економічні проблеми карпатського євро регіону» (Івано-Франківськ, 2007 р.), VII міжнародна науково-методична конференція «Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика» (Миколаїв, 2008 р.), IX міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (Кременчук, 2008 р.), IX Міжнародна науково-практична конференція «Прогресивна техніка та технологія 2008», (Київ, 2008 р.), VII Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеродинаміка в інженерній практиці» (Чернівці, 2009 р.), I міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища.

Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 2009 р.), IV науково-практична конференція «Сучасні проблеми збалансованого природокористування (Кам'янець-Подільський, 2009 р.), X міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (Львів, 2009 р.), XI міжнародна науково-технічної конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (Мелітополь, 2010 р.), на пленарному засіданні XVI міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (Вінниця, 2011 р.).

Публікації: За результатами дисертаційної роботи опубліковано 11 наукових праць у спеціалізованих виданнях, що входять до переліку ВАК України, 3 тези доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях та отримано 3 патенти України на корисну модель.

Структура дисертації: Дисертація складається із вступу, 6 розділів, висновків, переліку використаної літератури, який містить 138 найменувань вітчизняних і зарубіжних джерел. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 141 сторінці основного тексту, включаючи 28 таблиць, 59 рисунків, 5 додатків. Загальний обсяг роботи – 211 сторінок. У додатках наведено: програми для ЕОМ та приклади основних розрахунків; результати експериментальних і статистичних даних; акти випробувань і акти про використання впровадженої наукової роботи.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В МЕТАЛУРГІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ УКРАЇНИ

1.1. Рівень техногенної безпеки металургійних підприємств

В останні роки питання екологічної безпеки в Україні значно погіршилось, особливо в східних регіонах. Донбас – це величезний індустріальний регіон України, який забезпечує більшу частину промислового виробництва Держави. Фахівці Міжнародної організації праці (МОП) підрахували, що економічні витрати, пов'язані з професійними захворюваннями, складають 1% світового валового національного продукту [1, 2]. На ці кошти, орієнтовно, можна забезпечити харчування протягом року близько 75 млн. людей.

В останні роки об'єми викидів істотно зменшилися, що більшою мірою пояснюється спадом виробництва а в меншій – здійсненням природоохоронних засобів. Через розмаїття технологічних процесів металургійне виробництво є одним із найважчих для зниження негативного впливу на навколишнє середовище, що ускладнюється експлуатацією великої кількості морально й фізично застарілого обладнання, з якого 60% експлуатується більше 10 років, до 20% – понад 20 років, 10% – 30 років [3].

На багатьох промислових підприємствах України і, зокрема, металургійного профілю існує низький рівень техногенної безпеки, що проявляється в частих викидах шкідливих речовин у навколишнє середовище, збільшення кількості промислових відходів, зниження рівня надійності об'єктів, погіршення здоров'я населення тощо. Причинами такої ситуації є старіння основних фондів, відсутність або повільні темпи їх відновлення, низька якість проектної документації, відсутність належного контролю стану об'єктів, засобів автоматизації й захисту. Проте найважливішою причиною є відсутність єдиних наукових методів оцінки й аналізу техногенної безпеки об'єктів на стадії

проектування, що призводить до створення техногенно-небезпечних об'єктів, через що в останні роки проблеми екології стали вийняткові актуальними [4, 5].

Якщо в сфері оцінки шкідливих впливів на воду, ґрунт, повітря і в цілому в області екологічної експертизи виробництв і моніторингу середовища, статичному обліку кількості промислових і побутових, а також у створенні полігонів і смітників відходів є певні досягнення, то в напрямку розробки нових екологічно чистих і безпечних виробництв, досягнення й науково-технічна активність явно недостатні. Відомі підходи до проблеми техногенної безпеки розрізнені, часом відсутні науково обґрунтовані методики оцінки й кількісні критерії рівня небезпеки, недостатньо використовуються можливості в області комп'ютерних технологій, сучасних методів дослідження й математичне моделювання.

Захист атмосферного повітря від забруднення є однією з найбільш актуальних проблем сучасності. Металургійне підприємство – це сукупність специфічних виробництв, пов'язаних з високотемпературною обробкою вугільної шихти та переробкою коксового газу, який виділяється при цьому з одержанням цілого ряду цінних хімічних продуктів [6, 7]. Традиційні технологічні процеси в ряді випадків пов'язані з виділенням в атмосферне повітря шкідливих речовин, таких як: аміак, оксид вуглецю, оксид азоту, діоксид сірки, сірководень, ціаністий водень, бензол, нафталін, феноли, а також вугільний й коксовий пил.

Виділення пилу в атмосферу на металургійних підприємствах пов'язане з особливостями технологічних процесів: при розвантаженні вагонів, зберіганні й усередненні шихти на відкритих складах, транспортуванні, перевантаженні, дробленні, сушінні, сепарації, термообробці шихти. Організовані викиди пилу зменшують за допомогою очищення в різних типах пиловловлювачів [8 – 14].

На металургійних підприємствах продовжують застосовувати мокрі пиловловлювачі, які народжують проблему переробки й утилізації шламових вод. У наявній технічній літературі питання обезпилення газів і повітря на металургійних підприємствах практично не розглянуті, що створює певні труднощі при їх проектуванні, експлуатації й контролі [15 – 17].

Доменні печі «поїдають» кокс класу більше як $25 \cdot 10^{-6}$ м. Як паливо й

сировина для феросплавного виробництва використовується горіх коксовий класу $(10 - 25) \cdot 10^{-6}$ м, а найменша фракція – коксовий дріб'язок, класу $(0 - 10) \cdot 10^{-6}$ м, надходить на аглофабрики комбінату.

П'ята частина шкідливих речовин, що викидається зі стаціонарних джерел, потрапляє в повітря робочої зони, а з них – в атмосферу, і тому однією з основних проблем при вдосконаленні виробничих процесів є усунення або різке зменшення пиловиділення. Особливо гостро стоїть проблема вловлення дрібнодисперсних фракцій, які завдяки малій густині розсіюються та пересуваються на великі відстані потоками повітря. Суттєве підвищення вимог до систем очистки неминує призводить до ускладнення їх структури та різкого збільшення комплектуючих апаратів. Складність апаратури різного призначення по кількості комплектуючих пристроїв зростає в останні роки в середньому в 2 – 3 рази. 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 пилоочищення, при одночасному підвищенні вимог щодо ефективності їх роботи, вимагає прийняття певних мір по розробці високоефективних апаратів пиловловлювання.

Вибір того чи іншого пиловловлювача – доволі складна задача, яка визначається фізико-хімічними властивостями пилоповітряної суміші, необхідними продуктивністю, ефективністю пиловловлювання, економічністю процесу. Найбільш широке застосування знайшли апарати сухого обезпилювання. 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 [18, 19].

Методи пиловловлювання поділяють на дві групи: газодинамічні та електричні [20]. До газодинамічних методів відносять: гравітаційний, інерційний, відцентровий, фільтраційний та струменевий, до електричних – електрофільтраційний, електромагнітний та акустичний.

Вибір методу й пристрою для вловлювання аерозолів передусім залежить від їх дисперсного складу (табл. 1.1) [21].

Таблиця 1.1

Вибір апарата для вловлювання аерозолів в залежності від їх дисперсного складу

Розмір частинок, 10^{-6} м	Апарати
1	2
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

Через різноманітність технологічних процесів металургія є одним із найважчих для зниження негативного впливу на навколишнє середовище, у якій вартість систем газо- і водоочищення наближається, а в ряді випадків перевищує капітальні витрати на основне виробництво. Кількість пилу, що утворюється, залежить від технологічного процесу, його інтенсивності, фізико-хімічної характеристики компонентів шихти (величини, міцності, складу легковогінних металів і сполук тощо) і багатьох інших факторів.

1.2. Методи виділення частинок пилу з потоку

Унаслідок різноманіття властивостей газів пилоповітряного потоку (температури, хімічного складу, вологості тощо) і пилу, який виділяється, (у першу чергу дисперсності, хімічного і фазового складу, електричних характеристик тощо) на підприємствах металургійної промисловості застосовують пиловловлювачі різних конструкцій [22, 23].

Основні фізичні принципи виділення (сепарації) частинок пилу із запиленого газового потоку представлено на рис.1.1.

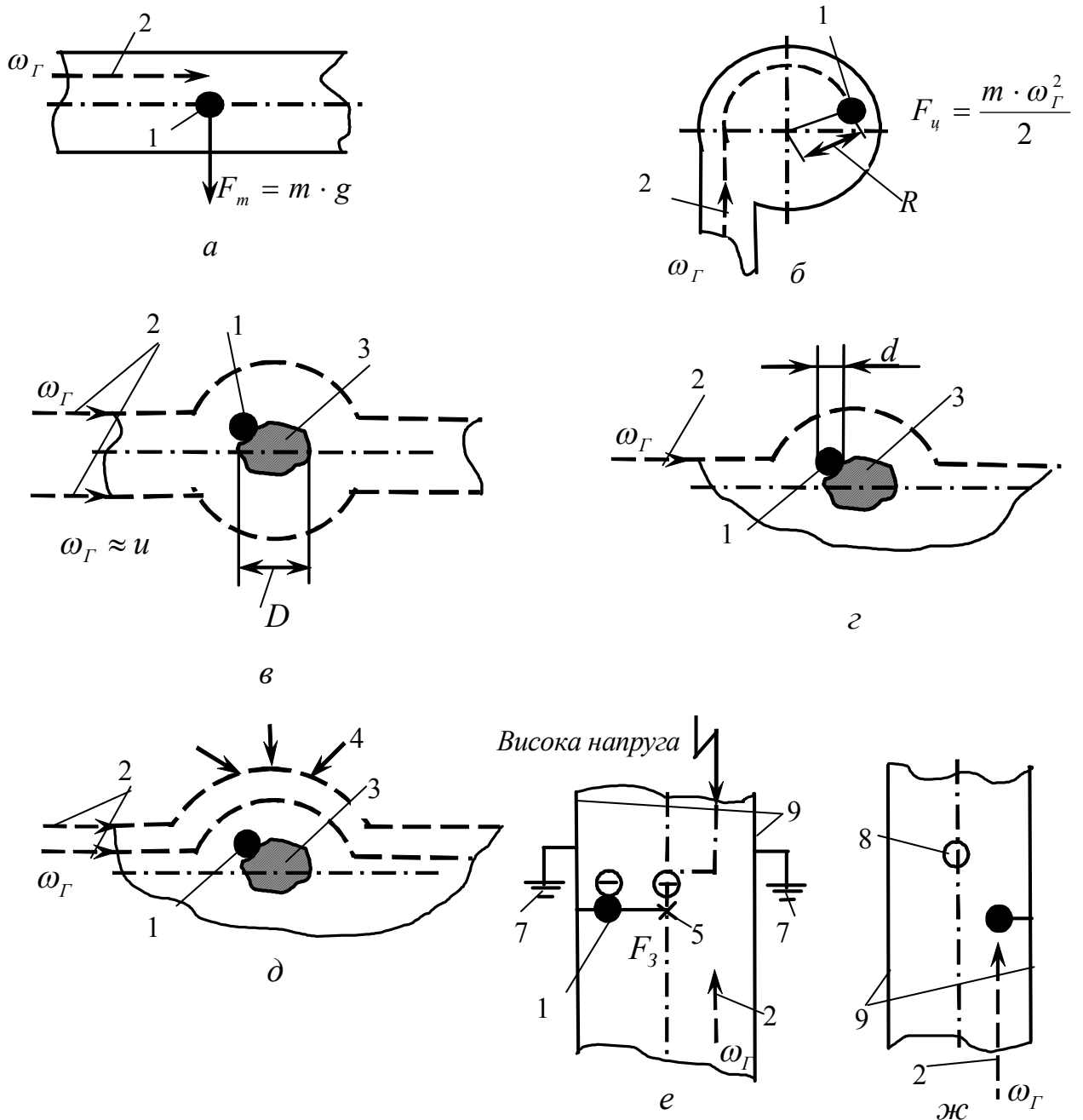


Рис. 1.1. Схеми фізичних механізмів виділення частинок пилу із запылених газових потоків (R – радіус циклона; F – сила):

a – під дією сили ваги; $б$ – під дією відцентрової сили; $в$ – зіткнення частинки з тілом осадження (інерційний удар); $г$ – пряме осадження; $д$ – дифузійне осадження; $е$ – електростатичне осадження; $ж$ – термопреципітація: 1 – частинки пилу; 2 – напрямок газового потоку; 3 – тіло осадження; 4 – сили дифузії; 5 – коронуючий електрод негативної полярності; 6 – осаджувальний електрод; 7 – земля; 8 – нагріте тіло; 9 – холодна поверхня

Слід зазначити класичні роботи Н.Е. Жуковського і С.Л. Чаплигіна по теорії сніжних заметів; роботи Б.В. Дерягіна та ін. по явищу відбиття при зіткненнях між водяними краплями; дослідження П.В. Петрянова по коагуляції аерозолів; роботи В.И. Попкова, Н.А. Капцова, Б.Л. Шнеерсона, С.П. Жебровського, В.Н. Ужова й И.Ш. Плотинського в області електричного очищення газів; С.Н. Сиркіна і М.М. Зайцева по моделюванню циклонів; дослідження Л.П. Колмогорова та М.А. Леонтовича по теорії броунівського руху і дифузії часток; Н.А. Фукса в галузі механіки аерозолів; І.Є. Ідельчика по аеродинаміці газоочисних апаратів; П.А. Коузова по аналізу гранулометричного складу пилу і порошків [24]. Цікаві роботи в галузі газопиловловлювання виконані колективами інститутів НДІГАЗА, ВТІ, Гінколірмету і Гіредмету. Мокре електричне очищення повітря від пилу розроблено на початку тридцятих років групою інженерів під керівництвом В. Л. Шнеерсона.

Гази, які отримуються при металургійних процесах, містять ту або іншу кількість пилу, яка утворюється при подрібнюванні твердих тіл і при пересипанні й транспортуванні сипучих матеріалів, при цьому дрібні частинки матеріалів захоплюються і несуться потоком газу (повітрям). Самоподрібнювання матеріалу відбувається при транспортуванні його, при терті одного шматка матеріалу з іншим, при терті або стиканні шматків зі стінкою апаратів та інших процесах [25].

Підвищення температури при деяких процесах може сприяти пилоутворенню внаслідок, з одного боку, зменшення зчеплення між окремими частинками сипучих матеріалів, а з іншого боку, в результаті значного і швидкого збільшення об'єму газу, а отже, різкого збільшення швидкості його руху, що часто спостерігається при вибухах.

Аерозолі, що утворилися в металургійній галузі, зазвичай містять частинки як розміром меншим за $1,0 \cdot 10^{-6}$ м, так і розміром більшим за $(5-10) \cdot 10^{-6}$ м, тобто вони є полідисперсними [26].

Більшість аерозолів хитливі, тобто згодом змінюється число й маса частинок в одиниці об'єму газу, що пояснюється наступними причинами. Великі частинки

під впливом сили ваги випадають із потоку на дно апарата, в якому вони перебувають, або навіть виносяться з потоку під дією відцентрових (інерційних) сил. Найбільш дрібні частинки рухаються не тільки в результаті поступального руху газового потоку, але й під дією броунівського руху, тобто ударів молекул, які утворюються при турбулентному русі газового потоку. У цих двох випадках дрібні частинки будуть рухатися не паралельно напрямку газового потоку і не паралельно одна до одної, а вони можуть зіштовхуватися між собою й зі стінками апарата. При зіткненні зі стінками частинки прилипають до них, а при зіткненні одна з одною злипаються, тобто коагулюють [27, 28].

1.3. Способи й апаратура пиловловлювання, які застосовуються на металургійних підприємствах

Аналіз розвитку цехового транспорту з переробної промисловості металургії дозволяє зробити висновок, що в загальному обсязі всіх видів зросла роль конвеєрного транспорту, який є найбільш продуктивним видом безперервного процесу і характеризується централізованим автоматичним керуванням, простотою обслуговування й малою витратою на експлуатацію, але його робота супроводжується виділенням значної кількості пилу, який забруднює навколишнє середовище [29, 30].

До інтенсивних джерел пиловиділення у металургійній галузі в першу чергу відносяться перевантажувальні пункти, кількість яких збільшується прямо пропорційно збільшенню довжини конвеєрних ліній, а при цьому значно зростає і пилоутворення. Боротьба з пилом на них здійснюється різними способами: гідрообезпиленням, зрошенням; пилоподавленням з піною; електро- і магніто осадженням; сухим і комбінованим обезпилюванням. Одним із найпоширеніших способів пилоподавлення на перевантажувальних пунктах металургійних підприємств є зрошення, яке легко може бути здійснене при виконанні всіх операцій, пов'язаних з утворенням пилу, ефективність якого при постійній експлуатації на практиці становить 50 – 70% [31, 32]. Експериментальні дані

показують, що при зрошенні практично не вловлюються дрібнодисперсні та найбільш пневмоконіозонебезпечні фракції пилу ($< 10 \cdot 10^{-6}$ м).

Пилоподавлювання піною також забезпечує невисоку ефективність процесу і потребує певної кількості води і хімічних речовин, і також не може вловити дрібнодисперсний пил. Недоліком мокрого способу обезпилювання є організація шламового господарства й великі витрати води, які ведуть до виникнення нової проблеми – її очистки, і це при тому, що в районах Донецького басейну спостерігається гострий її дефіцит.

Електро- та магнітоосадження дозволяє очищувати повітря від дрібнодисперсних фракцій досить ефективно, але при цьому є дуже енерго- та металоємкісне [33].

Найбільш доступним, ефективним і поширеним методом є спосіб сухого пилоподавлення при якому застосовується велика кількість апаратів, що відрізняються один від одного як за принципом дії, так і за конструктивним виконанням.

На підставі аналізу літературних джерел і патентних досліджень розглянемо найбільш поширені в даний час у металургійній галузі апарати обезпилювання сухим способом. Відповідно до ДСТУ 12.2.043–80 "Обладнання пиловловлююче. Класифікація" пиловловлювачі діляться на дві категорії: апарати без застосування рідини і з її застосуванням.

У відцентрових пиловловлювачах для осадження частинок пилу використовується відцентрова сила (циклони, жалюзійні, ротаційні, вихрові та динамічні апарати) і вони, завдяки простоті конструкції та обслуговування, невисокій вартості, порівняно невеликому опору та високій продуктивності, є найпоширенішими типами сухого пиловловлювання.

На рис. 1.2 схематично представлені основні види конструкцій циклонних пиловловлювачів, які відрізняються за способом підведення аеросуміші в апарат: із спіральним (рис. 1.2, а), тангенціальним звичайним (рис. 1.2, б), гвинтоподібним (рис. 1.2, в) і осьовим (рис. 1.2, г, д). Циклони з осьовим (розетковим) підведенням аеросуміші працюють як з поверненням аеросуміші у верхню частину апарата, так

і без нього (рис. 1.2, д). Останній тип (рис. 1.2, е) апаратів (прямоточні циклони) відрізняється низьким гідравлічним опором і меншою, у порівнянні з циклонами інших типів, ефективністю пиловловлювання, а також необхідністю відсосу частини аеросуміші через бункер, а це сприяє його абразивному зношуванню. Найбільш кращим за формою, з погляду аеродинаміки, є підведення аеросуміші по спіралі, однак на практиці всі способи підведення можуть застосовуватися з рівною ефективністю [34, 35].

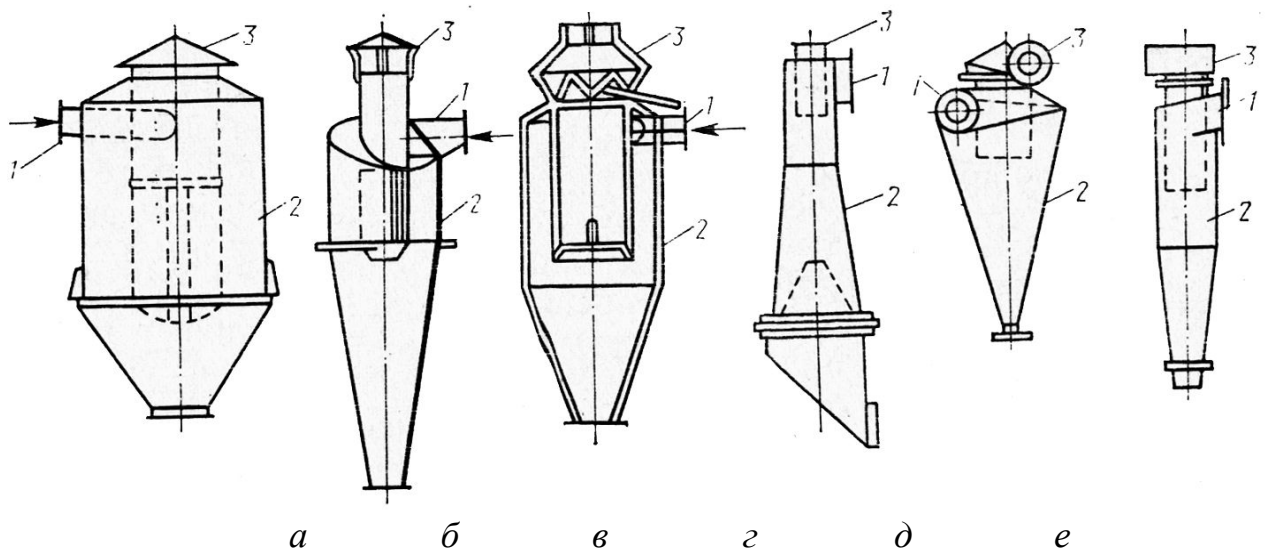


Рис. 1.2. Відцентрові пиловловлювачі:

а – „Гіпродрева“; б – „Гіпродревпрома“; в – типу „К“; г – „ВНДІОПа“; д – „СІОПа“; е – „НДІОгазу“; 1– вхідний патрубок; 2 – корпус; 3 – вихідний патрубок

Рух аеросуміші в циклоні носить досить складний характер і, незважаючи на велику кількість теоретичних робіт, вивчений ще недостатньо. Циклонні пиловловлювачі мають наступні переваги: відсутність рухомих частин в апараті; простота виготовлення; майже постійний гідравлічний опір; можливе вловлювання абразивних матеріалів при захисті внутрішніх поверхонь спеціальними покриттями; успішно працюють при високих тисках [36, 37]. Поряд із цим слід мати на увазі, що гідравлічний опір високоефективних циклонів досягає 1250 – 1500 Па, а частинки розміром меншими за $10 \cdot 10^{-6}$ м при цьому

вловлюються недостатньо.

Найбільше поширення в системах газоочищення та аспірації на металургійних підприємствах одержали циклони НДІОгазу й СІОП. Циклони НДІОгазу підрозділяються на підгрупи: циліндричні й конічні (рис. 1.3).

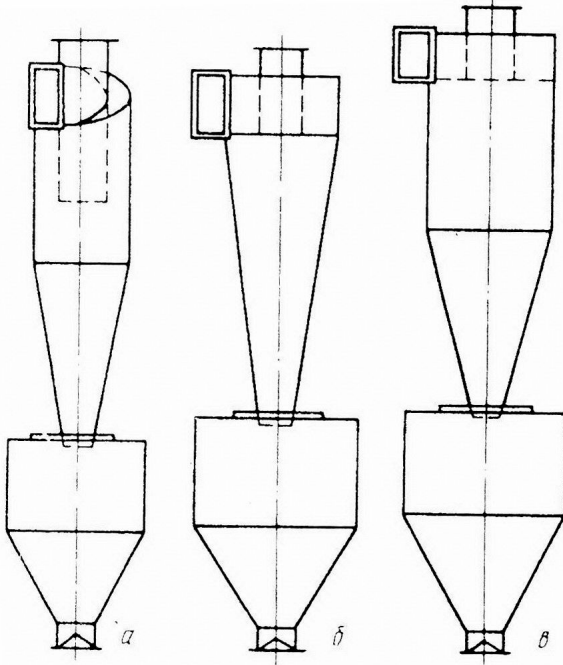


Рис. 1.3. Конструкції циклонів:
а) ЦН, б) СДК-ЦН-33, в) СЦН-40

Циліндричні (рис. 1.3, а) високо продуктивні циклони залежно від кута нахилу гвинтової кришки корпусу до горизонталі бувають чотирьох типів: ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15В, ЦН-24 (ЦН – циклон НДІОгазу, цифра – кут нахилу в градусах, В – вкорочений). Чим менший кут нахилу кришки, тим вища ступінь очищення й гідравлічний опір циклона, тому циклони ЦН-24, зазвичай, застосовуються для попереднього очищення або вловлення грубих частинок, циклони ЦН-11 придатні для ефективного

вловлювання більш дрібних частинок, але при підвищеному в порівнянні з ЦН-24 опорі.

Таблиця 1.2

Порівняльні характеристики циклонів

	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15В	ЦН-24
1	2	3	4	5
d_{50} , мкм	3,65	4,50	6,00	8,50
ξ	245	155	65	75

Більш конкретну оцінку для порівняння циклонів ЦН можна одержати при розгляді їх розрахункових характеристик [38 – 41], до яких відносяться

експериментальні величини: d_{50} – розмір частинок, що вловлюються в циклоні даного типу з ефективністю 50%; ξ – коефіцієнт гідравлічного опору циклона без додаткових пристроїв (табл. 1.2).

Конічні, або високоефективні циклони поділяються на: СК–ЦН–34 і СК–ЦН–22, де С – наявність спірального вхідного патрубку («равлика»), Д – довгоконічні, К – конічні, цифра – відношення діаметру вихлопної труби до діаметру циліндричної частини корпусу. Порівняння їх характеристик показує, що найбільш ефективним є циклон СК–ЦН–22, але при цьому втрати тиску в ньому надзвичайно великі. Так, при вловлюванні дрібнодисперсного пилу шихти ступінь очищення в циклоні СК–ЦН–22 діаметром 0,2 м становить 97,9 – 99,7%, однак втрати тиску при цьому досягають 8,1 – 8,9 кПа. Недоліком такого варіанту є деяке збільшення габаритів і металоємності циклона.

Таблиця 1.3

Порівняльні характеристики конічних циклонів НДЮгазу

	СДК–ЦН–33	СК–ЦН–34	СК–ЦН–22
$d_{50}, 10^{-6}\text{м}$	2,31	1,95	1,13
ξ	520	1050	7ЛОП

Циклон СДК–ЦН–33 діаметром 2 м при вловлюванні пилу шихти ($d_{\text{ш}} = 120 \cdot 10^{-6}$ м) має ступінь очищення 92,5 – 93,8 %, при опорі 1,8 кПа. Останнім часом у промисловості стали застосовувати нові високоефективні циклони, що відрізняються від конічних наявністю циліндричної частини корпусу. Одна з таких конструкцій циклон СЦН–40 (рис. 1.3, в) при вловлюванні пилу щільністю 27000 кг/м^3 і $d_{\text{м}} \sim 20 \cdot 10^{-6}$ м з газів має ступінь очищення 93% і гідравлічний опір 1,1 – 1,9 кПа. За даними НДЮгазу, у цього циклона $d_{50} = 1,0 \cdot 10^{-6}$ м, $\xi = 1150$.

Циклони типу ЦН піддуться абразивному зношуванню, тому при вловлюванні, наприклад, пилу шихти, їх необхідно футерувати. Конічні циклони більш стійкі до абразивного зношування, оскільки швидкості

пилогазового потоку в 1,5 – 2,0 раза менші, ніж у ЦН. З урахуванням того, що величина абразивного зношування залежить від швидкості частинок, абразивне зношування конічних циклонів у 3,5 – 8,0 раза менше, ніж у ЦН.

Особливістю застосування конічних циклонів є складність їх компонування в групи, що пов'язано з підвищеним гідравлічним опором цих апаратів і обумовленою цим неможливістю рівномірного розподілу пилогазового потоку по елементам групи [42, 43]. Виходячи із цього навіть при великій продуктивності за повітрям ці циклони застосовують в одиночному виконанні.

Останнім часом стереотипний підхід до залежності ступеня очищення від діаметра циклона змінився. Відомо, що чим більший діаметр циліндричної частини циклона, тим більший шлях повинна пройти частинка в процесі її виділення з газу, тим менша величина відцентрової сили, яка відкидає частинку пилу до стінок циклона, і, отже, меншою буде ступінь очищення. Однак недоліки групового виконання, які пов'язані з нерівномірним розподілом газу по елементах, наявністю перетікань газу між елементами через загальний бункер, здатні значно зменшити ступінь очищення.

З урахуванням підвищеної металоємності, трудомісткості виготовлення й більшої площі, яку займають групові циклони, при практично однаковому ступені очищення перевага повинна бути віддана одиночним циклонам великого діаметру, проте це пов'язане з певними труднощами забезпечення міцності корпусу при дії значних перепадів тиску.

Для вловлювання пилу шихти успішно використовуються одиночні циклони типу ЦП–1 і ЦП–2 (рис. 1.4, а), ступінь очищення в яких досягає 85 % при початковій запиленості $\sim 200 \text{ г/м}^3$. Таким чином, принциповий підхід до застосування одиночних циклонів великого діаметру отримує все більше поширення. Батарейні циклони, які в основному застосовуються на заводах Донбасу, малоефективні, а ступінь очищення в них не перевищує 35 – 55 %. Ступінь очищення аспіраційного повітря від пилу шихти в апараті БПР–75 становить 98 %.

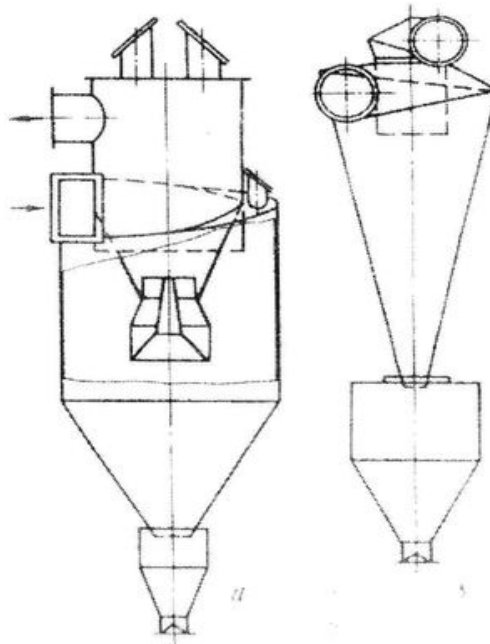


Рис. 1.4. Конструкції циклонів:
а) ЦП-1 , б) СІОП

На деяких вуглепереробних підприємствах успішно експлуатуються циклони СІОП, які відрізняються (див. рис. 1.4, б) корпусом конічної форми, кришкою корпусу у вигляді гвинтоподібної спіралі й вхідним патрубком трикутної форми. Трикутна форма вхідного отвору при гвинтовій кришці є найбільш доцільною, оскільки дозволяє наблизити потік повітря до внутрішньої стінки корпусу циклона й тим самим поліпшити ступінь очищення. При установці циклона на лінії всмоктування вивід газопилового потоку виконується через розкручувач із гвинтовою кришкою. Медіанний діаметр частинок, які вловлюються в циклонах цього типу $d_{50} = 2,6 \cdot 10^{-6}$ м, коефіцієнт гідравлічного опору $\xi = 1400$ [44 – 46]. Фактичний ступінь вловлювання дрібнодисперсного пилу шихти невеликої концентрації (100 – 300 мг/м³), становить 70 – 84 %.

1.4. Вплив різних факторів на вловлювання пилу в циклонах

Складність процесу вловлювання пилу в циклонах не дозволяє розраховувати їх конструкції і ефективність експлуатації тільки на основі теоретичних розробок, що пояснюється тим, що аеродинаміка процесу складна, і тому в теоретичних положеннях допускається ряд спрощень, у результаті яких розрахункові дані не збігаються з даними, отриманими на практиці. У той же час за допомогою теоретичних положень можна виявити вплив різних факторів на процес уловлювання пилу в циклонах [47, 48].

При визначенні теоретичної залежності руху частинки пилу в циклоні в напрямку до зовнішніх стінок розглядають дві сили, що діють на частинку пилу:

відцентрову силу

$$F_{Ц} = \frac{m \cdot \omega^2}{R}, \quad (1.1)$$

і силу опору середовища

$$F = 3 \cdot \pi \cdot \omega_p \cdot d \cdot \mu, \quad (1.2)$$

де ω – швидкість газового потоку у вхідному газоході, яка дорівнює швидкості газів і частинок у циклоні в тангенціальному напрямку, м/с; ω_p – швидкість руху частинки по напрямку від центра обертання (від осі) до зовнішньої стінки циклона, тобто по радіусу, м/с; R – радіус циклона, м; m – маса кульової частинки, яка дорівнює $\frac{\pi \cdot d^3 \cdot \rho}{6}$, кг; d – діаметр частинки, м; ρ – щільність частинки, кг/м³; μ – в'язкість газів, Па·с.

При вході в циклон швидкість $\omega_p = 0$, але при просуванні газового потоку ω_p зростає і через декілька сотих секунди вона стає настільки великою, що сили

$F_{Ц}$ і F зрівнюються, тобто $\frac{m \cdot \omega^2}{R} = 3 \cdot \pi \cdot \omega_p \cdot d \cdot \mu$, і подальший рух частинок у

радіальному напрямку буде проходити по інерції з постійною швидкістю:

$$\omega_p = \frac{m \cdot \omega^2}{3 \cdot \pi \cdot \omega_p \cdot d \cdot \mu} = \frac{d^2 \cdot \omega^2 \cdot \rho}{18R \cdot \mu}. \quad (1.3)$$

Найбільш довгий шлях у радіальному напрямку пройде та частинка, що при вході в циклон перебувала біля внутрішньої (вихідної) труби. Цей шлях дорівнює $R_2 - R_1$. Час, який потрібний для того, щоб частинка встигла його пройти, становить:

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{\omega_p}, \quad (1.4)$$

де R_1 – радіус патрубка для виходу пилу, м; R_2 – відстань від центру обертання газового потоку (осі циклона) до частинки, м.

У виразі (1.4) величина R – змінна і в середньому її можна прийняти рівною $\frac{R_1 + R_2}{2}$. Підставивши у формулу (1.4) значення ω_p , знайдемо:

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{\omega_p} = \frac{18 \cdot (R_2 - R_1) \cdot (R_2 - R_1) \cdot \mu}{2 \cdot \omega^2 \cdot d^2 \cdot \rho} = \frac{9 \cdot \mu \cdot (R_2^2 - R_1^2)}{\omega^2 \cdot d^2 \cdot \rho}. \quad (1.5)$$

По цій же формулі можна знайти розмір найменших частинок, які встигають пройти шлях $R_2 - R_1$ за час проходження циклона газовим потоком, тобто за час τ перебування частинки в циклоні:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot (R_2^2 - R_1^2)}{\rho \cdot \omega^2 \cdot \tau}} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot (R_2^2 - R_1^2)}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \omega \cdot R \cdot n}} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot (R_2 - R_1)}{\pi \cdot \rho \cdot n}}, \quad (1.6)$$

де n – число кіл (оборотів), що робить газовий потік у циклоні (часто його вважають таким, що дорівнює 2), об/хв.

Розглянемо вплив різних факторів на ступінь уловлювання пилу в циклоні.

1. З підвищенням швидкості газового потоку ω поліпшується вловлювання пилу в циклоні. Однак при великих швидкостях зростання коефіцієнту корисної дії циклона сповільнюється, а при переході деякої межі, що залежить від конструкції циклона і дисперсного складу пилу, який вловлюється, починає навіть знижуватися. Найбільш ефективні швидкості входу газу в циклон коливаються в межах від 20 до 25 м/с, але становлять не менше 15 м/с [49].

2. Великодисперсні частинки пилу осаджуються швидше, причому збільшення густини речовини частинок ρ також прискорює їх уловлювання.

3. При зменшенні $R_2 - R_1$ скорочується шлях, який проходить частинка, отже, полегшується її осадження. Однак, якщо величина $R_2 - R_1$ буде дуже малою, то можливе забивання пилом вхідного патрубку, що варто мати на увазі в тих випадках, коли пил схильний до злипання, прилипання до стінок і коли концентрація пилу в газовому потоці значна. Якщо величина $R_2 - R_1$ залишається постійною, і ростуть абсолютні значення R_2 і R_1 , то зростає їх сума $R_2 + R_1$ і осадження пилу уповільнюється. Звідси виходить, що при збільшенні діаметру циклона погіршується його коефіцієнт корисної дії. Для одержання високої ефективності вловлювання пилу краще застосовувати циклони малого діаметру, але це призводить або до значного збільшення швидкості газу, що не завжди припустимо, або до необхідності пропускання газу через декілька паралельно встановлених циклонів [50].

4. В'язкість газу збільшується при підвищенні температури, що знижує ефективність уловлення пилу в циклоні.

При розгляді процесів, що проходять у циклоні [51, 52] враховується, що дрібні частинки пилу в тому або іншому ступені коагулюються в аерозолі як до входу газового потоку в циклон, так і в самому циклоні, а це призводить до збільшення розміру частинок, але і до зменшення їх щільності.

При розгляді роботи циклонів [53] варто враховувати їх гідравлічний опір ΔP , Н/м², який визначається за формулою:

$$\Delta P = \xi' \cdot \frac{\omega_{\text{вх}} \cdot \rho}{2} = \xi' \cdot \frac{\omega_{\text{вх}} \cdot \rho}{2 \cdot 9,81}, \quad (1.7)$$

де ρ – щільність газового середовища (в робочих умовах), кг/м³; $\omega_{\text{вх}}$ – швидкість газу у вхідному патрубку, м/с; ξ' – коефіцієнт гідравлічного опору.

При встановленні циклонів у вигляді груп (батареї) коефіцієнт гідравлічного опору зростає приблизно на 10%.

Значення коефіцієнтів гідравлічного опору для деяких типів циклонів

Тип циклона (діаметр, мм)	Без равлика ξ'/ξ	З равликом на вихлопній трубі ξ'/ξ
1	2	3
ЦН-11 (450)	6,1/250	5,2/210
ЦН-15 (450)	7,6/160	6,7/140
ЦН-15В (450)	8,2/170	7,5/160
ЦН-24 (450)	10,9/80	12,5/90
СЮП	6,0/-	4,2/-
ВЦНДЮП (370)	9,3/-	10,4/-
ЛЮП (700)	4,2/460	3,7/411
СДК-ЦН-33 (450)	20,3/600	31,3/980
СК-ЦН-34 (450)	24,9/1270	30,3/1540

Часто величину гідравлічного опору циклона ΔP_1 , Н/м², визначають як функцію умовної швидкості газу, віднесеної до площі всього перетину циліндра циклона $\omega_{ум}$:

$$\Delta P_1 = \xi \cdot \frac{\omega_{ум}^2 \cdot \rho}{2}. \quad (1.8)$$

Для визначення ефективності циклонів необхідно знати опір обраного циклона, дисперсний склад і щільність матеріалу пилових частинок.

1.5. Області застосування циклонів і батарейних циклонів, їх переваги і недоліки

Пил, що утворюється у металургії, містить, як правило, частинки розміром $10 \cdot 10^{-6}$ м і менші. Тому в циклонах і батарейних циклонах навіть найбільш новітніх конструкцій і найменших діаметрів не може бути забезпечене досить повне вловлювання подібнодисперсного пилу (вловлюється менше 50%). В умовах очищення газів металургійної промисловості циклони і батарейні циклони доцільно в деяких випадках застосовувати для відділення пилу великих розмірів [54], а потім остаточно вловлювати дрібнодисперсний пил в

рукавних фільтрах, електрофільтрах і інших пиловловлювачах, призначених для тонкого очищення газів, тоді можна досягти 90% і вищу ступінь очищення.

Дані, представлені в табл. 1.5, дають можливість орієнтовно порівняти ступені вловлювання різних фракцій пилу в циклонах НДІОГАЗ і в циклонних елементах БЦ різних діаметрів [55, 56] (при складанні таблиці прийнято, що щільність пилу дорівнює $2,3 \text{ г/см}^3$; відношення $\frac{\Delta P}{\rho_g} = 75$).

Таблиця 1.5

Наближені значення ступеня вловлювання різних фракцій пилу в циклонах НДІОГАЗ і в циклонних елементах БЦ

Циклон або циклонний елемент	Діаметр, мм	Ступінь уловлювання, %, при умовному діаметрі частинки пилу, 10^{-6} м		
		5	10	15
1	2	3	4	5
ЦН-15	800	50	85	97,5
	600	55	87	98
	400	69	89	98,5
ЦН-15у	800	40	81	97
ЦН-24	1000	30	70	96
ЦН-11	500	41	79	97
	800	65	90	98
БЦ із гвинтом	250	63	78	91
БЦ із розеткою	250	72	84	93
	150	78	88	95
	100	82	91	96

Незважаючи на досить велику номенклатуру сухих пиловловлювачів велике поширення до цього часу мають мокрі пиловловлювачі. З досвіду металургійної промисловості мокрі апарати найбільш часто застосовуються для обезпилювання аспіраційного повітря [57], хоча останнім часом, так само як і в інших галузях і з урахуванням загальної тенденції в техніці пиловловлювання, ведеться інтенсивна розробка сухих пиловловлювачів.

Пиловловлювачі вентиляційні мокрі ПВМ (рис. 1.5) відносяться до скрубєрів ударно-інерційної дії і є найпоширенішим серед вітчизняних апаратів цього типу, які іноді називають апаратами із внутрішньою циркуляцією рідини.

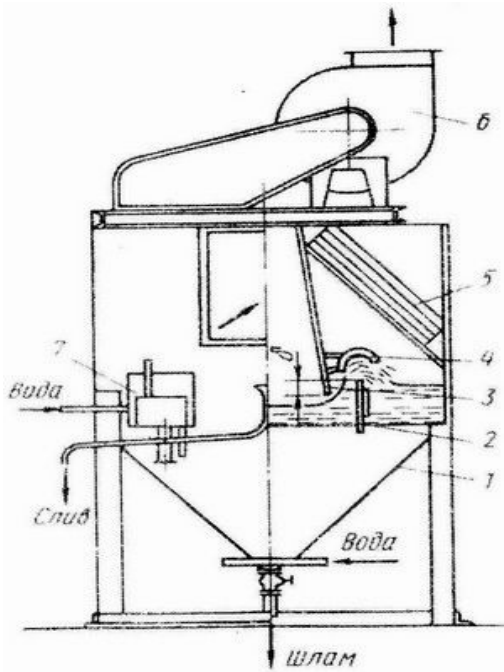


Рис. 1.5. Скрубер ударно-інерційної дії типу ПВМ

Контакт частинок з рідиною в них відбувається при ударі пилогазового потоку об поверхню рідини й подальшому проходженні газорідинної суміші через щілинні пристрої різної конфігурації. Перевагою апаратів із внутрішньою циркуляцією є відсутність засобів постійної подачі рідини для зрошення, адже енергія, яка необхідна для створення поверхні контакту, підводиться через газовий потік.

Швидкість потоку в апаратах ПВМ, зазвичай, задають в інтервалі 30 – 50 м/с, розмір щілини δ залежно від розміру частинок, які вловлюються, від $20 \cdot 10^{-6}$ м до $200 \cdot 10^{-6}$ м, гідравлічний опір апарата в межах 0,9 – 2,7 кПа. У зв'язку з найменшою питомою витратою води ($0,005 - 0,08$ л/м³) пиловловлювачі ударно-інерційної дії мають найкращі перспективи застосування порівнянню з іншими мокрими апаратами.

1.6. Вирішення питання очищення повітря від пилу при його транспортуванні

До заходів, що забезпечують вимоги до стану повітря робочої зони виробничих приміщень [58, 59], виробничого устаткування і виробничих процесів, відносяться наступні:

- максимально можлива герметизація технологічного і транспортного устаткування, та створення спеціальних укриттів у всіх місцях пилоутворення;
- зволоження здрібнених матеріалів до надходження у виробництво і на кожній стадії переробки в межах, що допускаються технологічним процесом;

- забезпечення аспірації;
- блокування аспіраційних систем з технологічним устаткуванням і автоматизація пристроїв по зволоженню матеріалу і гідрознепилюванню;
- суворий контроль за станом повітря в цехах і в навколишньому середовищі, і виконанням усіх зазначених вище заходів.

У технологічній схемі виробничого процесу необхідно передбачати:

- меншу кількість проміжних вузлів і місць перевантажень матеріалу;
- мінімальну висоту перепадів у місцях перевантажень матеріалу (при високих перепадах необхідно передбачати спеціальні пристрої по гасінню кінетичної енергії падаючих матеріалів – рис. 1.6). Для запобігання запилення зворотної сторони транспортерної стрічки передбачаються пристрої, що забезпечують її очищення від матеріалу, що пристав;

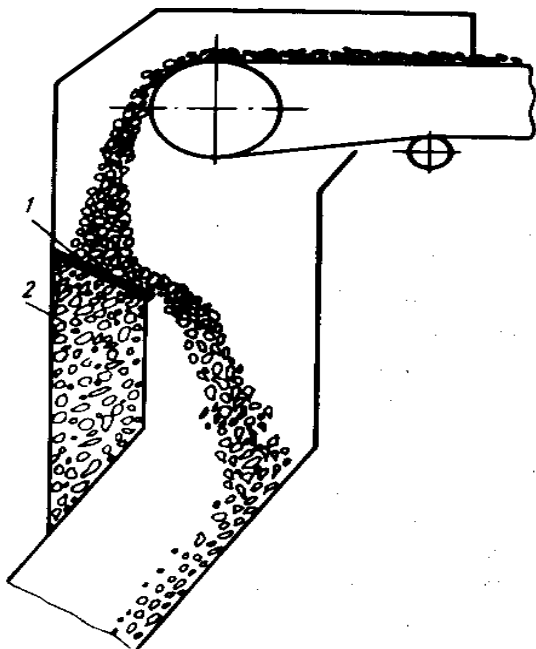


Рис. 1.6. Зниження кінетичної енергії падаючого матеріалу:
1 – відбійна плита; 2 – породна подушка

- скорочення до мінімуму кількості переміщень матеріалів по горизонталі, застосування герметичного устаткування;
- застосування пневматичного чи іншого видів закритого транспорту (шнеки, віброконвеєри, цілком укриті конвеєри тощо).

На рис. 1.7 показана одна з можливих схем очищення стрічки.

Робочим елементом пристрою є металеві шкребки, виготовлені з листової сталі товщиною $6 \cdot 10^{-3}$ м, що

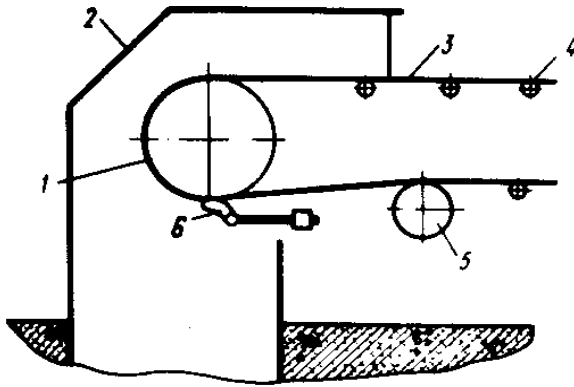


Рис. 1.7. Схема очищення конвеєрної стрічки: 1 – привідний барабан; 2 – укриття приводного барабана; 3 – конвеєрна стрічка; 4, 6 – роликові опори; 5 – відхиляючий барабан. Очищуючий пристрій розташовується безносе-редньо під приводним барабаном, де конвеєрна стрічка рівна і не вібрує.

Швидкості стрічкових конвеєрів не повинні перевищувати наступних меж при транспортуванні: кускових матеріалів – 1,6 м/с, зернистих (розміром до $(3-4) \cdot 10^{-6}$ м) – 0,5 – 1 м/с, мелених (розміром $0,5 \cdot 10^{-6}$ м) – 0,6 м/с. Бункера варто обладнати пристроями, що виключають їх переповнення і повне спорожнювання. Залишковий шар матеріалу в бункері повинен складати по висоті не менше $1/3$ нижньої частини бункера, що звужується, для запобігання надходження запиленого повітря в приміщення через живильники чи при завантаженні бункера.

Електропилоосаджуючий пристрій перевантажувального пункту (рис. 1.8) містить у собі укриття 1 перевантажувального пункту, в задній торцевій стінці якого виконані щілинні отвори 2 для підсмоктування повітря, усередині укриття закріплений ежектор 3 і жалюзі 4, що перенаправляють пилову хмару на матеріал, який падає. Ежектор 3 представляє собою систему коронуючих електродів 5 у вигляді осаджуючих пластин і коронуючих електродів 6. Некоронуючі електроди 7 є закріпленими на нерухомих осях рамами пластини, а коронуючі електроди – голчасті електроди, які закріплені на жорсткій рамі. Коронуючі електроди встановлені з можливістю зворотньо-поступального переміщення в горизонтальній площині, а осаджуючі пластини 7 – з

приварені до труби діаметром $6 \cdot 10^{-2}$ м.

До стрічки, що очищається, шкребки притискаються за допомогою противаги.

можливістю обертання відносно нерухомої осі.

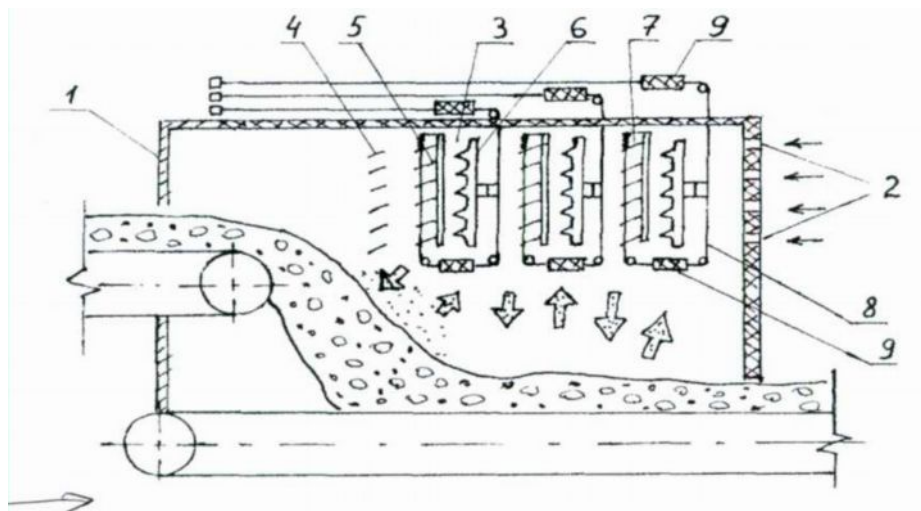


Рис. 1.8. Електроосаджувачий пристрій перевантажувального пункту:

1 – укриття; 2 – щілинні отвори; 3 – електроежектор; 4 – жалюзі; 5 – осаджуючі пластини; 6 – коронуючі електроди; 7 – пластини; 8 – пружинно-гнучкі зв'язки; 9 – ізолятори

Дані системи, завдяки пружинно-гнучких зв'язків 8 та ізоляторів 9 для виключення потрапляння високої напруги на корпус приводу, з'єднані з корпусом редуктора конвеєра. Повітря, яке ежекується через отвори 2, поступає в укриття 1, викликає розрідження верхньої частини, забезпечуючи тим самим постійну циркуляцію повітря в ньому. Запилене повітря без дії на нього якого-небудь збуджувача тяги залишається всередині укриття і пилові частинки не виносяться назовні.

При всіх технологічних процесах у металургійній галузі відбувається інтенсивне утворення пилу, концентрація якого значно перевищує гранично допустимі норми [60, 61]. Різноманіття конструктивних схем виконання установок обеспилювання залежить, насамперед, від застосування тих або інших механізмів відділення й осадження пилу в різних сполученнях, тому розглянемо найбільш поширені з них для вловлювання пилу на перевантажувальних пунктах конвеєрних ліній [62].

На рис. 1.9 наведена конструкція пристрою з використанням аспірації та магнітоосадження пилу.

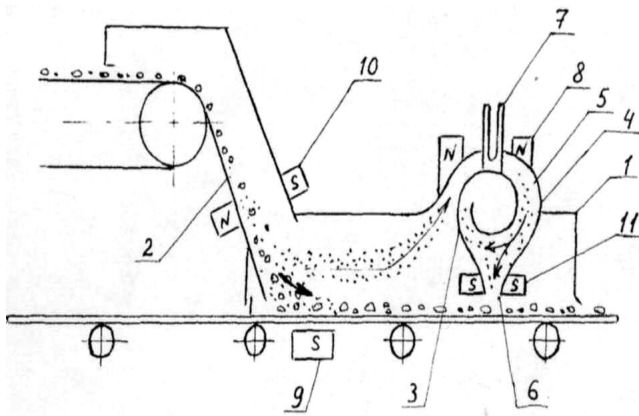


Рис. 1.9. Схема обезпилюючого аспіраційного пристрою з магнітоосадженням:

1 – аспіраційне укриття; 2 – тичка; 3 – внутрішня спіраль; 4 – аспіраційний патрубок; 5 – аеродинамічний канал; 6 – звуження; 7 – гвинтова тяга; 8 – 11 – магніти

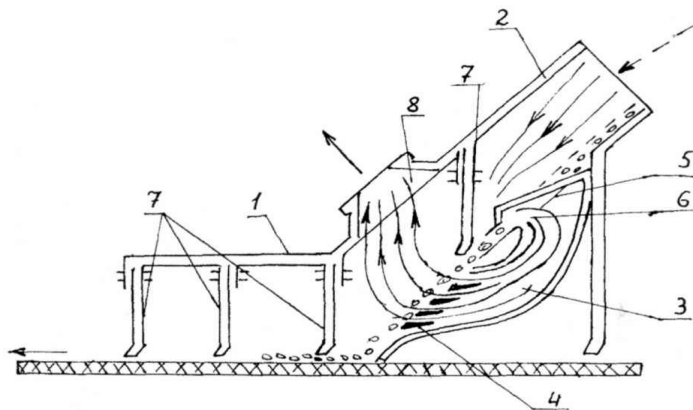


Рис. 1.10. Установка із застосуванням аспірації та обвідного каналу:

1 – нижнє укриття; 2 – канал-тичка; 3 – обвідний канал; 4 – похила решітка; 5 – повітроприймачі-розсікачі; 6 – повітроприймальні отвори; 7 – клапани; 8 – аспіраційний патрубок

що по розвантажувальному перерізу тички перед клапаном 7 виникає надлишковий тиск, під дією якого створюється розрідження в обвідному каналі 3 за рахунок аспірації, ежектоване матеріалом повітря надходить у повітроприймач-розсікач 5, через повітроприймальні отвори 6 і потім,

При проходженні пилового потоку в зоні магнітного поля магнітів 10 частинки пилу намагнічуються й набувають певного заряду. Частинки намагніченого пилу осідають під впливом протилежного знаку магнітного поля, яке створюється магнітом 9. За рахунок закручення й додаткового намагнічування за допомогою магніта 8 пил осаджується під впливом гравітаційно-інерційних сил і магніта 11. Не осаджений пил видаляється аспірацією.

На рис. 1.10 наведена обезпилююча установка перевантаження сипучих матеріалів з використанням аспірації й додаткового обвідного каналу.

Матеріал, який рухається по каналу-тички 2 нагнітає в неї повітря через що по розвантажувальному перерізу тички перед клапаном 7 виникає надлишковий тиск, під дією якого створюється розрідження в обвідному каналі 3 за рахунок аспірації, ежектоване матеріалом повітря надходить у повітроприймач-розсікач 5, через повітроприймальні отвори 6 і потім,

протікаючи через обвідний канал 3, продуває матеріал через решітку 4 і зсипає його на приймальний конвеєр.

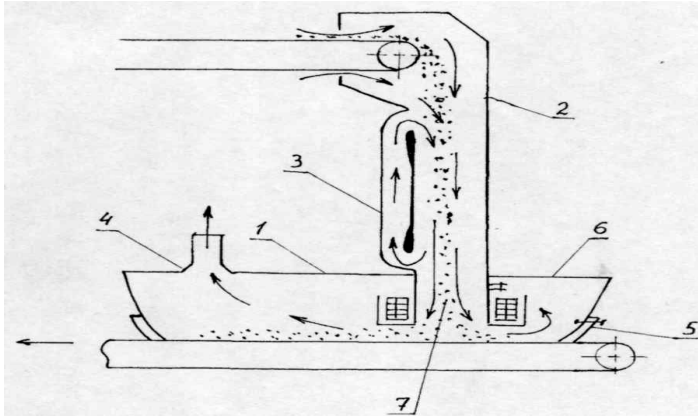


Рис. 1.11. Установа із застосуванням аспірації, обвідного каналу і магнітоосаджування: 1 – нижнє укриття; 2 – канал-тічка; 3 – обвідний канал; 4 – аспіраційний патрубок; 5 – ущільнюючі фартухи; 6 – магнітна система; 7 – камера

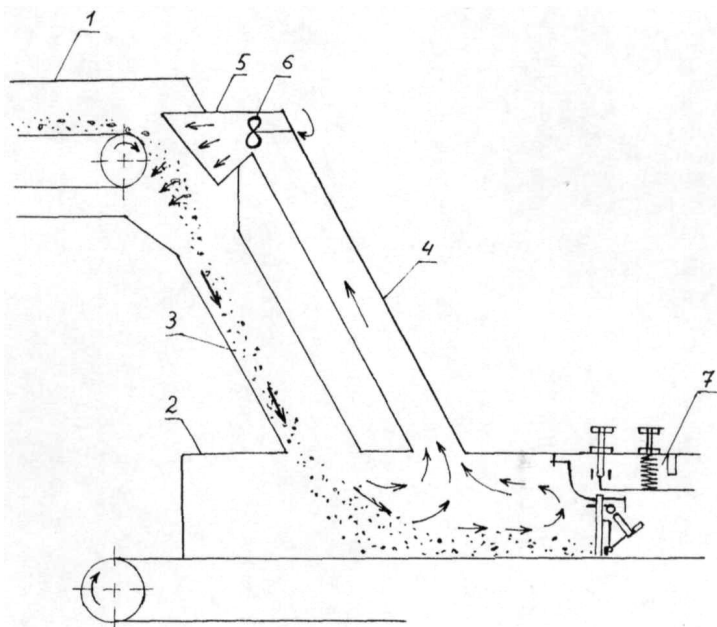


Рис. 1.12. Установа із обвідним каналом та вбудованим вентилятором: 1 – верхнє укриття; 2 – нижнє укриття; 3 – канал-тічка; 4 – обвідний канал; 5 – дифузор; 6 – вентилятор; 7 – механізм обезпилення

На рис. 1.11 наведено установа, яка включає аспірацію, обвідний канал і магнітоосадження.

Установа працює в такий спосіб. Сипучий матеріал по каналу-тічці 2 надходить у камеру 7, піддається впливу постійного магнітного поля замкнутої магнітної системи 6 і притягується до нижньої камери касет. Ежектоване матеріалом, який перевантажується, запилене повітря частково вибирається тягодутєвим засобом з камери 7, очищаючись від пилу, а частково по обвідному каналу 3, повертається в канал-тічку для повторної ежекції.

Установа дозволяє повернути в технологічний процес сировину, що скорочує обсяги повітря, яке відсмоктується, тим самим, зменшує винесення пилу в аспіраційну мережу.

На рис. 1.12 наведена

установка, яка включає обвідний канал із вбудованим вентилятором.

Матеріал, що перевантажується, з верхнього укриття 1 по каналу-тічці 3 надходить у нижнє укриття 2. Пилоповітряний потік ежектований матеріалом, який перевантажується, робить поворот у нижньому укритті, натикаючись на механізм обезпилення 7, частково обезпилюється і далі аспірується вентилятором 6 через обвідний канал 4 для повторної циркуляції.

До недоліків даної установки варто віднести: енергоємність; швидке зношування лопаток вентилятора; можливість нагромадження пилу до вибухонебезпечного стану; відсутність пилоосаджуючих і пиловловлюючих апаратів і провітрювання укриття.

Аналіз явищ, які відбуваються при перевантаженні сипучих матеріалів з конвеєра на конвеєр, показує, що перевантажується матеріал, який при своєму русі захоплює (ежектує) за собою навколишнє повітря [63]. Математичний опис ежекції повітря матеріалом, який перевантажується, носить емпіричний характер. Тому в кожному конкретному випадку потрібен свій підхід до визначення кількості ежектованого повітря, в якому утримується пил різних фракцій великої концентрації.

Технологічні схеми установок пиловловлювання перевантажувальних пунктах стрічкових конвеєрів із засобами сухого способу очистки повітря від пилу представлені на рис. 1.13 і 1.14. При недостатній висоті перевантажування від 0,8 і більше (рис. 1.13), вимагається додаткова енергія для руху аеросуміші, тому застосовують роторно-інерційний апарат, який дозволяє збільшити швидкість руху пилоповітряного потоку й створити розрідження в укритті пристрою. При висоті перевантаження 3 м та більше (рис. 1.14) найбільш раціональним апаратом уловлювання є відцентровий, принцип дії якого аналогічний роботі циклона, однак його конструктивні особливості, зокрема застосування додаткового електростатичного очищення шляхом намотування соленоїда на корпус апарата, дозволяють значно підвищити ефективність його роботи.

Ми розглянули найбільш ефективні установки для очищення повітря від

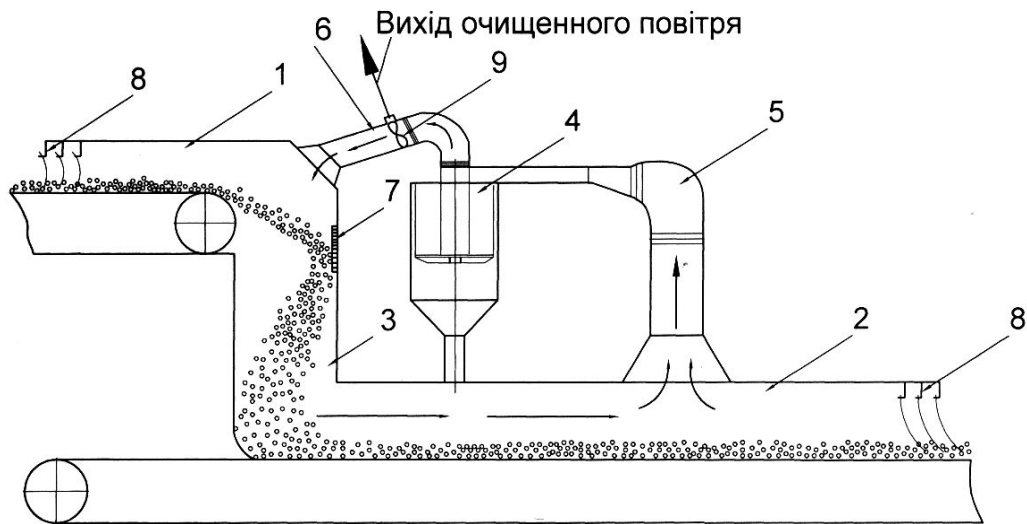


Рис. 1.13. Рециркуляційна установка знепилювання повітря з ротаційно-інерційним апаратом сухого способу вловлювання пилу:

1 – укриття верхнього конвеєра; 2 – укриття нижнього конвеєра; 3 – укриття каналу-тічки; 4 – ротаційно-інерційний апарат; 5 – повітропровід, який підводить; 6 – повітропровід, який відводить; 7 – відбійна плита; 8 – шлюзова камера; 9 – вентилятор

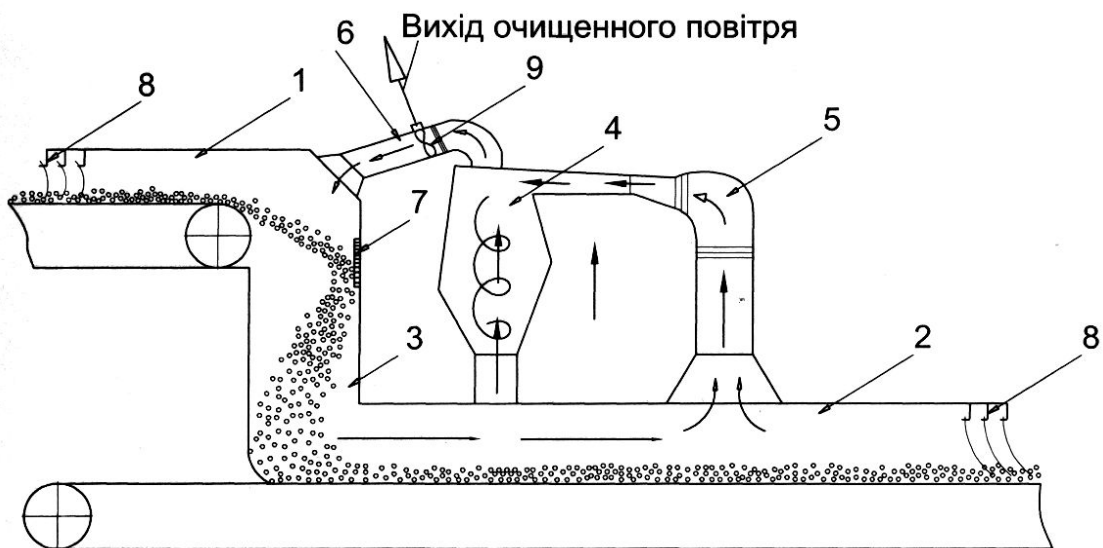


Рис. 1.14. Рециркуляційна установка знепилювання повітря з відцентровим апаратом сухого способу вловлювання пилу:

1 – укриття верхнього конвеєра; 2 – укриття нижнього конвеєра; 3 – укриття каналу-тічки; 4 – відцентровий апарат; 5 – повітропровід, який підводить; 6 – повітропровід, який відводить; 7 – відбійна плита; 8 – шлюзова камера; 9 – вентилятор

пилу при роботі конвеєрного транспорту, де пилоутворення найбільш інтенсивне. Наведені схеми знепилювання на пересипах конвеєрних лініях широко застосовуються при роботі металургійних комплексів, але ефективності пилоочищувальних апаратів, які входять до їх складу, недостатньо для досягнення вимог санітарно-гігієнічних норм, де граничнодопустима концентрація дорівнює – 6 мг/м^3 .

Тому автор роботи поставив завдання провести реконструкцію існуючої на даний час установки з метою зниження запиленості до допустимих меж, за рахунок підвищення ефективності роботи і зниження аеродинамічного опору пиловловлювачів, які використовуються для вловлювання пилу в процесах транспортування матеріалу на основі розроблення та впровадження високоефективного обладнання для очищення повітря від пилу.

1.7. Висновки

1. Досліджено рівень техногенної безпеки металургійних підприємств і доведено необхідність зменшення його концентрації до гранично допустимих норм.

2. Проаналізовані існуючі методи виділення частинок пилу з потоку, способи і апаратура пиловловлювання, які довели необхідність створення високоефективних апаратів для очищення повітря від дрібнодисперсного пилу.

3. Виявлено границі впливу різних факторів на процеси пиловловлювання з метою визначення області застосування існуючих сухих методів виділення пилу з потоку.

4. Проведений аналіз існуючих способів очищення повітря від пилу на пересипних ділянках, які застосовуються при транспортуванні шихти довів, що на даний час не існує апаратів здатних високоефективно вловлювати дрібнодисперсні фракції пилу і покращувати екологічну ситуацію на металургійних підприємствах, а це, у свою чергу, дозволило сформулювати мету і завдання досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Дослідними випробуваннями визначаємо:

- а) дисперсний склад пилу, який поступає в стенд, виноситься разом з очищеним повітрям і вловлюється пиловловлювачем;
- б) фізико-хімічні властивості пилу;
- в) морфометричні властивості пилу;
- г) залежність ефективності пиловловлювача від:
 - дисперсного складу пилу;
 - загальних витрат повітря, яке проходить через нього;
 - конструктивних розмірів пиловловлювачів;
 - конструктивних особливостей жалюзійних відокремлювачів;
- д) залежність гідравлічного опору пиловловлювача від загальних витрат повітря.

2.1. Методика і результати проведення досліджень фізико-хімічних властивостей експериментального пилу

Густина пилу визначали за допомогою пікнометра, виготовленого у відповідності з ГОСТ 7465–55 за формулою:

$$\rho_T = \frac{m_{\Pi}}{m_B + m_{\Pi} - m_{BT}}, \quad (2.1)$$

для чого визначали масу:

- пікнометра (m_B), який був заповнений дистильованою водою і місткість його складала 0,1 л;
- сухої наважки – m_{Π} (не більше $3 \cdot 10^{-6}$ кг);
- пилу m_{BT} , який витримували в ексікаторі разом з дистильованою водою

до встановлення їх постійної маси.

Для зменшення похибки було проведено два паралельні досліди, а одержані результати усереднені.

За результатами першого зважування:

- маса пікнометра, заповненого водою до мітки $m_2 = 129,5175 \cdot 10^{-3}$ кг;

- маса пікнометра, частково заповненого водою $m_4 = 62,3254 \cdot 10^{-3}$ кг;

- маса пікнометра з пилом, частково заповненого водою $m_5 = 66,6643 \cdot 10^{-3}$ кг;

- маса пікнометра з пилом, заповненого водою до мітки $m_7 = 132,1343 \cdot 10^{-3}$ кг.

Маса пилу:

$$m_{\pi} = m_5 - m_4 = (66,6643 - 62,3254) \cdot 10^{-3} = 4,3389 \cdot 10^{-3} \text{ кг} . \quad (2.2)$$

Густина пилу кварцу у воді при температурі $22,5^{\circ}\text{C}$:

$$\rho_1 = \frac{m_{\pi}}{m_{\pi} + m_2 - m_7} \rho_{H_2O} = \frac{4,3389}{4,3389 + 129,5175 - 132,1343} 999,7 = 2518,78 \text{ кг/м}^3. \quad (2.3)$$

За результатами другого зважування:

- маса пікнометра, заповненого водою до мітки $m_2 = 129,5175 \cdot 10^{-3}$ кг;

- маса пікнометра, частково заповненого водою $m_4 = 62,3254 \cdot 10^{-3}$ кг;

- маса пікнометра з пилом, частково заповненого водою $m_5 = 66,6423 \cdot 10^{-3}$ кг;

- маса пікнометра з пилом, заповненого водою до мітки $m_7 = 132,1123 \cdot 10^{-3}$ кг.

Маса пилу:

$$m_{\pi} = m_5 - m_4 = (66,6423 - 62,3254) \cdot 10^{-3} = 4,3169 \cdot 10^{-3} \text{ кг} . \quad (2.4)$$

Густина:

$$\rho_1 = \frac{m_{\pi}}{m_{\pi} + m_2 - m_7} \rho_{H_2O} = \frac{4,3169}{4,3169 + 129,5175 - 132,1123} 999,7 = 2506,01 \text{ кг/м}^3. \quad (2.5)$$

Отже після усереднення одержуємо значення густини пилоподібного кварцу КП-3:

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} = \frac{2518,78 + 2506,01}{2} = 2512,4 \text{ кг/м}^3. \quad (2.6)$$

Густина дистильованої води при температурі 22,5 °С складала 999,7 кг/м³.

Густину газу визначали за формулою:

$$\rho_{\Gamma} = \rho_0 \frac{t_0(p_0 - p)}{p_0(t_0 - t)}, \text{ кг/м}^3, \quad (2.7)$$

де ρ_0 , t_0 , p_0 – відповідно, густина, температура та тиск газів при нормальних умовах ($\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$; $t_0 = 273,15 \text{ °К}$; $p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па}$); t – дійсна температура газу, °С; p – тиск газів у газоході, Па.

2.2. Методи вибору проб та підготовки пилу до аналізу

При випробуваннях пиловловлювачів згідно “Єдиної методики” [64] використовується еталонний експериментальний пилоподібний кварц КП–3 ГОСТ 9077–59 Люберецького родовища. Для підвищення точності проби відбиралися в надлишковій кількості, перемішувалися і скорочувалися до потрібного об’єму методом квартування. Проби висушувалися у сушильній шафі при температурі 100 °С до постійної маси і зберігалися у ексикаторі з силікагелем. Підготовлену наважку використовували для аналізу дисперсного складу пилу.

2.3. Визначення питомої поверхні проб пилу та виділення фракцій з необхідним розміром частинок

Питому поверхню пилу визначали приладом ПСХ – 2 [65], результати визначень наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Питома поверхня експериментального пилу

Медіанний діаметр пилу, $\delta_{50} \cdot 10^{-6}$, м	S – питома поверхня, м ² /кг
8	650
32	330
50	280

При експериментальному встановленні тривалості помолу кварцового піску до необхідного ступеня дисперсності знаходили залежність тривалості помолу від питомої поверхні порошку за допомогою приладу ПСХ–2 [66, 67] і залежність питомої поверхні пилу від медіанного діаметру частинок пилу, з якої виходить, що для частинок з медіанним діаметром $8 \cdot 10^{-6}$ м питома поверхня пилу становить приблизно $650 \text{ м}^2/\text{кг}$, для $32 \cdot 10^{-6}$ м – приблизно $330 \text{ м}^2/\text{кг}$, для $50 \cdot 10^{-6}$ м – приблизно $280 \text{ м}^2/\text{кг}$ (рис. 2.1).

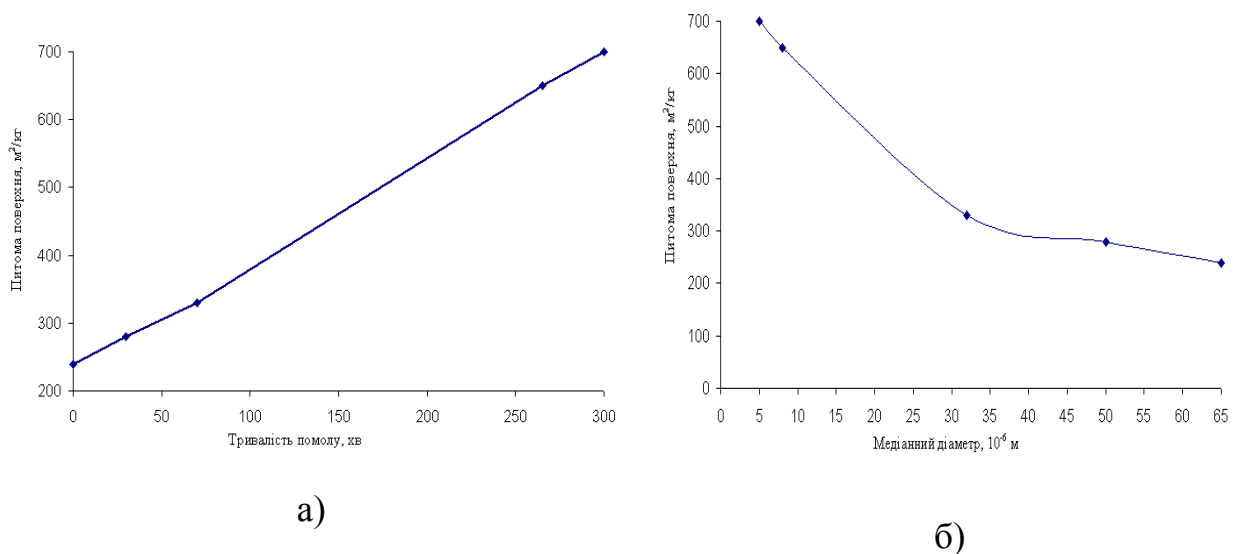


Рис. 2.1. Залежність питомої поверхні пиловидного кварцу:

а) від тривалості його помолу; б) від медіанного діаметру частинок пилу

У результаті експериментальних досліджень було виявлено, що тривалість помолу кварцового піску на вібротліні типу М–10 при вазі матеріалу 5 кг, сталених куль – 15 кг для одержання частинок з медіанним діаметром $50 \cdot 10^{-6}$ м становить 30 хвилин, $32 \cdot 10^{-6}$ м – 1 година 10 хвилин, $8 \cdot 10^{-6}$ м – 4 години 25 хвилин.

Для проведення випробувань пиловловлювачів були виготовлені наважки з масою 5 кг кварцового порошку з медіанним діаметром $(8, 32, 50) \cdot 10^{-6}$ м.

Проба з медіанним діаметром $50 \cdot 10^{-6}$ м і питомою поверхнею $280 \text{ м}^2/\text{кг}$ (30 хвилин помолу) була використана для ситового аналізу (прилад 028М, два

сита з розмірами комірок $63 \cdot 10^{-6}$ м та $50 \cdot 10^{-6}$ м). Відокремлену фракцію з розмірами частинок у межах $63 \cdot 10^{-6}$ м та $50 \cdot 10^{-6}$ м досліджували методом седиментації у гравітаційному полі.

Проби з медіанним діаметром $32 \cdot 10^{-6}$ м і питомою поверхнею $330 \text{ м}^2/\text{кг}$ (1 година 10 хвилин помолу) також використовували для ситового аналізу (сито з розмірами комірок $50 \cdot 10^{-6}$ м), відокремлюючи фракції з більшими частинками. Проба з медіанним діаметром $8 \cdot 10^{-6}$ м і питомою поверхнею $680 \text{ м}^2/\text{кг}$ (4 години 25 хвилин помолу) розділялася на фракції методом відмучування. Необхідна для випробувань пиловловлювачів фракція повинна містити частинки з розмірами в діапазоні $(4 - 12) \cdot 10^{-6}$ м (радіус $r = (2 - 6) \cdot 10^{-6}$ м). Необхідна для досліджень фракція з частинками розміром $r = (2 - 6) \cdot 10^{-6}$ м висушувалася, після чого проводився аналіз дисперсного складу проби.

2.4. Аналіз дисперсного складу пилу

Дисперсний склад є однією з найважливіших характеристик дисперсних матеріалів, що визначає їх фізико-хімічні властивості, технологічні якості та область практичного застосування. Дисперсний аналіз є обов'язковим методом контролю всіх виробничих операцій, пов'язаних з використанням пилоподібних продуктів [68, 69].

2.4.1. Ситовий аналіз

Ситовим аналізом аналізували пил із частинками більшими за $40 \cdot 10^{-6}$ м.

Нами були використані лабораторні сита із дротяними сітками (ДСТ 3584–83), отвори яких становлять квадрати зі стороною $40 - 2500$ мкм.

Ми застосували ручний просів, при якому просівали через одне сито закрите кришкою і піддоном. Дослідження проводили також на механічному ситовому аналізаторі 028М [68]. Дисперсний склад пилу визначали у два етапи. На першому етапі ситовим методом виділяли і класифікували частинки пилу з

медіанним діаметром більшим за $400 \cdot 10^{-6}$ м. З пилогазової суміші відбирали пробу, відбір якої регламентується ГОСТ 23148–78 з дотриманням ізокінетичності. Відібрану наважку пилу просіювали через набір сит з розміром комірок $(100, 250, 500) \cdot 10^{-6}$ м. Маса залишків по ситах у кожному окремому випадку додавали і визначали вміст частинок пилу, розмір яких більший за $10 \cdot 10^{-6}$ м.

Наважка пилу з питомою поверхнею $280 \text{ м}^2/\text{кг}$ була проаналізована ручним ситовим методом, при цьому отримали фракцію з медіанним діаметром частинок у межах $63 \cdot 10^{-6}$ м та $59 \cdot 10^{-6}$ м. Результати експерименту наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Результати розподілу частинок за розмірами для кварцового піску

Розмір комірок сита, 10^{-6} м	Граничні розміри частинок фракції, 10^{-6} м	Маса фракції, кг	Вміст фракції, %
160	> 160	0,125	5
100	100 – 160	0,550	22
63	63 – 100	1,425	57
50	50 – 63	0,250	10
32	< 50	0,150	6

Для випробування пиловловлювачів використовували кварцовий пил з медіанним діаметром: $(8,0, 16, 32 \text{ і } 50) \cdot 10^{-6}$ м.

2.4.2. Метод седиментації у гравітаційному полі

Аналіз дисперсного складу дрібнодисперсного $< 40 \cdot 10^{-6}$ м пилу проводився методом седиментації у гравітаційному полі.

Частинки в полідисперсній системі осаджуються з різними швидкостями, оскільки вони мають неоднакові розміри [68, 69].

Пил, який досліджували, попередньо висушували протягом 4 год. при температурі $100 - 105 \text{ }^\circ\text{C}$ і потім з нього готували суспензію, яку ретельно перемішували. Концентрація пилу в рідині, що заливається в прилад, становила

від 0,5 до 1%.

Висоті h у момент часу відбору проби τ відповідає певний діаметр частинок d , що є максимальним їх розміром, який відбирається. Частинки діаметром $>d$ вже пройшли дану висоту h і їх діаметр дорівнює:

$$d = \sqrt{\frac{18\mu}{(\rho_1 - \rho_2) g} \cdot \frac{h}{\tau}}, \quad (2.8)$$

де h – висота у момент відбору проб, м; τ – час відбору проби, с; d – діаметр частинок, м.

Другий етап полягав в аналізі дисперсного складу частинок, розмір яких менший за $5 \cdot 10^{-5}$ м, седиментаційним методом [70].

За результатами аналізу побудували графіки дисперсного складу експериментального пилу (рис. 2.2).

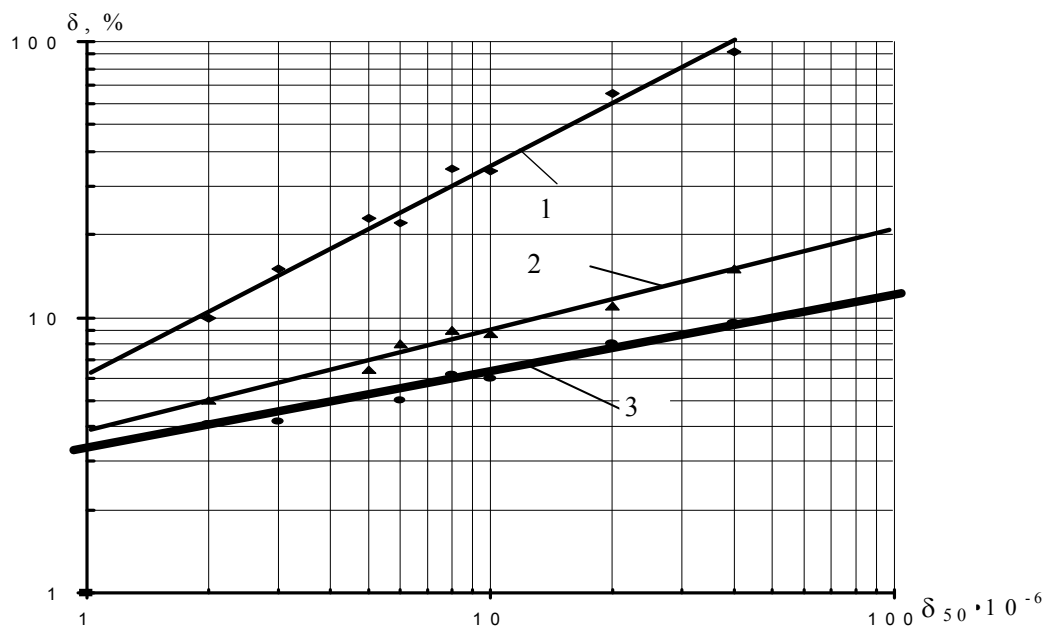


Рис. 2.2. Дисперсний склад експериментального пилу:

1 – $\delta_{50} = 8 \cdot 10^{-6}$ м; 2 – $\delta_{50} = 32 \cdot 10^{-6}$ м; 3 – $\delta_{50} = 50 \cdot 10^{-6}$ м

Був проаналізований дисперсний склад природного кварцового піску КП–3, який має медіанний діаметр $50 \cdot 10^{-6}$ м, а щоб отримати необхідні для подальших досліджень пиловловлювачів фракції пилу він був подрібнений на вібромліні типу М–10.

Проби пилу з кварцового піску КП – 3 питомою поверхнею 280, 330 та

650 м²/кг досліджувалися седиментаційним методом, результати якого наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Результати експериментальних досліджень

Медіанний діаметр					
$\delta_{50} = 50 \cdot 10^{-6}$ м		$\delta_{50} = 32 \cdot 10^{-6}$ м		$\delta_{50} = 8 \cdot 10^{-6}$ м	
τ , с	m , 10 ⁻³ кг	τ , с	m , 10 ⁻³ кг	τ , с	m , 10 ⁻³ кг
1	2	3	4	5	6
59	0,010	152	0,010	1691	0,030
123	0,020	321	0,040	4126	0,200
190	0,040	509	0,100	7932	0,770
263	0,070	719	0,250	14696	0,960
340	0,120	957	0,780	29917	1,000
424	0,200	1228	0,890	—	—
514	0,360	1538	0,950	—	—
611	0,950	1899	0,980	—	—
713	1,000	2322	1,000	—	—

В результаті експериментальних досліджень (табл. 2.3) були побудовані криві седиментації (рис. 2.3, 2.5 і 2.7) і розраховані радіуси частинок. Методом гістограм [67] одержали диференціальну криву розподілу частинок полідисперсної системи за розмірами (рис. 2.4, 2.6 і 2.8).

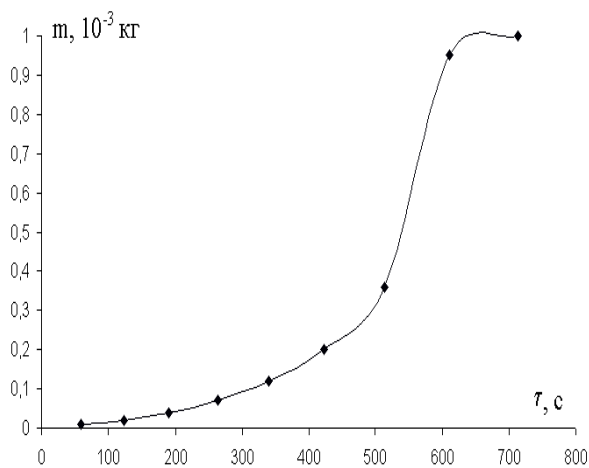


Рис. 2.3. Крива седиментації полідисперсної системи для частинок з медіанним діаметром $\delta_{50} = 50 \cdot 10^{-6}$ м

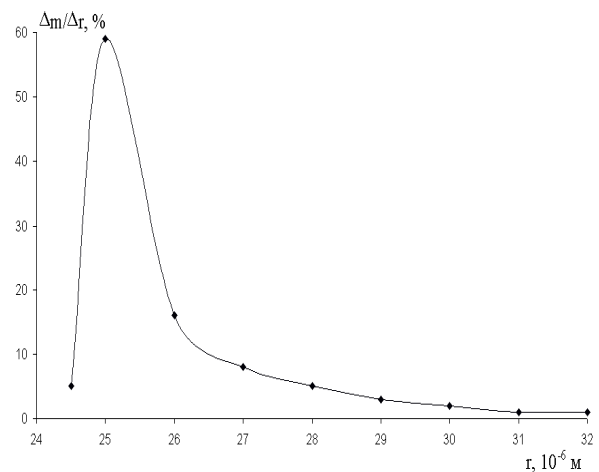


Рис. 2.4. Розподіл частинок полідисперсної системи за радіусами

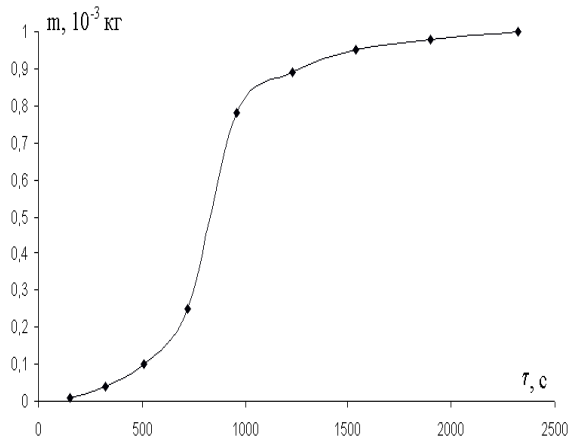


Рис. 2.5. Крива седиментації полідисперсної системи для частинок з медіанним діаметром $\delta_{50} = 32 \cdot 10^{-6} \text{ м}$

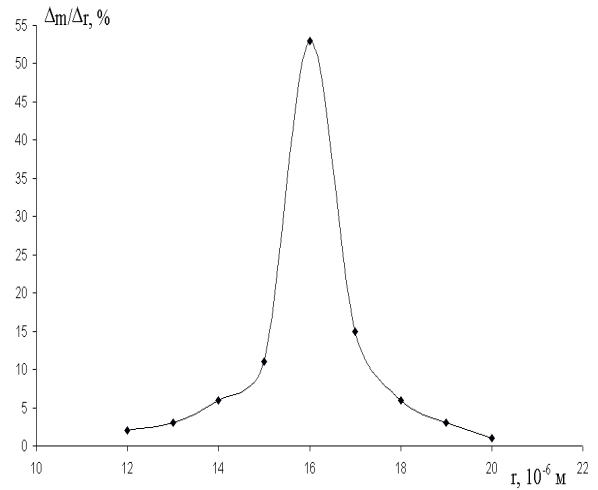


Рис. 2.6. Розподіл частинок полідисперсної системи за радіусами

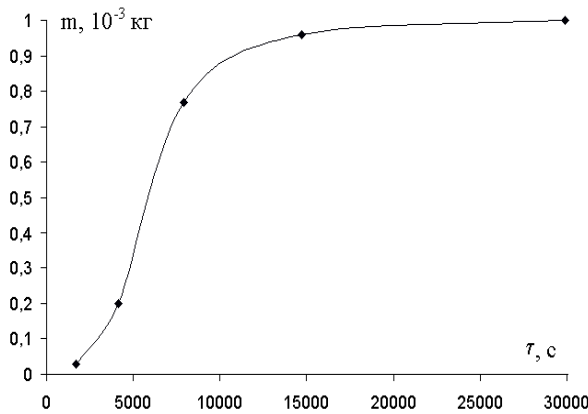


Рис. 2.7 – Крива седиментації полідисперсної системи для частинок з медіанним діаметром $\delta_{50} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}$

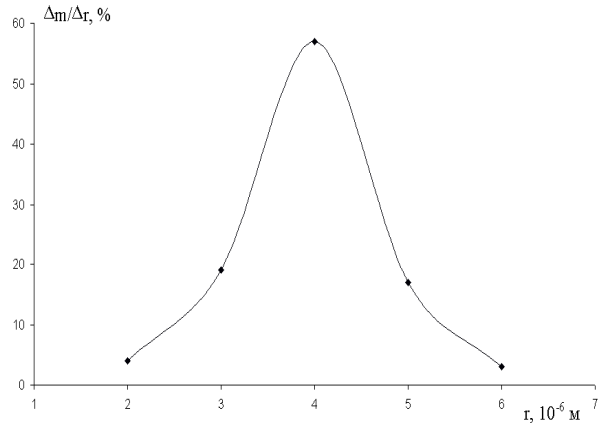


Рис. 2.8 – Розподіл частинок полідисперсної системи за радіусами

Крива розподілу – наочна і зручна характеристика полідисперсності системи, за даними якої легко визначити вміст фракцій (таблиця 2.4).

Таблиця 2.4

Розподіл частинок полідисперсної системи за радіусами

Радіус частинки $r, 10^{-6} \text{ м}$	Процентний вміст, %	m в 0,001 кг
1	2	3
32	1	0,010
31	1	0,010
30	2	0,020

1	2	3
29	3	0,030
28	5	0,050
27	8	0,080
26	16	0,160
25	59	0,590
24,5	5	0,050
20	1	0,010
19	3	0,030
18	6	0,060
17	15	0,150
16	53	0,530
15	11	0,110
14	6	0,060
13	3	0,030
12	2	0,020
6	3	0,030
45	17	0,170
4	57	0,570
3	19	0,190
2	4	0,040

2.4.2. Мікроскопічний аналіз

Визначали дисперсний склад пилу [71] безпосередньо за співвідношенням числа частинок різних фракцій з розмірами частинок від $(1 \text{ до } 50) \cdot 10^{-6}$ м. У нашому випадку розміри частинок пилу, особливо возгонів, менші за $1 \cdot 10^{-6}$ м, а оптичний мікроскоп дозволяє збільшувати частинки в 1000 разів і тому придатний для частинок більших за $1 \cdot 10^{-6}$ м, що і було використано нами.

2.5. Визначення швидкості руху й запиленості газів

При досліджуванні руху пилоповітряних потоків в першу чергу визначали швидкості його руху в криволінійних каналах. При ламінарному русі газу в прямій круглій трубі $\omega_{\text{сер}} = 0,5 \omega_0$, а при турбулентному $\omega_{\text{сер}} = 0,85 \omega_0$ (де ω_0 – осьова швидкість потоку в трубопроводі, м/с; $\omega_{\text{сер}}$ – середня швидкість руху

потоків в трубопроводі, м/с).

Ці співвідношення дійсні для прямолінійних газопроводів значної довжини, де існує симетричний розподіл швидкостей, але в багатьох випадках симетричність за тими або іншими причинами порушується [72], тому для визначення середньої швидкості $\omega_{\text{сер}}$ газопровід круглого перетину умовно розбивали на декілька концентричних кілець із рівновеликими площами і пневмометричною трубкою однаковими коефіцієнтами k в комплексі з мікрометром ММН–240 (рис. 2.9) заміряли швидкості в окремих кільцях, а середню швидкість $\omega_{\text{сер}}$ знаходили за формулою:

$$\omega_{\text{сер}} = \frac{1}{m} (\omega'_x + \omega''_x + \dots + \omega^m_x), \quad (2.9)$$

де m – число точок вимірювання.

Після вимірювання осьової швидкості ω_0 визначали $\alpha_{\text{сер}}$ (похибку вимірювання) і використовували її значення для всіх наступних вимірювань.

Для скорочення розрахунку швидкостей за формулою (2.9) при визначенні $\alpha_{\text{сер}}$ ми одночасно заміряли пневмометричними трубками швидкості в даній точці газопроводу і по його осі, а потім підраховували не швидкості, а їх співвідношення:

$$\alpha_1 = \omega'_x / \omega'_0, \quad \alpha_2 = \omega''_x / \omega''_0 \text{ і т.д.,}$$

виражені через $\sqrt{h'_x / h'_0}$, $\sqrt{h''_x / h''_0}$ і т.д.

де h'_x , h''_x ... – визначені динамічні (швидкісні) тиски у відповідних точках перетину газопроводу; h'_0 , h''_0 , ... – динамічні (швидкісні) тиски по осі газопроводу, які заміряються одночасно.

Установка пневмометричної трубки в газопроводі разом із запірним краном і мікроманометром наведена на рис. 2.9.

Вимірювання здійснювалися одночасно в трьох точках перетину газопроводу. При вимірюванні швидкості в будь-якій даній точці газопроводу здійснювали п'ять послідовних відліків по мікроманометру при знаходженні в кожній точці пневмометричної трубки.

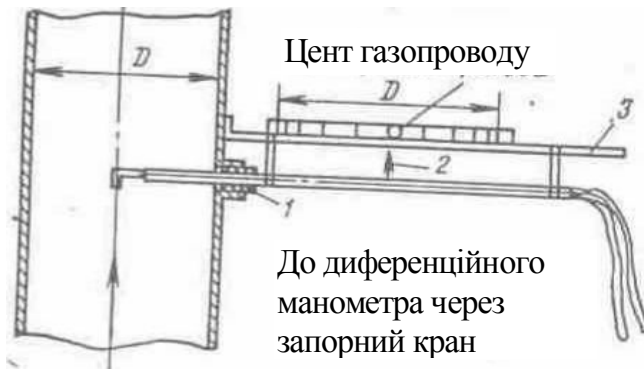


Рис. 2.9. Установка пневмометричної трубки в газопроводі:

1 – трубка; 2 – показник; 3 – рейка

кількість газів визначали з точністю до $\pm 1 - 2\%$.

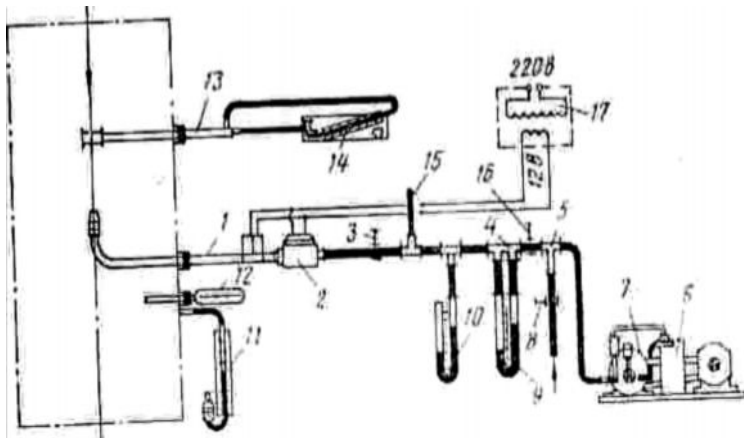


Рис. 2.10. Схема установки для визначення запиленості із застосуванням забірної трубки і зовнішньої фільтрації:

1 – забірна трубка; 2 – фільтрувальний патрон з паперовим фільтром; 3, 8, 16 – затискачі на гумових трубках; 4 – реометр-діафрагма; 5 – трійник; 6 – бачок для масла; 7 – повітродувка-вакуумний насос; 9 – манометр реометра; 10 – манометр (ртутний); 11 – манометр; 12 – термометр; 13 – пневмометрична трубка; 14 – манометр; 15 – термометр; 17 – трансформатор

Вимірювання пневмометричними трубками при знятті поля швидкостей здійснювали на прямолінійній ділянці газопроводу довжиною не меншою за $5D$, причому, до перетину газопроводу, де здійснювалися вимірювання, і після нього не меншою за $2D$ (D – діаметр газопроводу), а

Вміст пилу в газах можна виразити різними способами і методами [73].

Ми користувалися методом зовнішньої фільтрації визначення запиленості, вираженого масою пилу в 1 м^3 газу. Певний об'єм запиленого газу фільтрували через фільтр. Зважуючи останній до і після фільтрації, визначали масу пилу, зібраного (вловленого) з даного об'єму газу, і визначали запиленість газу, розділивши значення

знайденої маси пилу на об'єм газу (рис. 2.9). При цьому всередину газоходу поміщали тільки забірну трубку для відбору проби запиленого газу, а фільтр у відповідному патроні поміщали поза газоходом – на кінці забірної трубки (рис. 2.10).

При використанні цього способу нами було забезпечено: відбір із запиленого газового потоку частини аерозолі, у якій концентрація і дисперсний склад пилу не відрізнялися від основного потоку; повне вловлювання всього пилу з відібраної частини газу, визначення його кількості; точне вимірювання об'єму газу, пропущеного через фільтр, і приведення його до нормальних умов. При цьому нами вжиті заходи, щоб пил не осів у каналі забірної трубки, для чого трубку нагрівали, (пропускали струм напругою 12 В) і газ пропускали через канал трубки зі швидкістю 10 – 15 м/с.

Зважаючи фільтр до і після досліду, розраховували приріст ваги пилу, тобто концентрацію пилу у пилоповітряному потоці. Необхідну для проведення аналізу масу пилу $m_{\text{п}}$ визначали за формулою:

$$m_{\text{п}} = z \cdot L \cdot \tau, \text{ кг}, \quad (2.10)$$

де z – концентрація пилу у трубопроводі, кг/м³; L – витрати повітря при відборі проби, м³/год; τ – тривалість відбору проби, год.

Об'єм газу, відібраного на фільтрацію вимірювали за допомогою ротаметрів.

Для розрахунку запиленості газів за даними вимірювань використовували наступну формулу:

$$z = \frac{(\Delta q + a \pm b)1000}{V_0 t}, \quad (2.11)$$

де z – запиленість вологих газів, кг/м³ при нормальних умовах; Δq – приріст ваги фільтра, кг; a – виправлення на пил, що осів у забірній трубці (при методі зовнішньої фільтрації), кг; b – виправлення на зміну маси контрольного фільтра, кг; V_0 – об'єм відібраної проби вологих газів при нормальних умовах, м³/год; t – тривалість вимірювання запиленості, год.

Визначали початкову концентрацію пилу $z_{\text{п}}$ (кг/м³), який подається в апарат по трубопроводу за формулою:

$$z_{\text{п}} = \frac{G_{\text{п}}}{L_{\text{п}} \tau_q}, \quad (2.12)$$

де $G_{\text{п}}$ – вага пилу, що подається пилоподавачем в стенд за час дослід, кг; $L_{\text{п}}$ – витрати повітря через стенд, м³/год; τ_q – час дослід, год;

визначали початковий пиловміст повітря Π (кг/м³)

$$\Pi = \frac{\sum G_{\text{п}} \cdot 10^6}{Q \cdot t}, \quad (2.13)$$

де $\sum G_{\text{п}}$ – середньогодинна кількість пилу, що отримується, кг/год; Q – нормативна витрата повітря, яке відводиться, м³/год; t – коефіцієнт підсмоктування не виробничого повітря (для установок звичайного типу $t = 1,05$, для установок колекторних $t = 1,07$, для універсальних з магістраллю постійного перерізу $t = 1,07$ [73]).

Середньогодинну кількість пилу, що утворюється, визначали, виходячи з кількості отриманих на ньому сипких відходів і часткового вмісту в них пилу ($K_{\text{п}}$):

$$G_{\text{п}} = G_{\text{відх}} \cdot K_{\text{п}}, \quad (2.14)$$

де $G_{\text{відх}}$ – кількість сипких відходів отриманих на пересипі, кг; $K_{\text{п}}$ – частковий вміст пилу в відходах, кг.

За допомогою програми MNK.cpp було здійснене статистичне моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлення від конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача (додаток А). При визначенні середньогодинної кількості пилу в металургійному виробництві використовували дані (додаток А) в щільних об'ємних одиницях. Вагова кількість відходів за час роботи конвеєра підрахована для об'ємної ваги в щільній масі – 500 кг/м³. Частковий вміст пилу у відходах $K_{\text{п}}$ визначався ситовим методом. Добуток $G_{\text{відх}} K_{\text{п}}$ визначає кількість пилу в кг, що було одержено в технологічному процесі за одну годину роботи. Ці дані дають можливість:

- підрахувати концентрацію пилу в повітрі;

- визначити кінцеву концентрацію пилу z_k (кг/м³) у трубопроводі виходу очищеного повітря за весь час досліду за формулою:

$$z_k = \frac{G_{\Pi} - G_{\text{ВЛ}}}{Q_{\Pi} \tau_q}, \quad (2.15)$$

де $G_{\text{ВЛ}}$ – вага пилу, вловленого апаратом, кг;

- визначити ефективність роботи пиловловлювачів, виходячи з ваги пилу, вловленого в бункері пиловловлювача ($G_{\text{ВЛ}}$), до ваги пилу, який входить в апарат (G_{Π}), за період досліду (τ) тобто за формулою:

$$\eta = \frac{G_{\text{ВЛ}}}{G_{\Pi}} 100, \%. \quad (2.16)$$

Через те, що ефективність апарата в такому вигляді не дає повної уяви про кількість дрібних частинок матеріалу, що виносяться з очищуваним повітрям, вводимо поняття ефективності апарата, яку визначаємо за формулою:

$$\eta_{\text{ВЛ}} = \frac{G_{\text{ВИН}}}{G_{\Pi}} \cdot 100\% = \frac{G_{\Pi} - G_{\text{ВЛ}}}{G_{\Pi}} \cdot 100\%, \quad (2.17)$$

де $G_{\text{ВИН}}$ – вага пилу, що виносяться з апарата очищеним в ньому повітрям, кг;

або

$$\eta_{\text{ВЛ}} = 100 - \eta, \%. \quad (2.18)$$

2.6. Опис експериментальної установки

Дослідження з вивчення фізико-механічних якостей пилу, моделювання процесу очищування, вивчення технологічних і конструктивних параметрів пиловловлювачів проводились у лабораторних умовах із врахуванням особливостей апаратів. Дослідження на експериментальному стенді (рис. 2.11) проводились відповідно до [74, 75].

Експериментальний стенд (рис. 2.11) складається з піддослідного апарата 1, вентилятора 2 для деагломерації пилу, пилоподавача 3 зі змішувачем 4, ежектора 5 і колектора 6, а також вентилятора 10 для виведення очищеного в апараті 1 повітря через рукавний фільтр 7 назовні. Перед рукавним фільтром

встановлена вимірювальна шайба 8 з приладом зовнішньої фільтрації 9.

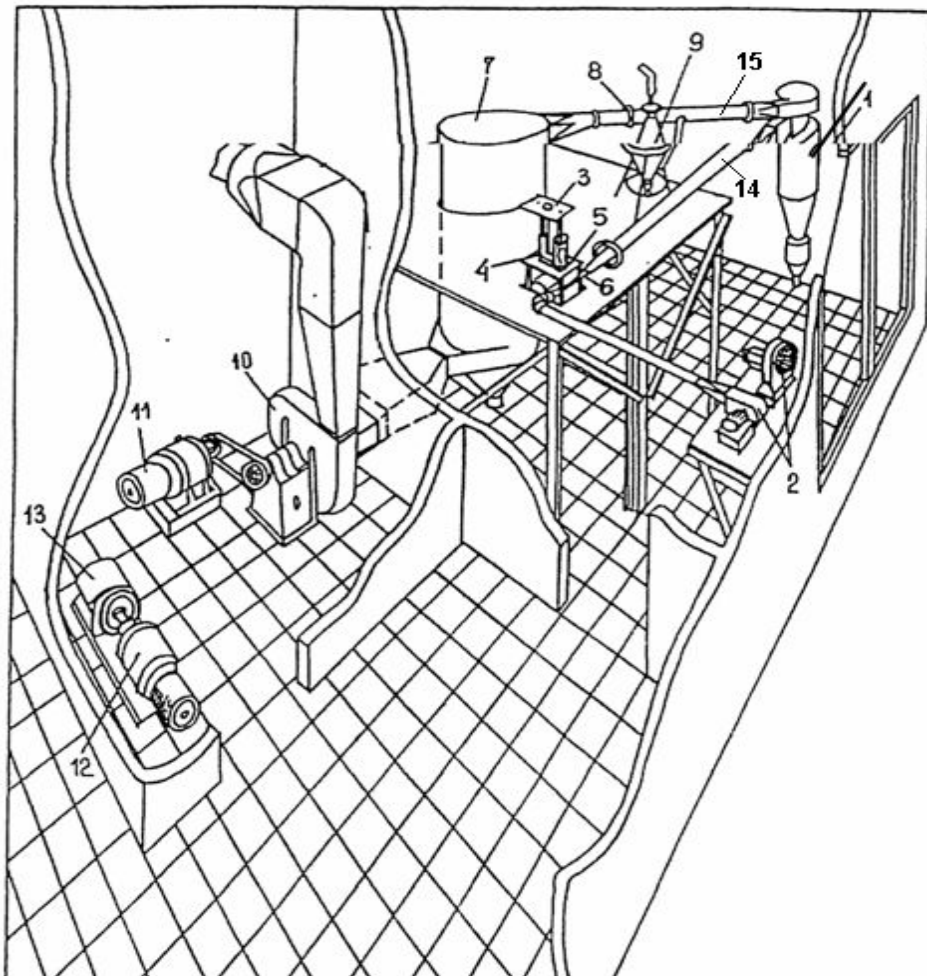


Рис. 2.11. Загальний вигляд експериментального стенду:

1 – пиловловлювач; 2, 10 – вентилятори; 3 – пилоподавач; 4 – змішувач; 5 – ежектор; 6 – колектор; 7 – рукавний фільтр; 8 – шайба

Вентилятор 10 має клиноремінний привід від електродвигуна постійного струму 11 потужністю 3,5 кВт. Для живлення двигуна встановлено генератор постійного струму 12 з двигуном змінного струму 13 потужністю 4,0 кВт. Така схема установки дозволяє плавно регулювати число обертів колеса вентилятора від 0 до 30 об/год. Відцентровий вентилятор, при розрідженні на вході у всмоктуючий отвір до 600 мм вод. ст., забезпечує витрати повітря до 3000 м³/год. З боку нагнітання вентилятора 10 встановлені глушники шуму.

Для живлення повітряного ежектора 5 встановлено два послідовно включених відцентрових вентилятора 2 (ЦВ – 2; ЦВ – 3) з числом обертів

50 об/год і електродвигунами потужністю 1,8 кВт.

Перед дослідним апаратом і після нього встановлені, відповідно, малий 14 і великий 15 шибери.

Гідравлічний опір відцентрово-інерційних пиловловлювачів визначається за перепадом повних тисків у перетині перед пиловловлювачем і за ним.

Для інерційних пиловловлювачів опір визначається:

$$H = k \cdot \frac{V^2 \gamma}{2g}, \text{ кг/м}^2, \quad (2.19)$$

де k – коефіцієнт опору (1,76 – 3,6); V – швидкість повітря, яке надходить в пиловловлювач, м/с; γ – питома вага повітря, кг/м³; g – прискорення сили тяжіння, м/с².

Залежно від положення шибера (як $Ш_M$ – малого так і $Ш_B$ – великого) вимірюється значення тиску і швидкість в трубопроводах до і після пиловловлювачів (рис. 2.12).

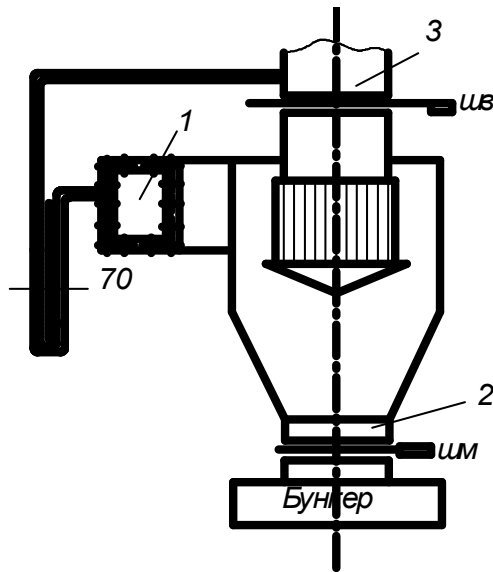


Рис. 2.12. Схема вимірювання гідравлічного опору:

1 – вхідний патрубок; 2 – пиловипускний патрубок; 3 – патрубок виходу чистого повітря

Гази, які отримуються у металургійній промисловості, містять ту або іншу кількість пилу, яка утворюється при подрібненні твердих тіл, при пересипанні і транспортуванні сипучих матеріалів, захоплюються і несуться потоком газу (повітря).

Самоподрібнювання відбувається при терті одного шматка матеріалу з іншим, при терті або стиканні шматків зі стінкою апаратів та інших процесах.

Метеорологічні умови в приміщенні, де проводились дослідження,

вимірювались приладами:

- температура – ртутним термометром;
- відносна вологість – аспіраційним психрометром;
- тиск – барометром.

Перед кожною серією дослідів проводились:

- тарування вимірювальних приладів безпосередньо на стенді без підключення пиловловлювача, за допомогою трубок Піто-Прандтля в комплексі з мікроманометром ММН–240 на прямому відрізку трубопроводу, який дорівнює 5 діаметрам трубопроводу до трубки та двом діаметрам – після трубки;

- перевірка стенда на герметичність;
- очищення пилоподавача, пиловловлювача, трубопроводів і вентилятора від пилу постукуванням палицею з гумовим наконечником.

2.7. Висновки

1. Описані методики і результати дослідження фізико-хімічних, морфометричних і дисперсних якостей пилу дозволили з високою точністю, відповідно до вимог “Єдиної методики порівняльних досліджень пиловловлювачів для очищення вентиляційного повітря” підібрати, підготувати та проаналізувати пил для проведення експериментальних досліджень.

2. Змонтовано дослідний стенд для проведення аеродинамічних, технологічних і експлуатаційних досліджень пиловловлювачів згідно з “Єдиною методикою порівняльних досліджень пиловловлювачів для очищення вентиляційного повітря”, який дозволив в подальшому коректно провести дослідження існуючих конструкцій пиловловлювачів, вибрати еталон для подальших порівняльних досліджень, детально дослідити необхідні параметри роботи високоефективних новостворених апаратів.

3. Наведені методики визначення ефективності та гідравлічного опору пиловловлювачів дозволили проводити подальші дослідження пиловловлюючих апаратів.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОЧИЩУВАННЯ ЗАПИЛЕНОГО ПОТОКУ В ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

У даному розділі була поставлена задача руху двофазного потоку в пиловловлювачі нової конструкції і здійснено її числову реалізацію у випадку, коли закони, які описують процеси руху виражені у вигляді диференціальних рівнянь, і коли кожне з таких рівнянь описує певний закон збереження, в якому змінною є деяка фізична величина і відображається баланс між різноманітними факторами, що мають вплив на цю змінну. Залежними змінними в цих диференціальних рівняннях є питомі властивості, тобто властивості, які відносяться до одиниці маси [76 – 112]. Члени диференціального рівняння такого типу виражаються дією на одиницю об'єму.

Постановка задачі про рух повітряного потоку в апараті включає наступні основні кроки: опис загальних припущень, граничних та початкових умов; математичну модель руху повітряних потоків в апараті з урахуванням моделі турбуленції; математичну модель руху твердої фази (частинок пилу) в апараті; методику розрахунку ефективності процесу очищення потоку від частинок пилу.

3.1. Прийняті припущення, граничні і початкові умови

Для коректного опису процесу сепарації частинок пилу у пиловловлювачі принципово нового типу були прийняті певні припущення, які, з однієї сторони, наближають математичну модель до конкретних умов функціонування апарата, а з іншої – запобігають надмірному ускладненню моделі.

При дослідженні двофазного потоку в розробленій конструкції пиловловлювача для розрахунку були прийняті наступні припущення:

- частинки пилу є твердими й не взаємодіють між собою;
- частинка, що торкнулася стінки корпусу вважається вловленою;
- на вході в апарат потік має рівномірне поле швидкостей;
- розподіл пилу по перерізу вхідного патрубка пиловловлювача є рівномірним;
- опір руху частинок у газовому середовищі описується законом Стокса;
- тангенціальна і осьова складові швидкості частинки співпадають з тангенціальною і осьовою складовими швидкості обертання газового потоку, відповідно, радіальні швидкості унаслідок дії сил інерції є різними.

Для того, щоб розв'язок задачі про рух повітряних потоків був єдиним задаємо початкові і граничні умови, які, в свою чергу, визначаються формою і конструктивними особливостями апарата та умовами його роботи, тобто для кожного типу пиловловлювача існує свій набір початкових і граничних умов.

Початковими умовами для апарата, який ми запропонували, є характеристики повітряного середовища та пилу для деякого початкового моменту часу:

- атмосферний тиск за нормальних умов $p_0 = 101325$ Па;
- температура повітря за нормальних умов $T_0 = 293$ К;
- середній (медіанний) діаметр частинок пилу $d_{50} = (8 - 50) \cdot 10^{-6}$ м;
- максимальний діаметр частинок пилу $d_{\max} = 50 \cdot 10^{-6}$ м;
- мінімальний діаметр частинок пилу $d_{\min} = 8 \cdot 10^{-6}$ м;
- густина частинок пилу $\rho_{\text{ч}} = 2000 - 4000$ кг/м³;
- густина повітря $\rho = 1,205$ кг/м³.

Розрахунки диференціальних рівнянь руху матеріальної точки при початкових умовах було проведено з використанням математичного пакету (Додаток Б, В).

Граничні умови накладаються на розв'язок задачі про рух потоку і повинні виконуватися в кожний момент часу цього руху й визначаються характером руху повітря по площині. Граничні умови задати важче, оскільки вони залежать

як від форми пиловловлювача [99 – 103], так і від особливостей його функціонування. Граничні умови залежать також й від густини газу: наприклад газ великої густини „прилипає” до стінок апарата в той час, як розріджений газ ковзає по граничних поверхнях. Проте незважаючи на особливості є певні закономірності при заданні граничних умов при русі запиленого повітря в пилоочищувачі, які ми і задаємо, а саме: 1) рівність нулю швидкості на нерухомій твердій границі; 2) швидкість пилоповітряного потоку на вході в пиловловлювач стабільна і дорівнює 18 м/с.

3.2. Моделювання руху повітряних потоків у відцентрово-інерційних пиловловлювачах

Турбулентний потік нестискуваної рідини в математичних моделях описується рівняннями Нав'є-Стокса, в яких враховуються різні фізико-хімічні ефекти: вплив архімедових сил, хімічних реакцій, горіння, проходження потоку через пористе середовище тощо, і які складають теоретичну основу газодинаміки в'язкого середовища. Прийнято, що динамічний коефіцієнт в'язкості μ є функцією координат x, y, z , тобто $\mu = f(x, y, z)$. Якщо прийняти припущення, що $\mu = const$, рівняння Нав'є-Стокса [104 – 106] можна записати у вигляді

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta V_x + \frac{\nu}{3} \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{div} \vec{V}; \\ \frac{dV_y}{dt} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta V_y + \frac{\nu}{3} \frac{\partial}{\partial y} \operatorname{div} \vec{V}; \\ \frac{dV_z}{dt} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta V_z + \frac{\nu}{3} \frac{\partial}{\partial z} \operatorname{div} \vec{V}. \end{aligned} \right\} (3.1)$$

де \vec{V} – вектор швидкості точки суцільного середовища з координатами x, y, z в момент часу t (змінні Ейлера),

V_x, V_y, V_z – проекції вектора швидкості на осі нерухомої декартової системи координат.

Домноживши рівняння системи відповідно на одиничні вектори i, j, k , а потім додавши їх, одержимо рівняння руху потоку у векторній формі

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{G} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p + \nu \Delta \bar{V} + \frac{\nu}{3} \cdot \text{grad } \text{div} \bar{V}, \quad (3.2)$$

де вектор масових сил у декартових координатах: $\bar{G} = X\bar{i} + Y\bar{j} + Z\bar{k}$;

градієнт тиску: $\text{grad } p = (\partial p / \partial x)\bar{i} + (\partial p / \partial y)\bar{j} + (\partial p / \partial z)\bar{k}$.

Вектори:

$$\Delta \bar{V} = \Delta V_x \bar{i} + \Delta V_y \bar{j} + \Delta V_z \bar{k},$$

$$\text{grad } \text{div} \bar{V} = (\partial \text{div} \bar{V} / \partial x)\bar{i} + (\partial \text{div} \bar{V} / \partial y)\bar{j} + (\partial \text{div} \bar{V} / \partial z)\bar{k}.$$

Якщо рідина не стискується, то $\text{div} V = 0$ і, як наслідок

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{G} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p + \nu \Delta \bar{V}.$$

При відсутності масових сил – $G = 0$, тому

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p + \nu \Delta \bar{V} + \frac{\nu}{3} \cdot \text{grad } \text{div} \bar{V}.$$

Вектор повного прискорення $\frac{d\bar{V}}{dt}$ можна представити у наступному вигляді

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \text{grad} \frac{V^2}{2} + \text{rot} \bar{V} \cdot \bar{V}. \quad (3.3)$$

З урахуванням рівнянь (3.2) і (3.3) рівняння руху потоку перепишемо в наступному вигляді

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \text{grad} \frac{V^2}{2} + \text{rot} \bar{V} \cdot \bar{V} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \bar{V} + \frac{\nu}{3} \text{grad } \text{div} \bar{V}, \quad (3.4)$$

де \bar{V} – вектор швидкості; ρ – густина середовища в точці з координатами (x, y, z) в момент часу t , кг/м³; p – тиск, Па.

У рівняннях (3.2) і (3.3) враховані головні нелінійні механізми еволюції турбулентних течій, інерційні сили і сила тяжіння.

Теплоперенос в моделі враховуємо за допомогою рівняння для ентальпії:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}h) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \mu_t \right) \nabla h \right), \quad (3.5)$$

Якщо допустити, що коефіцієнт теплоємності при постійному тиску C_p є константою, то рівняння Клапейрона можна переписати в наступному вигляді:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{R}{C_p} \cdot h, \quad (3.6)$$

де R – газова постійна, яка для різних газів приймає різні значення;

h – ентальпія (теплова функція), яка задається співвідношенням

$$h = \int_0^T c_p(T) dT,$$

де T – абсолютна температура, К.

Динамічний коефіцієнт в'язкості μ є функцією тільки абсолютної температури T і для їх визначення використовуємо степеневу залежність

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (3.7)$$

де T_0 і μ_0 – відповідно абсолютна температура і коефіцієнт в'язкості, що відповідають деякому початковому стану газу.

$$n = \begin{cases} 1, & T < 90K \\ 8/9, & 90 < T < 250K \\ 3/4, & 250 < T < 600K \\ 1, & T > 600K \end{cases}$$

В середньому приймаємо $n = 0,76$ [104 – 106].

3.3. Модель турбуленції

Для математичного опису турбулентного масопереносу доцільно використати $k - \epsilon$ модель турбуленції, яка ґрунтується на рівняннях балансу для кінетичної енергії турбулентності k і рівнянні швидкості дисипації турбулентної енергії ϵ .

Турбулентна в'язкість μ_t виражається через величини $k - \epsilon$ наступним чином:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (3.8)$$

де k – турбулентна енергія, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ϵ – швидкість дисипації турбулентної енергії, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ρ_B – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Значення k і ϵ визначаються з наступних рівнянь [107]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}k) = \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \nabla k) + \frac{G}{\rho} - \epsilon; \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}\epsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \nabla \epsilon) + \frac{\epsilon}{k} (C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 \epsilon), \quad (3.10)$$

де

$$G = \mu_t \frac{\partial V_i}{\partial x_j} (\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}). \quad (3.11)$$

Для даного випадку значення параметрів $k - \epsilon$ моделі приймаємо: $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,3$; $C_\mu = 0,09$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$ згідно рекомендаціям [107, 108].

У даний час існує достатня кількість розрахункових програм, що використовують описані методи обчислювальної гідродинаміки, такі як STAR-CD, Fluent, CFX, FlowVision і вимагають:

- створення області розрахунку (“геометрія” пристрою) у спеціальних системах автоматизованого проектування;
- вибору і доповнення математичної моделі стосовно умов задачі, яку вирішуємо;
- формулювання граничних і початкових умов;
- завдання розрахункової сітки першого рівня;
- обґрунтованого завдання критеріїв адаптації сітки по рішенню і за граничних умов;
- задання параметрів і вибору методів розрахунку, які визначають швидкість збіжності обчислювального алгоритму і порядок апроксимації

початкових рівнянь;

- вибору кроку за часом обчислювального алгоритму;
- обґрунтованого вибору видів візуалізації результатів розрахунків.

3.4. Модель впливу інерційних сил і сил опору на рух частинок пилу

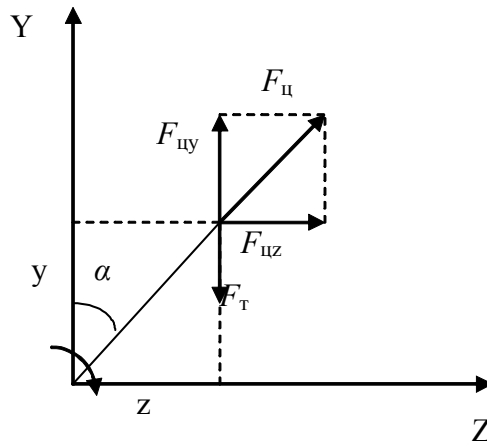


Рис. 3.1. Схема сил, що впливають на частинку

На частинки пилу під час її руху в закрученому потоці, з урахуванням раніше зроблених припущень, впливають такі сили (рис.3.1):

сила тяжіння

$$\overline{F}_T = m_{\text{ч}} \cdot \overline{g} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6} \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{п}}) \cdot \overline{g} \quad (3.12)$$

де $m_{\text{ч}}$ – маса частинки, кг; g – прискорення сили тяжіння м/с^2 ; $d_{\text{ч}}$ – діаметр частинки, м; $\rho_{\text{ч}}$ – густина частинок пилу кг/м^3 ; $\rho_{\text{п}}$ – густина повітря, кг/м^3 .

Відцентрова сила

$$\overline{F}_{\text{ц}} = m_{\text{ч}} \cdot \frac{\overline{V}_{\tau}^2}{R} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6} \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{п}}) \cdot \frac{\overline{V}_{\tau}^2}{R}, \text{ Н} \quad (3.13)$$

де V_{τ} – тангенціальна складова швидкості обертання потоку повітря, м/с ;

R – радіус обертання потоку, м.

Як видно з наведених рівнянь (3.12 і 3.13), різницею густини ($\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{п}}$) враховується і сила витіснення середовища (сила Архімеда).

У рухомому потоці газу на частинку діє сила опору середовища (сила Стокса) [104]:

$$\overline{F_c} = 3\pi\mu_{\Gamma}d_{\text{ч}}\overline{V_{\text{ч}}}\chi, \quad (3.14)$$

де μ_{Γ} – динамічна в'язкість, Па · с;

$V_{\text{ч}}$ – швидкість осадження частинки щодо газового середовища, м/с;

$\chi = 2,9$ – динамічний коефіцієнт форми частинок пилу для змішаних тіл [109, 110].

Якщо врахувати, що для зваженої частинки, яка рухається в потоці газу сила Стокса дорівнює сумі зовнішніх сил і направлена у зворотньому напрямку [109 – 111], то

$$\overline{F_c} = \overline{F_T} + \overline{F_{\text{ц}}}. \quad (3.15)$$

Розкладемо сили (3.15) по осям y і z :

$$\begin{aligned} F_{\text{cy}} &= F_{\text{цy}} - F_T; \\ F_{\text{cz}} &= F_{\text{цz}}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Використовуючи рівняння (3.12, 3.13, 3.14 і 3.16), виразимо V_{cy} і V_{cz} – проекції швидкості осадження частинки відносно газового середовища на осі координат y і z

$$V_{\text{cy}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{п}}) \cdot \left(\frac{V_T^2}{R} \cdot \cos(\alpha) - g \right)}{18\mu_{\Gamma}\chi}, \quad (3.17)$$

і

$$V_{\text{cz}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{п}}) \cdot \frac{V_T^2}{R} \cdot \sin(\alpha)}{18\mu_{\Gamma}\chi}, \quad (3.18)$$

де

$$\sin(\alpha) = \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \cos(\alpha) = \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}}; R = \sqrt{y^2 + z^2}, \quad (3.19)$$

де α – кут між віссю y і радіусом вектором точки, в якій знаходиться частинка;

y і z – координати точки в якій знаходиться частинка.

З моделі турбулентного масопереносу одержуємо компоненти миттєвої швидкості потоку по осям координат V_x , V_y і V_z , які утворюються в осьову, тангенціальну і радіальну складові швидкості для закрученого потоку повітря.

Осьова швидкість потоку в нашому випадку співпадатиме з віссю x

$$V_{oc} = V_x. \quad (3.20)$$

Тангенційна і радіальна швидкості потоку визначатимуться таким чином

$$V_T = V_{zy} \cdot \cos(\alpha + \beta) = V_{zy} \cdot (\cos(\alpha)\cos(\beta) - \sin(\alpha)\sin(\beta)) \quad (3.21)$$

і

$$V_p = V_{zy} \cdot \sin(\alpha + \beta) = V_{zy} \cdot (\sin(\alpha)\cos(\beta) + \cos(\alpha)\sin(\beta)), \quad (3.22)$$

де

$$\begin{aligned} V_{zy} &= \sqrt{V_y^2 + V_z^2}; \\ \sin(\alpha) &= \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \\ \cos(\alpha) &= \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \\ \sin(\beta) &= \frac{V_y}{\sqrt{V_y^2 + V_z^2}}; \\ \cos(\beta) &= \frac{V_z}{\sqrt{V_y^2 + V_z^2}}; \end{aligned} \quad (3.23)$$

де α – кут між віссю y і радіусом вектора точки, в якій знаходиться частинка;

β – кут між віссю z і вектором швидкості частинки в даній точці.

Звідси одержуємо остаточні залежності

$$V_T = \frac{y \cdot V_z - z \cdot V_y}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \quad (3.24)$$

$$V_p = \frac{z \cdot V_z + y \cdot V_y}{\sqrt{y^2 + z^2}}. \quad (3.25)$$

Підставивши (3.24) в (3.17) і (3.18), одержуємо залежність для визначення швидкості в кожній точці потоку

$$V_{чы} = \frac{d_{ч}^2 \cdot (\rho_{ч} - \rho_{п}) \cdot \left(\frac{y \cdot (y \cdot V_z - z \cdot V_y)^2}{(y^2 + z^2)^2} - \bar{g} \right)}{18\mu_{г}\chi}; \quad (3.26)$$

$$V_{чz} = \frac{d_{ч}^2 \cdot (\rho_{ч} - \rho_{п}) \cdot \frac{z(y \cdot V_z - z \cdot V_y)^2}{(y^2 + z^2)^2}}{18\mu_{г}\chi}; \quad (3.27)$$

Відповідно до прийнятих допущень з урахуванням рівняння (3.24):

$$V_{чx} = V_{ос} = V_x. \quad (3.28)$$

Одержавши компоненти $V_{чx}$, $V_{чы}$ і $V_{чz}$, ми визначаємо в кожній точці потоку миттєву швидкість частинки щодо потоку

$$\bar{V}_{ч} = V_{чx}\bar{i} + V_{чы}\bar{j} + V_{чz}\bar{k}, \quad (3.29)$$

де \bar{i} , \bar{j} і \bar{k} – одиничні вектори позитивних напрямів осей.

Для модуля вектора швидкості $\bar{V}_{ч}$ маємо

$$V = \sqrt{V_{чx}^2 + V_{чы}^2 + V_{чz}^2}. \quad (3.30)$$

Одержимо швидкості частинки щодо прийнятої декартової системи координат:

$$\begin{aligned} \overline{V_{чx0}} &= \overline{V_x}; \\ \overline{V_{чы0}} &= \overline{V_{чы}} + \overline{V_y}; \\ \overline{V_{чz0}} &= \overline{V_{чz}} + \overline{V_z}; \end{aligned} \quad (3.31)$$

Якщо розглядати швидкості в циліндровій системі координат, то

$$\begin{aligned} \overline{V_{чос}} &= \overline{V_x}; \\ \overline{V_{чт0}} &= \overline{V_T}; \\ \overline{V_{чр0}} &= \overline{V_{чр}} + \overline{V_p}, \end{aligned} \quad (3.32)$$

де $V_{чр}$ одержуємо аналогічно перетворенням:

$$V_{\text{чр}} = \frac{z \cdot V_{\text{чз}} + y \cdot V_{\text{чы}}}{\sqrt{y^2 + z^2}}. \quad (3.33)$$

Одержана в рівнянні (3.33) швидкість – це параметр, який характеризуватиме значення швидкості і напрямок руху частинки пилу, яка поміщена в ту або іншу точку простору пиловловлювача. Дані значення дозволять нам оцінити ефективність апарата за різних граничних умов, при різній геометрії апарата і при різних розмірах і масі частинок пилу.

3.5. Результати моделювання

Для підготовки розрахунку в програмі твердотільного моделювання створювалася тривимірна геометрична модель апарата [99] (рис. 3.2).

Геометричні розміри пиловловлювача і жалюзійного відокремлювача наведені на схемі жалюзійного відокремлювача (рис. 3.3) і є наступними: R – радіус циліндричної частини апарата, який дорівнює 0,7 м; H – висота циліндричної частини апарата, дорівнює 0,7 м; r_1 та r_2 – відповідно, внутрішній дорівнює 0,4 м та зовнішній – 0,3 м радіуси жалюзійного відокремлювача. Параметри жалюзі були вибрані відповідно до [113].

Довжина корпусу для пилу з медіанним діаметром:

$$8 \cdot 10^{-6} \text{ м} - 925 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 32 \cdot 10^{-6} \text{ м} - 825 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 50 \cdot 10^{-6} \text{ м} - 725 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Довжина циліндричної частини корпусу апарата складає для пилу з медіанним діаметром:

$$8 \cdot 10^{-6} \text{ м} - 800 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 32 \cdot 10^{-6} \text{ м} - 700 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 50 \cdot 10^{-6} \text{ м} - 600 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

В процесі роботи над установкою нами була запропонована конструкція мокрого пиловловлювача зі спеціальною формою жалюзі (в подальшому апарат III), в якому в корпусі мокрого пиловловлювача (рис. 3.2) конічно встановлений жалюзійний відокремлювач (рис. 3.3), який складається з жалюзі з двома заокругленими пастками, направленими від осі апарата з зовнішньої та внутрішньої сторін. Вхідні щілини пасток розташовані в кінці кожної пластини

жалюзі у вигляді двох кіл, направлених у протилежні сторони від самого жалюзі. Пастки зі сторони зовнішньої вигнутої і внутрішньої увігнутої поверхні жалюзі по всій її довжині зверху вниз мають форму вертикальних каналів, один з яких відкритий назустріч пилоповітряному потоку, а другий – направлений в середину відокремлювача і розташований проти напрямку руху пилоповітряного потоку і переходять у нижню частину зрізаного конусу.

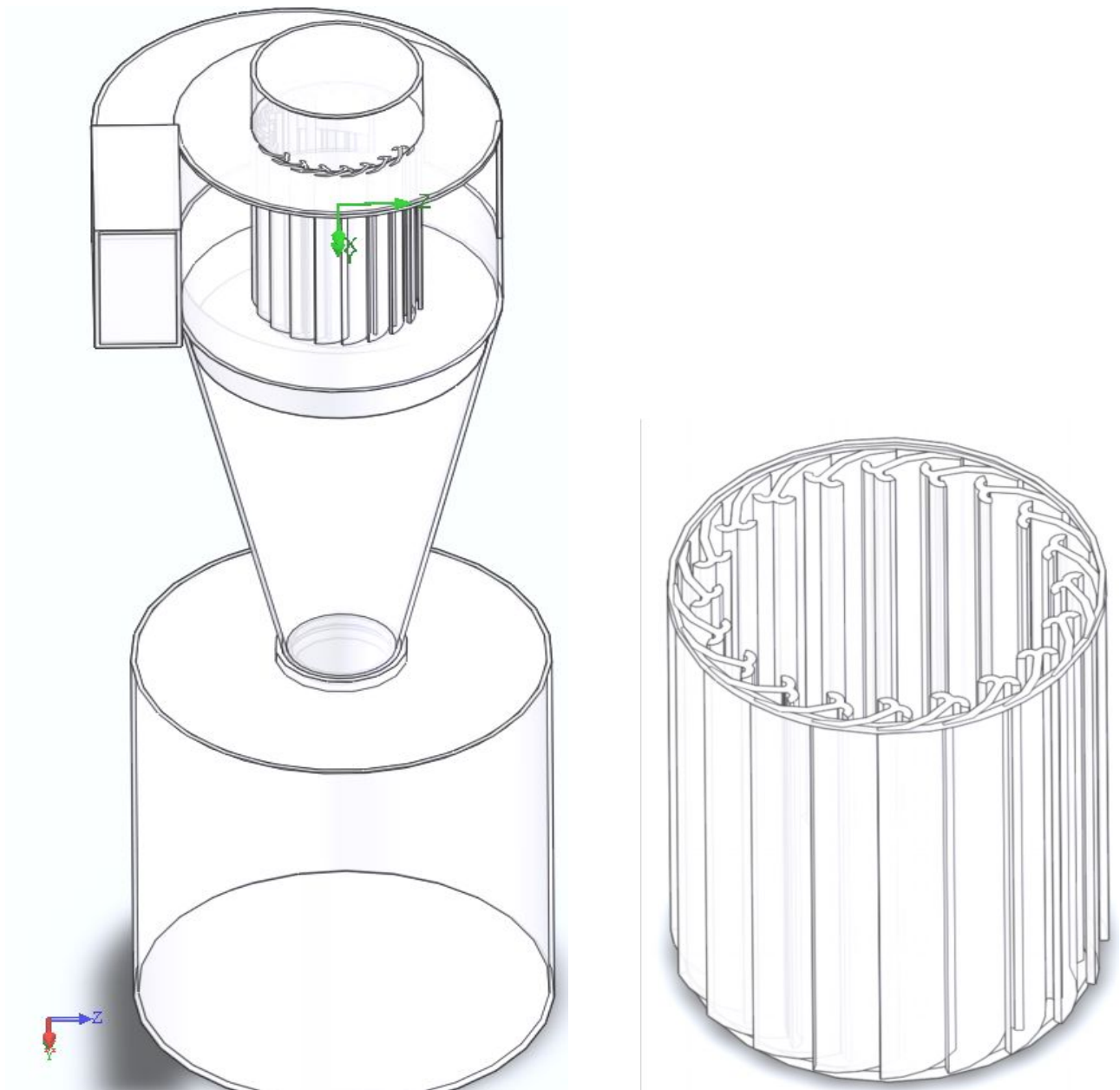


Рис. 3.2. Модель нової конструкції апарата (тривимірна геометрична модель апарата)

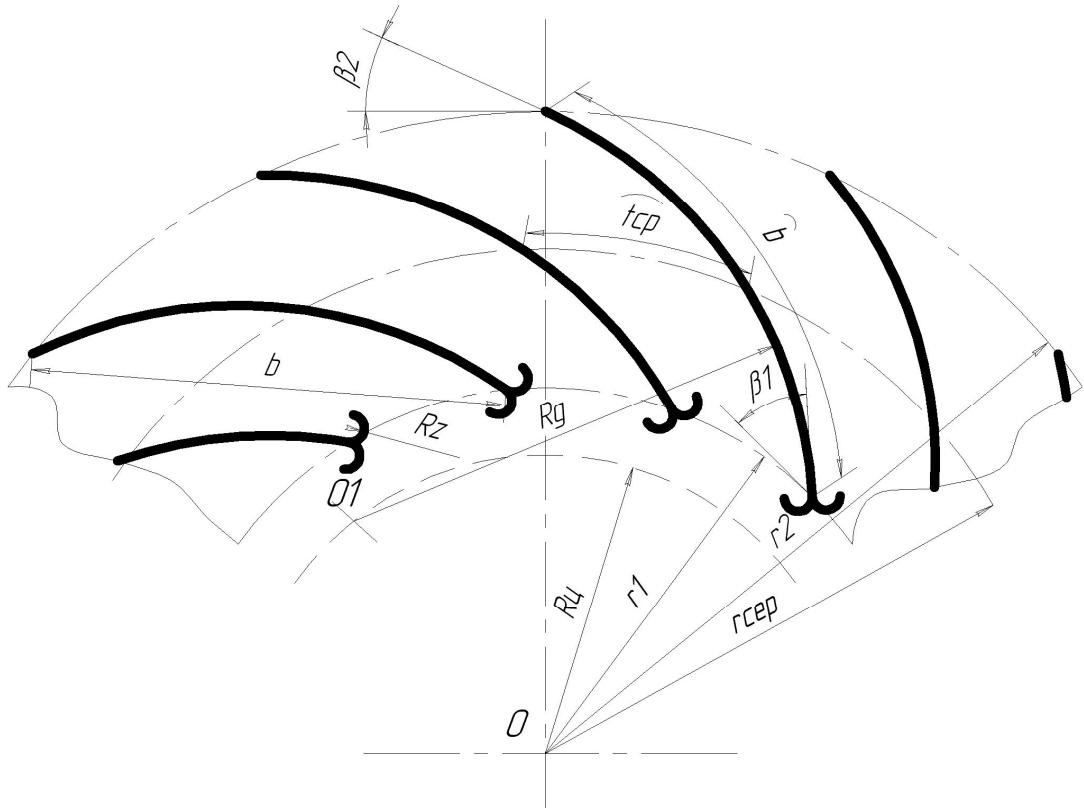


Рис. 3.3. Схема жалюзійного відокремлювача

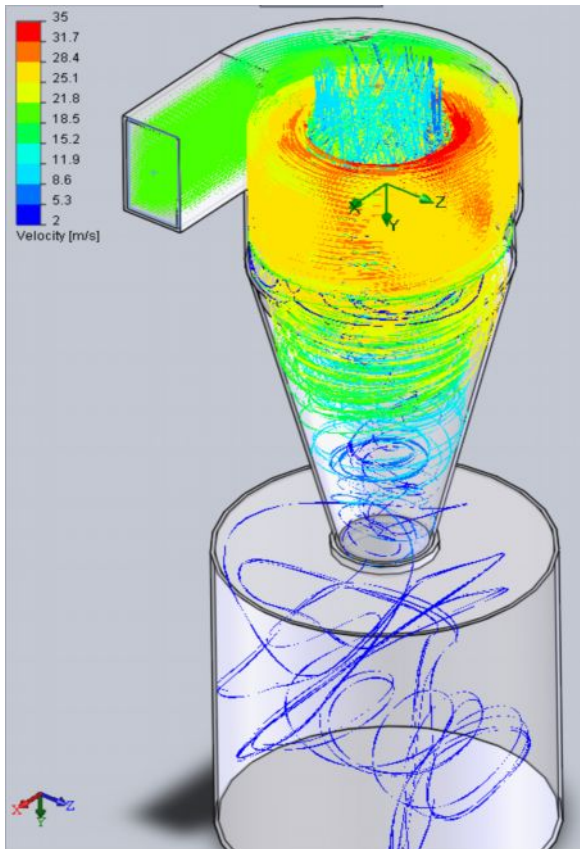


Рис. 3.4. Траєкторії руху повітряних потоків в пиловловлювачі

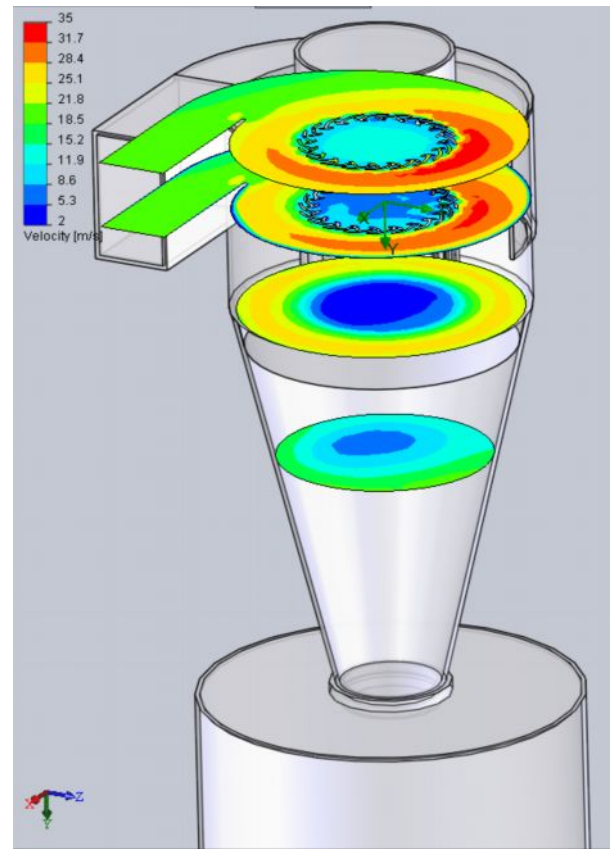


Рис. 3.5. Значення швидкості повітряного потоку в горизонтальних перерізах пиловловлювача

На рис. 3.4 наведені траєкторії руху повітряних потоків у запропонованому пиловловлювачі (значення швидкості повітряного потоку відображено кольором траєкторії). На рис. 3.5 представлений розподіл швидкостей потоку повітря у горизонтальних перерізах пиловловлювача.

Аналіз реалізації математичної моделі руху пилоповітряного потоку у відцентрово-інерційних пиловловлювачах (рис. 3.4 і 3.5) дозволяє відзначити, що найвищою є швидкість потоку повітря у верхій частині циліндричного корпусу пиловловлювача зразу після входу потоку в апарат і вона лишається майже незмінною вздовж всієї довжини жалюзійного відокремлювача. Треба відмітити, що максимальної величини в цій частині корпусу в горизонтальній площині вона досягає приблизно посередині простору, утвореного циліндричним корпусом апарата і жалюзійним відокремлювачем. Всередині жалюзійного відокремлювача швидкість зразу ж падає (після проходження через щілини між пластинами жалюзі відокремлювача), а з опусканням потоку вздовж осі апарата вниз швидкість його руху зменшується, як в корпусі апарата, так і в середині відокремлювача внаслідок виходу частини повітря через жалюзійний відокремлювач вгору у патрубок виходу очищеного повітря і через нього і вентилятор в атмосферу. Найнижчі швидкості потоку зафіксовані на осі апарата і вони також зменшуються в напрямку зверху вниз, що пояснюється викидом очищеного повітря через патрубок виходу очищеного повітря вгору. Тобто, входячи в пиловловлювач зі швидкістю 18 – 20 м/с пилоповітряний потік у корпусі починає рухатися вже зі швидкістю 21,5 – 34 м/с, зменшуючи цю величину, як зверху вниз, так і при проходженні через щілини між жалюзі і в середині жалюзійного відокремлювача. У кінчній частині корпусу апарата вже при підході до бункера і в самому бункері усі швидкості руху досягають свого мінімального значення.

Проаналізувавши наведені на рис. 3.4 траєкторії руху повітряних потоків і на рис. 3.5 розподіл швидкостей потоку повітря в горизонтальних перерізах у запропонованому пиловловлювачі, ми отримали цікаві і конче необхідні для подальшої роботи по проектуванню пиловловлювачів принципово нового типу,

залежності швидкостей і траєкторій руху потоку в різних перерізах апарата від його конструктивних і геометричних параметрів. Проведені дослідження дозволять нам спроектувати пиловловлювач з чітко обмеженими його конструктивними розмірами, які визначаються швидкостями руху повітряного потоку в залежності від необхідних для покращення ефективності роботи апарата параметрами.

На рис. 3.6 наведено тангенціальні, а на рис. 3.7 – осьові складові швидкості потоку повітря в корпусі запропонованого нами пиловловлювача. З рис. 3.6 видно, що при русі повітряного потоку після входу в апарат тангенціальна складова зменшується в напрямку від стінки корпусу апарата до жалюзійного відокремлювача, що може бути пояснено дією «завитків».

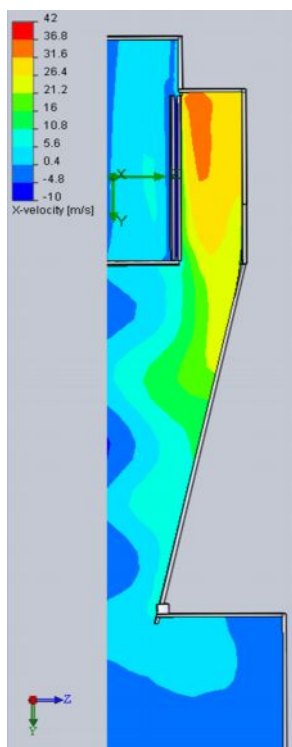


Рис. 3.6. Тангенціальна складова швидкості повітряного потоку в пиловловлювачі

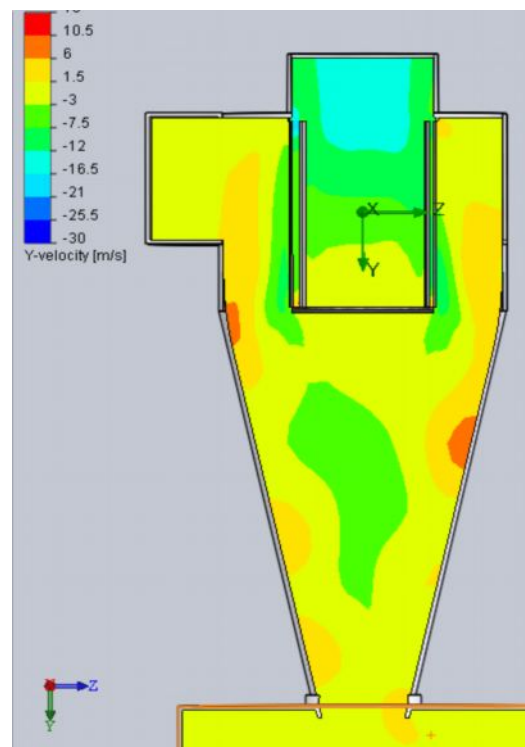


Рис. 3.7. Осьова складова швидкості повітряного потоку в пиловловлювачі

На рис. 3.7 видно, що поблизу зовнішньої стінки корпусу апарата осьова

складова швидкості повітряного потоку направлена вниз, що сприяє винесенню відсепарованих частинок пилу до бункера. У жалюзійному відокремлювачі осьова складова швидкості повітряного потоку направлена вгору і її значення зростає у напрямку від дна відокремлювача до виходу наверх через патрубок виходу очищеного повітря і вентилятор назовні.

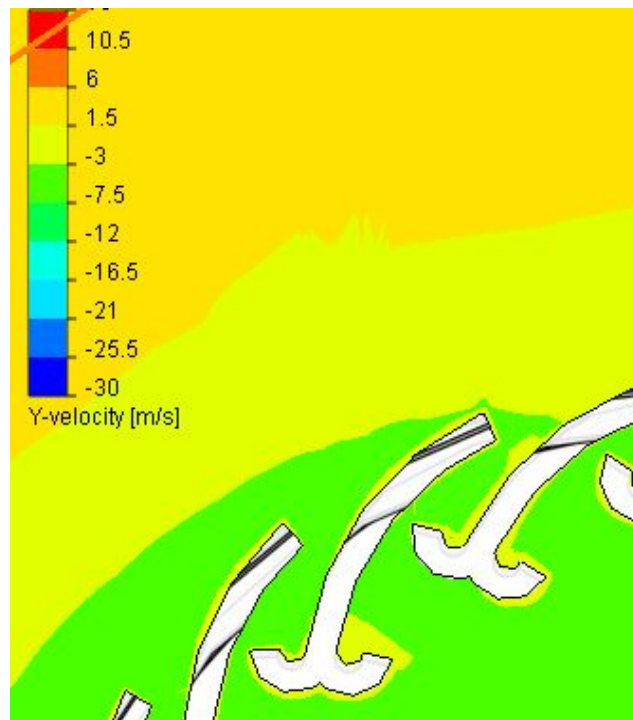


Рис. 3.8. Осьова складова швидкості повітряного потоку в жалюзійному відокремлювачі

Рис. 3.8 пояснює рух повітряного потоку в зоні дії жалюзі відокремлювача та всередині його. При підході до жалюзійного відокремлювача ще при русі його в просторі, утвореному корпусом апарата та відокремлювачем, швидкість потоку дещо знижується в напрямку до відокремлювача і досягає свого мінімального значення при підході до жалюзі. Поблизу «завитків» жалюзі, вздовж самих жалюзі вже при підході до завитків її значення є дещо вищим, що буде сприяти концентруванню в «завитках» найбільш дрібної фракції, яку бажано якось вивести з середини завитків жалюзі та видалити в напрямку до бункера. Тому вважаємо доцільним з цією метою подавання на «завитки» води,

яка крім того змочить цей пил і протранспортує його по відокремлювачу зверху вниз в його конічне дно і не дасть змоги пилу знов піднятися вгору, а це в свою чергу приведе до підвищення ефективності процесу вловлювання пилу.

Розподіл статичного тиску в плоских перерізах пиловловлювача наведено на рис. 3.9, який також добре ілюструє процес зниження статичного тиску в апараті при русі його від стінки корпусу до жалюзійного відокремлювача та значне стабільне зниження його всередині жалюзійного відокремлювача. Картина розподілу статичного тиску в плоских перерізах пиловловлювача аналогічна з розподілом швидкості руху повітряного потоку в горизонтальних перерізах пиловловлювача (рис. 3.5), про що вже було пояснено вище.

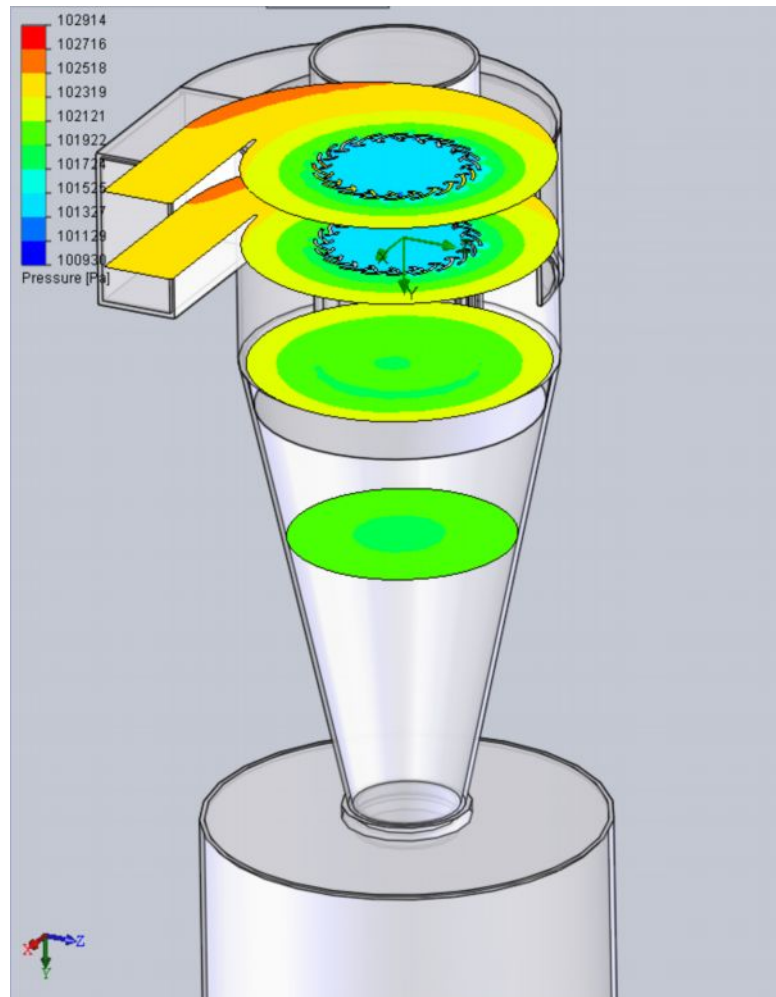


Рис. 3.9. Розподіл статичного тиску в пиловловлювачі

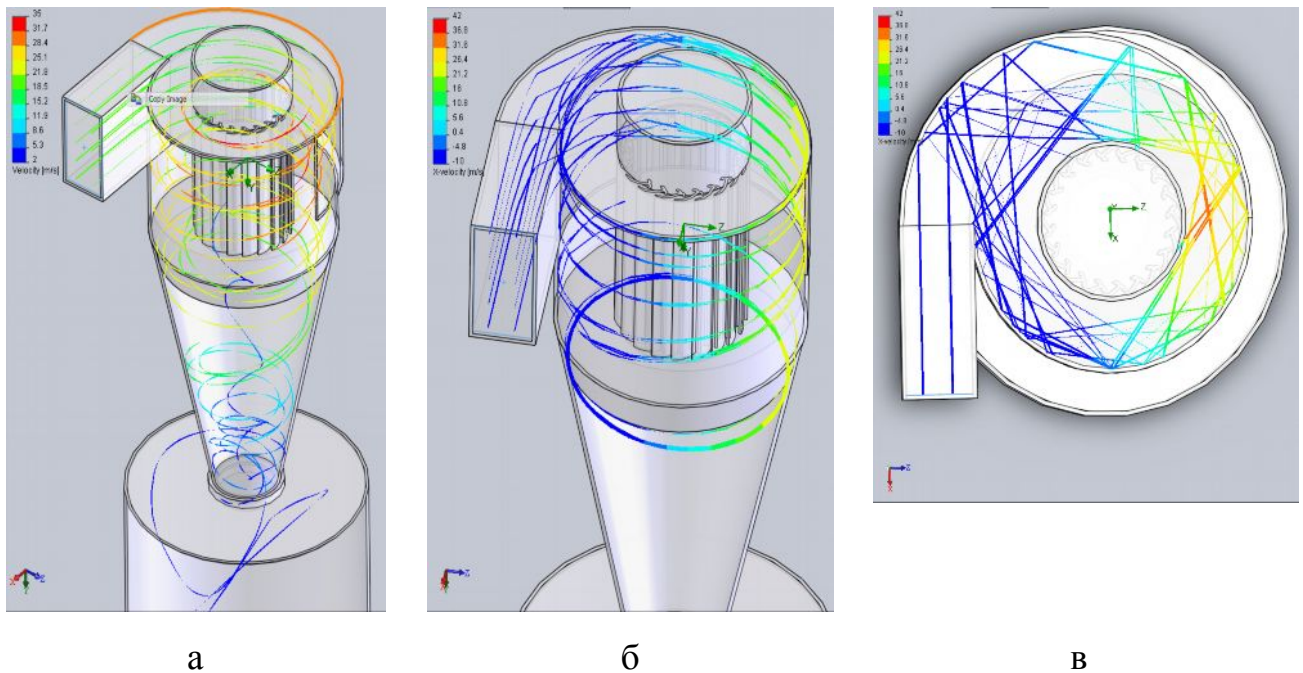


Рис. 3.10. Траєкторії руху пилу у відцентрово-інерційному пиловловлювачі діаметром:

а – $8 \cdot 10^{-6}$ м; б – $32 \cdot 10^{-6}$ м; в – $50 \cdot 10^{-6}$ м

Траєкторії руху пилу наведено на рис. 3.10 для частинок пилу діаметром $8 \cdot 10^{-6}$ м (а), $32 \cdot 10^{-6}$ м (б), $50 \cdot 10^{-6}$ м (в), з яких можна зробити висновок, що у загальному вигляді процес очищення повітря у запропонованих апаратах відбувається наступним чином. Пилоповітряна суміш тангенціально поступає в корпус апарата через вхідний патрубок і продовжує свій рух зверху вниз до пиловипускного патрубку, не змінюючи напрямку свого руху. На вході в апарат пилоповітряна суміш рухається прямолінійно, запиленість газового потоку по розрізу апарата 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, але концентрації частинок пилу в периферійній зоні корпусу перешкоджає явище рикошетування частинок у результаті їх стикання зі стінкою.

Внаслідок цього, при великій швидкості потоку збільшується початкова швидкість обертання частинки, її підймальна сила і величина радіального

переміщення під впливом цієї сили, а при цьому рух окремих відбитих від стінки частинок амортизується частинками, які рухаються до стінки, і це відбувається у всьому потоці. Таким чином, на цій ділянці проходить первинний пошаровий розподіл потоку, причому, найбільш забрудненим шаром, який несе найбільші частинки, є шар біля зовнішньої стінки, а найбільш чистим – шар, який протікає вздовж жалюзійного відокремлювача. Для здійснення процесу розділення пилогазового потоку під дією відцентрових сил достатньо половини обертання потоку навколо патрубка виходу очищеного повітря.

В подальшому очищений від великодисперсного пилу потік змінює напрямок свого руху для проходження через щілини між пластинами жалюзі відокремлювача і кут цього повороту знаходиться у межах $90^\circ < \alpha < 180^\circ$.

На ділянці розташування жалюзійного відокремлювача на частинки пилу продовжує діяти відцентрова сила, яка намагається відкинути їх до зовнішньої стінки корпусу апарата, але її вплив ослаблений через наявність радіального руху потоку до центру апарата через пластини жалюзі, який передусім, впливає на найбільш дрібні частинки і на частинки пилу, які 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, будучи захоплені радіальним потоком, стануть рухатися до центра апарата. Шари пилоповітряної суміші, які підходять до жалюзійного відокремлювача, (завдяки конструкції жалюзі) обходять жалюзі з дуже малим кутом атаки (кутом між напрямком руху повітря і площиною кожного жалюзі). Тверді частини пилу, захоплені радіальною течією потоку, вдаряються в жалюзі відокремлювача, відбиваються від нього, 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 апарата в бункер. Очищений таким чином пилоповітряний потік проходить через отвори між жалюзі, а частинки пилу, які виділяються з нього при цьому або відбиваються до стінки корпусу, або

сповзають по жалюзі вниз аж до пиловипускного патрубку в бункер. Частинки пилу діаметром $8 \cdot 10^{-6}$ м (а) є дрібними і траєкторії їх руху близькі до траєкторій руху повітря, тому вони разом із повітряним потоком потрапляють у жалюзійний відокремлювач. Більш великі частинки пилу розміром $32 \cdot 10^{-6}$ м (б) після вхідного патрубку рухаються до стінки корпусу апарата, відбиваються від неї і при цьому втрачають швидкість. Зі збільшенням розміру частинки до $50 \cdot 10^{-6}$ м (в) збільшується інтенсивність відбивання частинки від стінки.

Дуже важливою характеристикою, яка визначає характер процесу виділення пилу з пилоповітряного потоку є гідравлічний опір (Δp) пиловловлювача, який визначали як різницю повних тисків у вхідному патрубку та на виході з патрубку виходу очищеного повітря. Визначивши Δp при різних значеннях швидкості повітряного потоку у вхідному патрубку ми побудували аеродинамічні характеристики пиловловлювача (рис. 3.11), з яких витікає, що при збільшенні швидкості потоку у вхідному тангенційному патрубку гідравлічний опір різко збільшується, причому, дуже важливо для нас визначити оптимальне значення цієї швидкості.

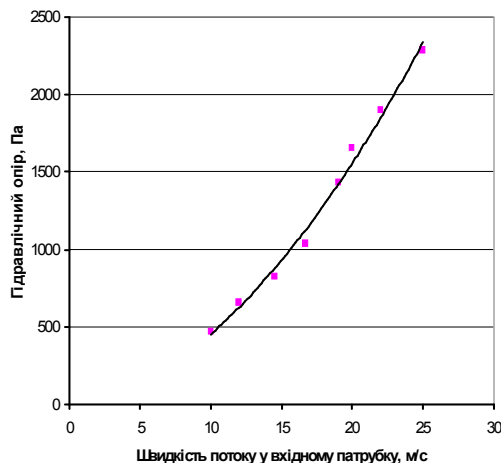


Рис. 3.11. Аеродинамічні

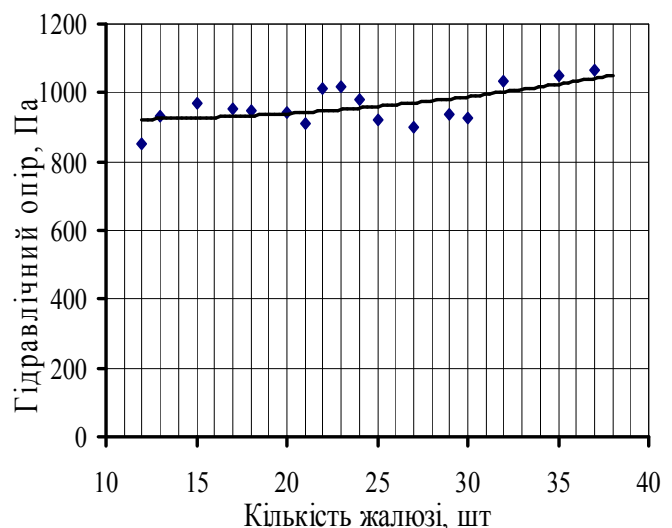


Рис. 3.12. Залежність гідравлічного опору

характеристики пиловловлювача від кількості жалюзі у жалюзійному відокремлювачі

Це значення має бути мінімально можливим для отримання максимальної

ефективності роботи пиловловлювання і при цьому не збільшувати енергоємність установки пилоочищення.

При дослідженні впливу кількості жалюзі жалюзійного відокремлювача на гідравлічний опір пиловловлювача одержали залежність, яка наведена на рис. 3.12, при швидкості потоку повітря у вхідному патрубку 18 м/с. Використання жалюзійного відокремлювача з кількістю жалюзі $z_p < 12$ є недоцільним, оскільки при цьому значно зростає крок жалюзі t_p , що в свою чергу призводить до збільшення гідравлічного опору апарата та зниження ефективності його роботи. При збільшенні числа жалюзі від 12 до 15 гідравлічний опір пиловловлювача Δp зростає до значення $\Delta p \approx 990$ Па, що пояснюється недостатньою площею живого перерізу жалюзійного відокремлювача для того, щоб необхідна кількість пилоповітряного потоку пройшла через нього. При збільшенні числа жалюзі від 15 до 21 гідравлічний опір пиловловлювача Δp спадає до значення $\Delta p \approx 950$ Па і до $z_p = 21$ і є практично сталим, що пояснюється стабільним співвідношенням кількості повітря, яке поступає в пиловловлювач і його кількостю, яка вийшла через жалюзійний відокремлювач назовні. При кількості жалюзі 22 – 24 опір апарата різко зростає до значення $\Delta p = 1020$ Па, що може бути пояснено виникненням повітряних потоків у жалюзійному відокремлювачі особливо у щілинах між жалюзі і їх завитків.

Коли кількість пластин жалюзі $z_p = 25 - 30$, гідравлічний опір циклона повертається до значення $\Delta p \approx 950$ Па. При збільшенні z_p понад 30 гідравлічний опір знову починає зростати, що може бути пояснено значним зменшенням щілини між жалюзі. Таким чином, як вказувалось вище, виникає необхідність визначення оптимальної кількості жалюзі z_{p0} , при якій гідравлічний опір циклона буде мінімальним при достатній його ефективності. Значення z_{p0} залежить від продуктивності апарата та співвідношення геометричних розмірів жалюзійного відокремлювача. У розглянутому прикладі різниця між гідравлічним опором Δp циклона при $z_p = 21$ та $z_p = 22$ становить 18% (Додаток Б), тому з метою зниження енерговитрат на очищення при проведенні

експериментів необхідно дослідити ефективність використання жалюзійного відокремлювача зі змінним кроком жалюзі.

3.6. Висновки

У результаті проведення комп'ютерного моделювання руху пилоповітряних потоків у циклонному апараті з жалюзійним відокремлювачем та експериментальних досліджень апарата одержано наступні основні результати:

1. Вперше побудована тривимірна модель циклонного апарата із жалюзійним відокремлювачем, аналіз якої, на основі методів скінчених елементів та рівнянь Нав'є-Стокса, дав змогу розкрити фізичну суть руху повітряних потоків у новій конструкції пиловловлювача, значно знизити кількість експериментальних досліджень і провести їх більш цілеспрямовано.

2. Підтверджено доцільність застосування САПР Cosmos Floworks для моделювання руху повітряних потоків у сепараторах нового типу (похибка між змодельованими та експериментальними результатами не перевищує 8 –15%).

3. Обґрунтовано ефективність використання жалюзійного відокремлювача зі спеціальною формою жалюзі.

4. Теоретичним шляхом визначено ефект зниження гідравлічного опору апарата на 9 – 18 % в порівнянні з циклоном при швидкостях більших за 18 м/с, через установаження жалюзійного відокремлювача.

5. Доведено, що перепад статичного тиску в сепараційній зоні пиловловлювача з жалюзійним відокремлювачем у 4 – 12 разів менший у порівнянні з аналогічним циклоном з традиційною вихлопною трубою.

6. Встановлення жалюзійного відокремлювача підвищує ефективність роботи пиловловлювача на 5 – 7 % при зниженні швидкості руху потоку повітря у вхідному патрубку від 18 – 20 м/с до 11 – 16 м/с, а гідравлічний опір апарата при цьому знижується порівняно з еталоном у 1,5 – 1,9 рази.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОСТВОРЕНИХ ВІДЦЕНТРОВО-ІНЕРЦІЙНИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ

Експериментальні дослідження пиловловлювачів [114] були поділені на декілька етапів: 1 етап – експериментально досліджували вплив жалюзі на аеродинаміку руху повітряних потоків у пиловловлювачі в лабораторних умовах; 2 етап – дослідження ефективності і гідравлічного опору запропонованих конструкцій пиловловлювача при очищуванні повітря від стандартного пилу (кварцовий пісок) на експериментальному стенді; 3 етап – досліджували ефективність роботи новостворених пиловловлювачів при очищуванні потоку повітря від пилу металургійного виробництва на дослідно-промисловій установці. Така послідовність дала змогу найбільш повно дослідити нову конструкцію циклона, порівняти її з відомими апаратами та оцінити доцільність застосування такого пиловловлювача при очищенні повітря за умов металургійного виробництва.

Метою аеродинамічних досліджень пиловловлювачів є: визначення гідравлічного опору апарата; оцінка впливу елементів конструкції пиловловлювача на його характеристики; встановлення закономірностей розподілу тисків у перерізі сепараційної зони апарата.

Для того, щоб уявити, яке місце займуть створені нами пиловловлювачі у загальному колосальному ряді існуючих сьогодні апаратів їх необхідно дослідити, звівши шляхом порівняльних випробовувань до невеликого конкретного ряду за їх ефективністю, гідравлічним опором і металоємністю, при однакових енергетичних витратах і витратах повітря, згідно з „Єдиною методикою порівняльних випробувань пиловловлювачів”, яка охоплює питання приготування експериментального пилу, визначення фізико-хімічних і морфометричних його властивостей, методів запилення повітря, що подається у пиловловлювач, ступеня деагломерації пилу при штучному знепилюванні

повітря, яка визнана обов'язковою при дослідженнях новостворених апаратів аналогічного призначення.

Досліди проводились на кварцовому пилу з медіанним діаметром (8, 16, 32 та 50)·10⁻⁶ м, при витратах повітря 1000 – 4000 м³/год. Наважка пилу, що подавалась в пиловловлювач, який досліджували, дорівнювала 1,0 кг при тривалості досліду не менше 10 хвилин. Всі експерименти повторювалися по 5 разів при розбіжності результатів не більше як 5%.

На сьогоднішній день для забезпечення санітарно-гігієнічних вимог [115] охорони праці та довкілля в сучасному металургійному виробництві не існує апаратурної підтримки для створення норм викидів шкідливих речовин. Тому нами була поставлена мета створити установки, які здатні високоефективно вловлювати дрібнодисперсний пил.

Для вирішення цієї задачі ми зупинилися на конічній формі корпусу, запропонованій в [113, 116] з додержанням визначених конструктивних розмірів (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

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

В запропонованих нами конструкціях: по-перше – відцентрове очищення пилоповітряного потоку після входу його в апарат проводиться під дією відцентрових сил відомим способом аналогічного циклону, по-друге – розташування корпусу апарата коаксіально осі жалюзійного відокремлювача, як другого ступеня очистки, по-третє – певна форма жалюзі відокремлювача, як третього ступеня очищення, і по-четверте – додаткове доочищення повітря від дрібнодисперсного пилу після очищення в жалюзійному відокремлювачі за рахунок подачі води на внутрішню поверхню жалюзі. Таким чином ми

отримали апарати, в яких здійснюється чотирьохступеневе очищення повітря від пилу. Всі запропоновані апарати захищені патентами України й відмінною особливістю їх є «ноу-хау».

У загальному вигляді процес очищення повітря в запропонованих апаратах відбувається наступним чином (рис. 4.1). Пилоповітряна суміш тангенціально поступає в дільницю 1 корпусу апарата через вхідний патрубок 2 і продовжує свій рух зверху вниз до пилівипускного патрубку 3, не змінюючи напрямку свого руху. На вході в апарат пилоповітряна суміш рухається прямолінійно, запиленість газового потоку по перерізу апарата залишається практично рівномірною і швидкість руху частинок пилу дорівнює швидкості входу газового потоку в апарат.

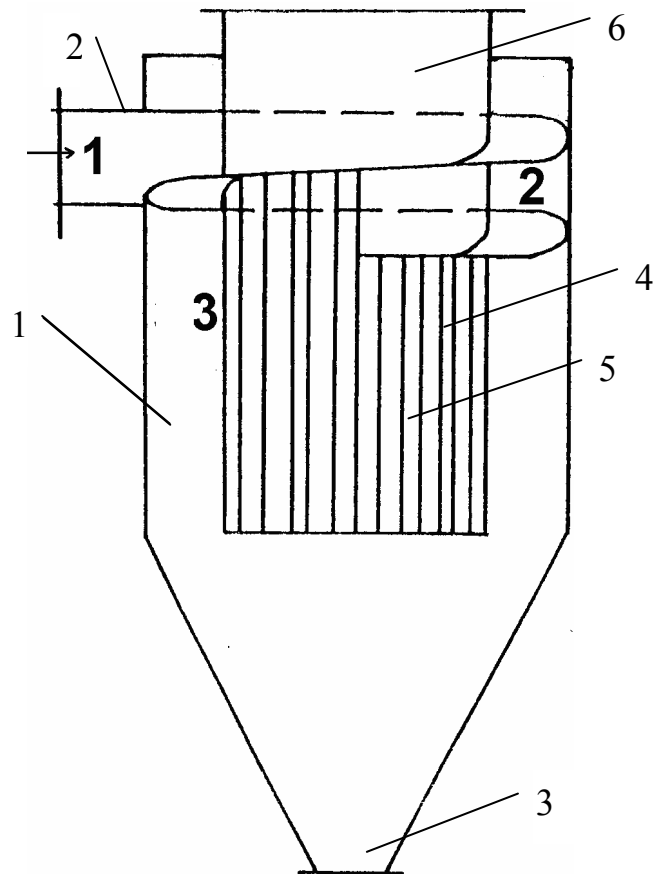


Рис. 4.1. Відцентрово-інерційний пиловловлювач

На наступному етапі руху 2 донизу під дією відцентрової сили тверді частинки відкидаються до зовнішньої стінки апарата, але концентрації частинок пилу в периферійній зоні корпусу перешкоджає явище рикошетування частинок

в результаті їх стикання зі стінкою. Внаслідок цього, при великій швидкості потоку збільшується початкова швидкість обертання частинки, її підймальна сила і величина її радіального переміщення під впливом цієї сили, а при цьому рух окремих відбитих від стінки частинок амортизується частинками, які рухаються до стінки, і це відбувається в усьому потоці. Таким чином, на ділянці 2 проходить первинний пошаровий розподіл потоку, причому, найбільш забрудненим шаром, який несе найбільші частинки є шар біля зовнішньої стінки, а найбільш чистим – шар, який протікає вздовж жалюзійного відокремлювача 4. Нами доведено, що для здійснення процесу розділення потоку під дією відцентрових сил достатньо половини обертання потоку навколо патрубка виходу очищеного повітря.

На ділянці 3, очищений від великодисперсного пилу потік змінює напрямок свого руху для проходження через щілини між жалюзі 5 відокремлювача 4 і кут цього повороту дорівнює $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, на частинки пилу продовжує діяти відцентрова сила, яка намагається відкинути їх до зовнішньої стінки корпусу апарата, але її вплив ослаблений через наявність радіального руху потоку до центра апарата через жалюзі, який передусім, впливає на найбільш дрібні частинки і на частинки пилу, які рухаються з внутрішньою частиною потоку. Залежно від того, яка сила перемагає, відцентрова чи радіальна, частинки пилу або будуть продовжувати рухатись по обертовій гвинтовій траєкторії вздовж корпусу апарата зверху вниз, або, будучи захоплені радіальним стоком, почнуть рухатися до центра апарата. Шари пилоповітряної суміші, які підходять до жалюзійного відокремлювача, (завдяки конструкції жалюзі) обходять жалюзі з дуже малим кутом атаки (кутом між напрямком руху повітря і площиною кожного жалюзі). Тверді частини пилу, захоплені радіальною течією потоку, стикаються з жалюзі відокремлювача, відбиваються від нього, підхоплюються рухомим потоком, стикаються з наступною жалюзі і т.д., аж доки не потраплять в потік, який рухається вздовж зовнішньої стінки і транспортує їх до виходу з апарата 3 в бункер (на кресленні не показаний). Пилоповітряний потік проходить через отвори між жалюзі 5, а

частинки пилу виділені з нього при цьому або відбиваються до стінки корпусу 1, або сповзають по пластині жалюзі 5 вниз аж до пиловипускного патрубку 3. Для очищення повітря, яке пройшло через отвори між жалюзі 5 всередину жалюзійного відокремлювача 4, на внутрішню сторону жалюзі 5 подається вода, яка транспортує виділений при цьому пил по їх поверхні вниз знов до пиловипускного патрубку 3, а через нього – в бункер апарата.

4.1. Опис новостворених апаратів

Метою роботи є обґрунтування доцільності заміни недостатньо ефективної та енерго- і металоємної системи очистки повітря від пилу в процесах транспортування шихти на більш досконалу та ефективну систему сухого

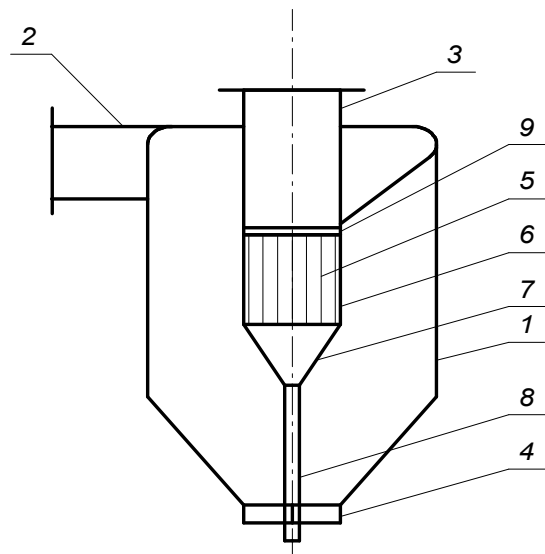


Рис. 4.2. Пиловловлювач зі змоченими жалюзі (апарат I):

1 – корпус, 2 – вхідний патрубок, 3 – вихідний патрубок чистого повітря, 4 – патрубок виходу пилу, 5 – жалюзійний відокремлювач, 6 – жалюзі, 7 – конічне дно, для збору пиловодяної суміші, 8 – трубопровід, 9 – форсунки для води

очищення, яка складається з відцентрово-інерційних апаратів пилоочищення, що містять в одному корпусі пиловловлювача одночасно чотири ступеня очищення: відцентровий, інерційний (під час проходження через жалюзі жалюзійного відокремлювача), в самому жалюзі і мокрий.

Нами запропонована конструкція пиловловлювача зі змоченим жалюзі (рис. 4.2, 4.3), в якому очищення повітря від пилу забезпечується таким жалюзійним відокремлюва-

чем, змочування внутрішньої поверхні жалюзі якого, дозволяє виділити з уже очищеного пилогазового потоку найдрібніші фракції і за рахунок цього

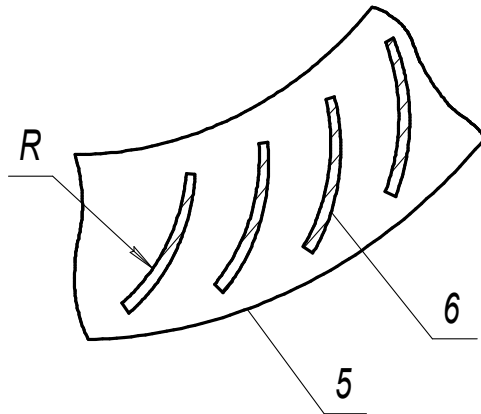


Рис. 4.3. Переріз жалюзійного відокремлювача:

5 – жалюзійний відокремлювач, 6 – пластини жалюзі

збільшити ефективність роботи апарата (в подальшому апарат І) [117].

Пилоповітряна суміш через вхідний патрубок 2 уводиться тангенціально в простір, утворений корпусом апарата 1 і жалюзійним відокремлювачем 5, де за рахунок дії відцентрових сил поділяється на два гвинтоподібних потоки: перший – вздовж стінки корпусу 1, другий – навколо

жалюзійного відокремлювача 5. Великодисперсні частинки пилу відцентровою силою відкидаються до стінки 1 корпусу апарата і під дією сил ваги гвинтоподібно опускаються вздовж неї вниз у напрямку патрубка виходу пилу 4. Таким чином, відбувається перша ступінь очищення. У другому потоці частинки пилу через наявність сил інерції не встигають за рухом повітря, яке круто повертає в щілини між жалюзі 6 відокремлювача, попадають на жалюзі 6, відбиваються від нього доти, доки не відіб'ються до стінки корпусу апарата 1 і не підхопляться першим потоком, що рухається до пилівипускного патрубка 4. Таким чином відбувається друга ступінь очищення.

Очищений від грубодисперсного пилу потік, очищується додатково в другій ступені очищення – жалюзійному відокремлювачі 5, де проходить через щілини між жалюзі 6 всередину відокремлювача 5. Внутрішня поверхня жалюзі 6 зі сторони, яка обернена до осі апарата, розташована по радіусу R (рис. 4.3) і це сприяє відбиванню дрібних частинок пилу назад у корпус апарата. Таким чином відбувається третя ступінь очищення. Далі пилоповітряний потік попадає під дію четвертої ступені очищення – потоку

води, який рухається вздовж жалюзі по його внутрішній стороні. Вода подається через систему водопостачання (на кресленні не показана) до форсунок для води 9, через які розпилюється на внутрішню поверхню (яка повернута до осі апарата) жалюзі 6 відокремлювача 5, після чого опускається зверху вниз по внутрішній поверхні жалюзі і при цьому захоплює дрібнодисперсні частинки пилу, які несуться разом із потоком, і транспортує їх вниз в менший конусоподібний бункер для збору пиловодяної суспензії, звідки через патрубок 8 – у загальний бункер (на кресленні не показаний).

Перевагою запропонованого пиловловлювача є те, що він має четверту ступінь очищення – мокру очистку.

У запропонованій конструкції апарата мокре доочищення повітря водою, що рухається по внутрішній стороні жалюзі 6 дозволяє виділити з потоку найдрібніші частинки пилу, які є найнебезпечнішими і звичайно, тим самим збільшити ефективність пиловловлювання.

Важливе значення для відбивання дрібних частинок пилу назад в корпус апарата і запобігання їх проскакуванню всередину жалюзійного відокремлювача є радіус жалюзі 6. З цією метою на кварцовому піску з медіанним діаметром $(8, 16, 32, 50) \cdot 10^{-6}$ м було досліджено 7 типів жалюзі відокремлювача розміром $(20, 22, 24, 26, 28, 30, 32) \cdot 10^{-3}$ м (додаток В), результати яких наведені на рис. 4.4.

Наведені дані доводять, що оптимальним є радіус жалюзі, який дорівнює $24 \cdot 10^{-3}$ м, що легко можна пояснити. При зменшенні цього радіусу частинки пилу будуть відбиватися просто на поверхню попереднього жалюзі і відбиватися від нього знов на ці ж жалюзі, тобто частинка пилу буде скакати всередині щілини між жалюзі доти, доки не попаде всередину відокремлювача. При збільшенні цього радіусу частинки пилу зразу ж будуть відбиватися всередину відокремлювача. В обох випадках це призводить до зниження ефективності роботи пиловловлювача.

Важливе значення для запобігання захоплення частинок води повітряним потоком, який рухається до патрубку виходу очищеного повітря 3, і

виключення розбризкування води, є форма жалюзі б. З цією метою було досліджено 2 типи жалюзі відокремлювача: перший – жалюзі пряма, другий – поверхня жалюзі зі сторони, яка обернена до осі апарата, розташована по радіусу R , який дорівнює $24 \cdot 10^{-3}$ м (табл. 4.2).

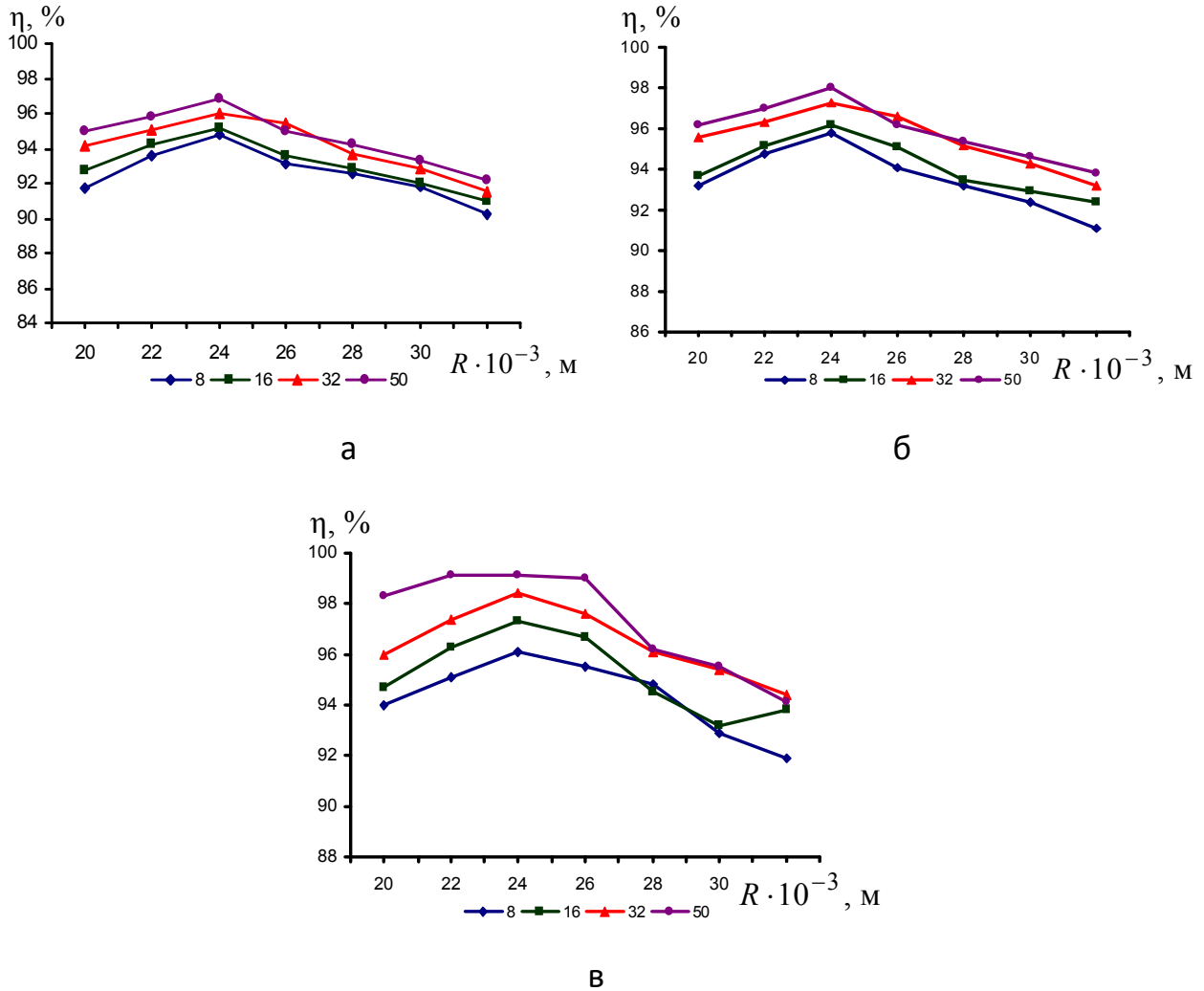


Рис. 4.4. Визначення оптимальної величини радіусу жалюзі відокремлювача І типу для медіанного діаметру (8, 16, 32 і 50) $\cdot 10^{-6}$ м при витратах повітря: а) 1000 $\text{м}^3/\text{год}$; б) 2000 $\text{м}^3/\text{год}$; в) 3000 $\text{м}^3/\text{год}$

Таблиця 4.2

Визначення ефективності пиловловлювачів

Витрати повітря, $\text{м}^3/\text{год}$.	Ефективність пиловловлювача, %	
	Жалюзі першого типу	Жалюзі другого типу
1	2	3

1	2	3
1000	95,1	96,8
2000	96,3	98,0
3000	96,9	99,0

Таку різку різницю в ефективності пиловловлення можна пояснити тим, що в першому варіанті виконання, жалюзі по-перше відштовхують частинки води в середину (в напрямку від осі апарата), звідки вона підхоплюється потоком і виноситься з апарата разом із великодисперсним пилом, а по-друге – при гвинтоподібному русі пилоповітряного потоку в середині жалюзійного відокремлювача 5 він обтікає внутрішню поверхню жалюзі 6, змочується сам і виноситься вгору в патрубок виходу очищеного повітря, зменшуючи і навіть знищуючи при цьому ефект очищування повітря від дрібнодисперсного пилу, а тим самим різко зменшуючи ефективність його роботи. При другому варіанті виконання жалюзі (по радіусу) потік води рухається по внутрішній поверхні жалюзі зі сторони, яка обернена до осі апарата, змочуючи її і весь дрібнодисперсний пил, який попадає на цю частину жалюзі, тобто відділяє його від основної маси очищеного повітря і транспортує його зверху вниз у напрямку до пиловипускного патрубку 4, тобто сприяє підвищенню ефективності роботи пиловловлювача.

У наведеній конструкції пиловловлювача крім не дуже високої ефективності роботи виникає ще нова проблема – проблема очищування води, яка у більшості випадків ще складніша ніж проблема очищування повітря. Тому нами запропонований апарат [118] (в подальшому апарат II), в якому система доочищування повітря від дрібнодисперсного пилу також забезпечується змочуванням внутрішньої поверхні жалюзі відокремлювача, що дозволяє виділити з уже очищеного пилогазового потоку найдрібніші фракції і протранспортувати їх зверху вниз у напрямку до пиловипускного патрубку у конічне дно відокремлювача, але запропонована конструкція вже забезпечена фільтром для очищування води від пилу, який вона вбрала в себе, звідки

очищена вода насосом через систему трубопроводів знов подається у верхню частину жалюзійного відокремлювача примусово до форсунок для води, розташованих на рівні нижнього краю патрубку для виходу очищеного повітря, і все це разом дозволяє збільшити ефективність роботи апарата (рис. 4.5).

Процес очищування повітря від пилу відбувається аналогічно тому, як це проходить у конструкції апарата, представленій на рис. 4.2 та 4.3, але процес подачі та видалення води для четвертої ступені очищування відбувається наступним чином.

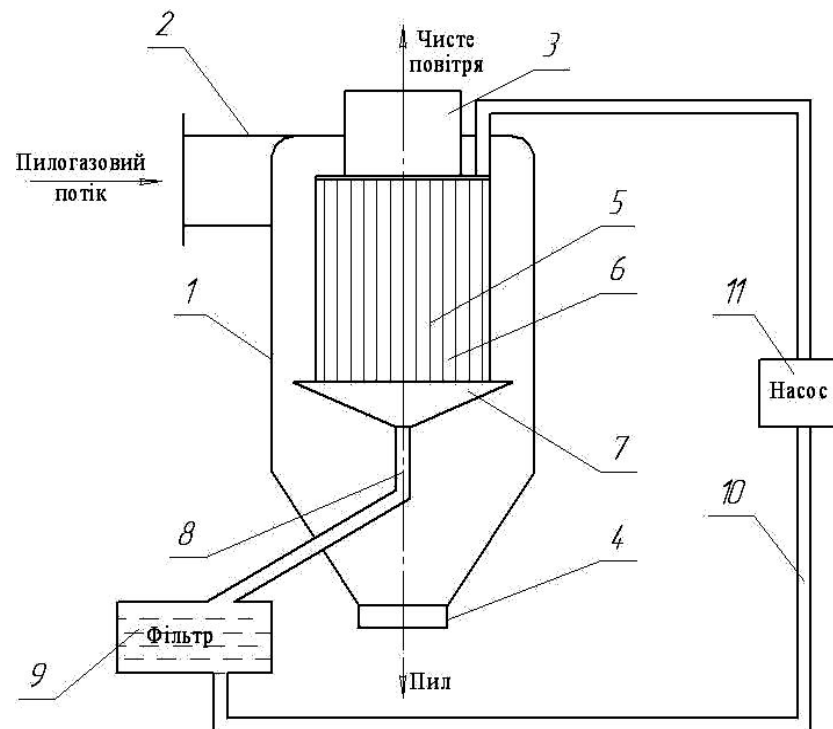


Рис. 4.5. Пиловловлювач II:

1 – корпус, 2 – вхідний патрубок, 3 – вихідний патрубок чистого повітря, 4 – патрубок видачі пилу, 5 – жалюзійний відокремлювач, 6 – жалюзі, 7 – конічне дно, для збору пиловодяної суміші, 8, 10 – трубопроводи, 9 – фільтр, 11 – насос

Вода подається через систему водопостачання, яка складається з трубопроводу 10 і насоса 11, після очищування у фільтрі 9 до форсунок для води, розташованих у верхній частині жалюзі на рівні нижнього краю патрубку

для виходу очищеного повітря 3, через які розпилюється на жалюзі 6 відокремлювача 5. Вода після попадання на жалюзі 6 у верхній її частині опускається по її внутрішній поверхні і при цьому захоплює дрібнодисперсні частинки пилу, які несуться разом з потоком, і транспортує їх вниз у конічне дно 7 – для збору пиловодяної суміші, звідки по трубопроводу 8 – у фільтр 9, де відбувається відокремлення пилу від води. Після цього очищена вода по трубопроводу 10 за допомогою насоса 11 подається примусово до форсунок для води, розташованих на рівні нижнього краю патрубків для виходу очищеного повітря 3 у верхній частині корпусу апарата 1.

У запропонованій конструкції апарата мокре доочищення повітря водою, що рухається по внутрішній стороні жалюзі 6 дозволяє виділити з потоку найдрібніші частинки пилу, які є найнебезпечнішими і звичайно, тим самим, збільшити ефективність пиловловлювання. На багатьох підприємствах України вода є у дефіциті, а це гальмує впровадження у виробництво цілого ряду мокрих пиловловлювачів, тому нами було поставлене завдання мінімізувати кількісні втрати води, що і було реалізовано у запропонованій конструкції апарата. У наведеній конструкції апарата вода необхідна не для насичення пилу, а тільки для зволоження дрібнодисперсного пилу і для полегшення процесу його виділення з пилогазового потоку, для чого достатньо витратити її у кількості 2 літри на годину. Крім того у запропонованій конструкції система водопостачання є замкнутою, тобто вода зразу ж в системі пиловловлювача очищується від пилу у фільтрі і насосом через систему трубопроводів знов подається у верхню частину жалюзійного відокремлювача. Зменшення необхідної кількості води досягається за рахунок того, що змочуванню піддається тільки та невелика кількість дрібнодисперсного пилу, яка у звичайних апаратах викидається назовні разом з очищеним повітрям, тобто та частина пилу, яка значно впливає на ефективність роботи пиловловлювача. Для подальшого збільшення ефективності роботи установки пилоочищення нами була запропонована конструкція мокрого пиловловлювача зі спеціальною формою пластин жалюзі [119] (в подальшому апарат III, рис. 4.6), в якому в

корпусі мокрого пиловловлювача (рис. 4.5. апарата II) коаксіально встановлений жалюзійний відокремлювач 5, який складається з жалюзі 6 з двома заокругленими пастками 12 і 13, направленими від осі апарата: 12 – із зовнішньої та 13 – з внутрішньої її сторони.

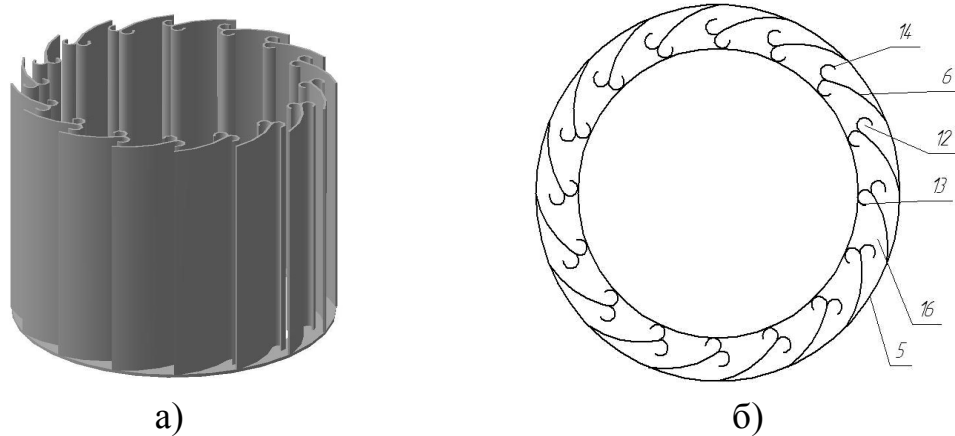


Рис. 4.6. Жалюзійний відокремлювач:

а) модель; б) переріз

Вхідні щілини пасток 12 і 13 розташовані в кінці кожного жалюзі 6 у вигляді двох кіл, направлених у протилежні сторони від самих жалюзі. Пастки 12 і 13 зі сторони зовнішньої вигнутої поверхні жалюзі 6 і внутрішньої увігнутої поверхні жалюзі 6 по всій їх довжині зверху вниз мають форму вертикальних каналів, відповідно 14 і 15. Канал 14 відкритий назустріч пилоповітряному потоку, а канал 15 направлений всередину відокремлювача і розташований проти напрямку руху пилоповітряного потоку. Канал 15 переходить у нижній частині в зрізаний конус 7, а канал 14 розташований зовні жалюзійного відокремлювача і не зв'язаний з конусом 7. Між жалюзі 6 розташовані щілини 16. Процес розділення потоку на першому ступені пиловловлювача відбувається аналогічно тому, як це відбувається в апараті конструкції II (рис.4.5). У подальшому процес очищення повітря від пилу відбувається наступним чином. Більш дрібні частинки пилу захоплюються потоком повітря до жалюзійного відокремлювача 5. Повітря проходить інерційний відокремлювач 5 крізь щілини 16, що розміщені між жалюзі 6 і пастками 12 та 13. При цьому повітря робить різкий поворот малого радіусу на

кут більший за 90° , але менший за 180° . Дрібні частинки пилу також виконують поворот в напрямку щілини 16, але, завдяки силі інерції, радіус повороту в них значно більший, ніж у повітря, за рахунок чого дрібні пилові частинки пролітають повз щілини 16, стикаються з жалюзі 6, відбиваються від нього або сповзають по його поверхні (залежно від маси і пружності частинок, місця їх попадання на жалюзі та кута, під яким відбувається удар частинки з жалюзі) і попадають у вхідну щілину пасток 12. Якщо пилова частинка дуже сильно відіб'ється від жалюзі 6, вона знову попадає до пилоповітряного потоку, що обертається навколо жалюзійного відокремлювача, знов вдаряється об одну з наступних жалюзі доти, доки не попаде в щілину пастки 12.

Частинки пилу, попавши в пастки через вхідні щілини 12, рухаються в них спочатку вздовж каналу 14 пастки вниз, де знов попадають у пиловий потік великодисперсних фракцій пилу, який рухається паралельним курсом зверху вниз уздовж стінки корпусу апарата і транспортується через пилівипускний патрубок 4 у бункер для збирання пилу (на кресленні не показаний). Із жалюзійного відокремлювача 5 очищене повітря, що пройшло крізь щілини 16, через вихлопну трубу 3 і вентилятор (на кресленні не показаний), викидається назовні.

Очищений від великодисперсного пилу потік, доочищений додатково в другому ступені очищування – жалюзійному відокремлювачі 5, проходить через щілини 16 між жалюзі 6 усередину відокремлювача 5 і попадає під дію четвертої ступені очищування – потоку води, який рухається вздовж жалюзі 6 по його внутрішній стороні. Вода подається через систему водопостачання, яка складається з трубопроводу 10 і насоса 11, після очищування у фільтрі 9 до форсунок для води, розташованих у верхній частині жалюзі 6 на рівні нижнього краю патрубка для виходу очищеного повітря 3, через які розпилюється на жалюзі 6 відокремлювача 5. Вода після попадання на жалюзі 6 у верхній їх частині опускається по її внутрішній поверхні по вертикальному каналу 15, утвореному пасткою 13 жалюзі 6 і при цьому захоплює дрібнодисперсні частинки пилу, які несуться разом з потоком, і транспортує їх вниз у кінчне

дно 7 – для збору пиловодяної суміші, звідки по трубопроводу 8 – у фільтр 9, де відбувається відокремлення пилу від води. Після цього очищена вода по трубопроводу 10 за допомогою насоса 11 подається примусово до форсунок для води, розташованих на рівні нижнього краю патрубку для виходу очищеного повітря 3.

Перевагою запропонованого пиловловлювача є те, що він має ще додаткову ступінь очищування – у пастці 12, тобто пил, який не відбився від жалюзі 6 назад всередину корпусу апарата, проскакує в щілину 16 між жалюзі і попадає у вхідний отвір пастки 12 жалюзі 6, звідки вже самостійно вибратися не може і опускається під дією сили ваги вниз по каналу 14 пастки 12, розташованому із зовнішньої вигнутої сторони жалюзі аж до нижнього краю жалюзійного відокремлювача 5, де змішується з потоком великодисперсних фракцій пилу, який рухається паралельним курсом зверху вниз уздовж стінки корпусу апарата і транспортується через пиловипускний патрубок 4 в бункер для збирання пилу (на кресленні не показаний).

У запропонованій конструкції апарата мокре доочищування повітря водою, що рухається по внутрішній стороні жалюзі 6 дозволяє виділити з потоку найдрібніші частинки пилу, які є найнебезпечнішими і звичайно тим самим збільшити ефективність пиловловлювання. Крім того у запропонованій конструкції система водопостачання є замкнутою, тобто вода зразу ж в системі пиловловлювача очищується від пилу у фільтрі і насосом через систему трубопроводів знов подається у верхню частину жалюзійного відокремлювача. Зменшення необхідної кількості води досягається за рахунок того, що змочуванню піддається тільки та невелика кількість дрібнодисперсного пилу, яка у звичайних апаратах викидається назовні разом з очищеним повітрям, тобто та частина пилу, яка значно впливає на ефективність роботи пиловловлювача. Загальний вигляд третьої конструкції пиловловлювача наведено на рис. 4.7, а загальний вигляд експериментальної установки для очищування повітря від пилу на рис. 4.8.

Дуже важливим питанням для пиловловлювача є вибір оптимальної

величини радіусу пастки в залежності від довжини жалюзі.



Рис. 4.7. Загальний вигляд відцентрово-інерційного пиловловлювача третього типу



Рис. 4.8. Загальний вигляд експериментальної установки для очищення повітря від пилу

Були проведені дослідження для вибору оптимальної величини радіусу пасток 12 і 13 в залежності від довжини пластини жалюзі на експериментальному стенді ДУ "Львівська політехніка" для кварцового піску з

медіанним діаметром $32 \cdot 10^{-6}$ м, дані яких для пастки 12 наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Вибір оптимальної величини радіусу пастки 12 в залежності від довжини жалюзі 6

Витрата повітря, що входить в апарат, м ³ /год	Відношення радіусу пастки 12 до довжини жалюзі 6	Ефективність пиловловлювання, %
1000	1/5	95,3
	1/6	95,9
	1/8	96,2
	2,0	95,1
2000	1/5	95,8
	1/6	96,4
	1/8	97,8
	2,0	96,7
3000	1/5	96,2
	1/6	97,6
	1/8	98,1
	2,0	97,1

Як видно з табл. 4.3, максимальну ефективність очищення повітря від пилу вдалося досягти при відношенні радіусу пастки 12 до довжини жалюзі 6 таким, що дорівнює 1/8.

Дані випробувань для пастки 13 наведені в табл. 4.4 (при відношенні радіусу пастки 12 до довжини жалюзі 6, яке дорівнює 1/8).

Таблиця 4.4

Вибір оптимальної величини радіусу пастки 13 в залежності від довжини жалюзі 6

Витрата повітря, що входить в апарат, м ³ /год	Відношення радіусу пастки 13 до довжини жалюзі 6	Ефективність пиловловлювання, %
1	2	3
1000	1/5	95,1
	1/6	95,7
	1/8	96,6
	2,0	95,1
	0,5	93,3

1	2	3
2000	1/5	95,5
	1/6	96,0
	1/8	97,9
	2,0	96,5
	0,5	94,5
3000	1/5	96,0
	1/6	97,5
	1/8	98,8
	2,0	97,1

Дослідження показали, що найбільша ефективність вловлювання пилу в пиловловлювачі відбувається при відношенні радіусу кожної пастки 12 і 13 до довжини жалюзі, яке дорівнює $1/8$, незалежно від витрат повітря.

На цьому ж стенді і в таких же умовах були проведені дослідження по визначенню оптимального відношення довжини вхідної щілини в пастку L до довжини кола, що утворює цю пастку (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Відношення довжини вхідної щілини в пастку L до довжини кола

Витрата повітря, м ³ /год	L	Ефективність пиловловлювання, %
1	2	3
1000	1/2	95,1
1000	1/3	97,1
1000	1/4	95,0
2000	1/2	96,2
2000	1/3	98,3
2000	1/4	96,3

Таким чином, максимальна ефективність уловлювання пилу досягається тоді, коли коло, яке утворює кожну з пасток, розірване по довжині на $1/3$ у тій її частині, яка прилягає до жалюзі в її кінцевій точці. Більш детальніше експериментальні дослідження пиловловлювачів наведено в додатку В.

4.2. Експериментальні дослідження пиловловлювачів

З метою співставлення характеристик роботи новостворених пиловловлювачів із існуючими, нами проведені дослідження запропонованих і розроблених нами апаратів на стандартному експериментальному стенді (рис. 2.12), встановленому в ДУ "Львівська політехніка" на стандартному експериментальному пилу – кварцовому піску – дисперсний склад якого наведений на рис. 2.2. Медіанний діаметр пилу (8, 16, 32 і 50)·10⁻⁶ м (додаток В).

Для всіх експериментів в якості еталону прийнятий найбільш поширений у процесах агломераційного виробництва циклон ЦН – 11.

В результаті експериментальних досліджень була визначена залежність гідравлічного опору апаратів від витрат повітря в стенді (рис. 4.9).

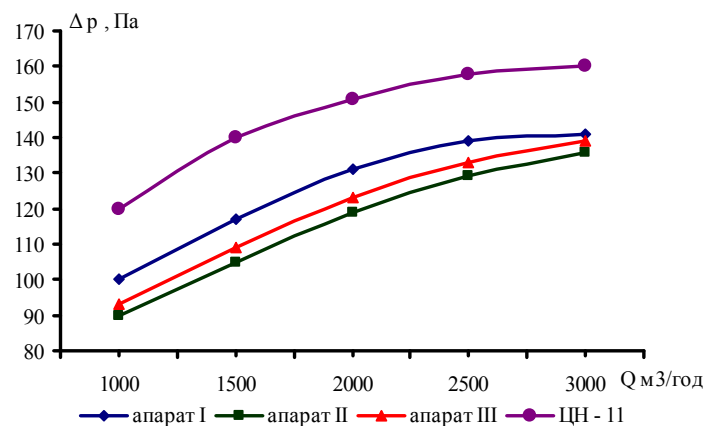


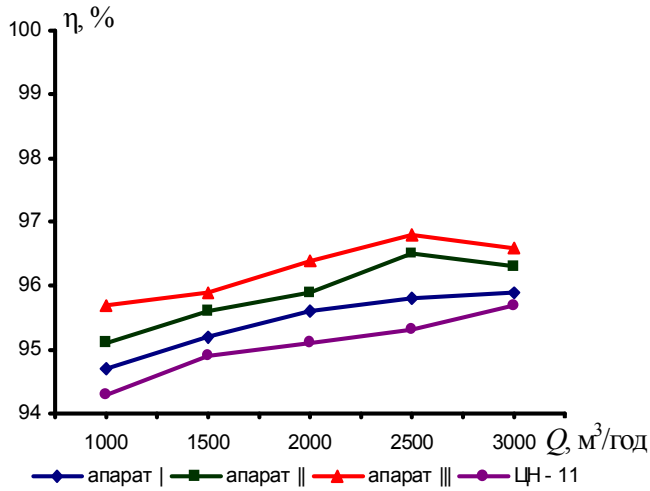
Рис. 4.9. Залежність гідравлічного опору апаратів від витрат повітря в стенді

Були визначені залежності ефективності пиловловлювання (рис. 4.10, 4.11)

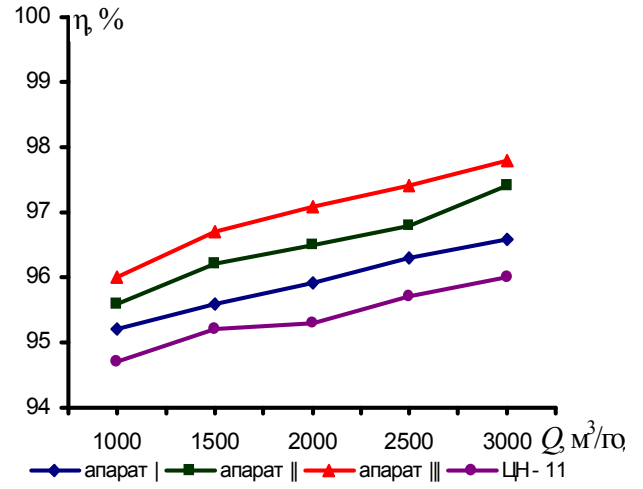
На всіх графіках зберігається спільне значення тенденції:

- зростає ефективність пиловловлювання з переходом від циклона ЦН–11 до першого апарата, потім до другого і нарешті до третього апарата, тобто третій варіант пиловловлювача має найвищу ефективність роботи;

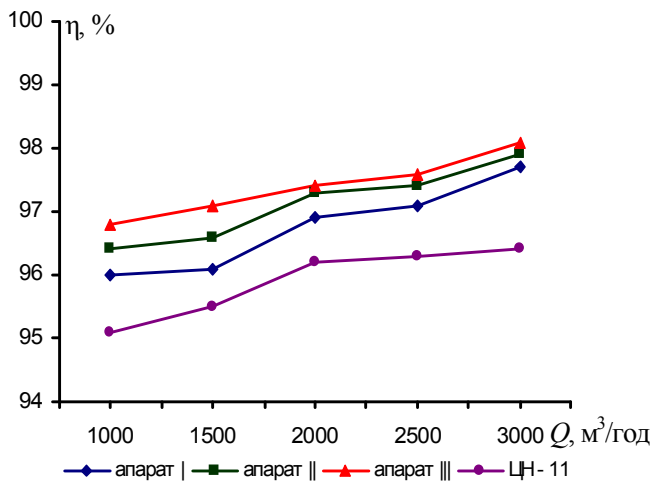
- зі збільшенням медіанного діаметра пилу, незалежно від конструктивного виконання пиловловлювача, ефективність пиловловлювання зростає;



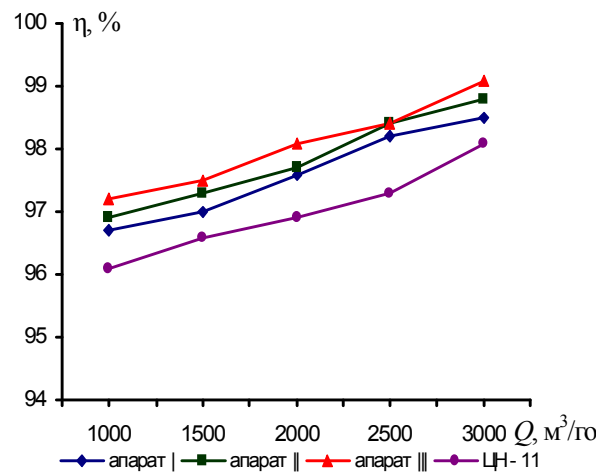
а



б



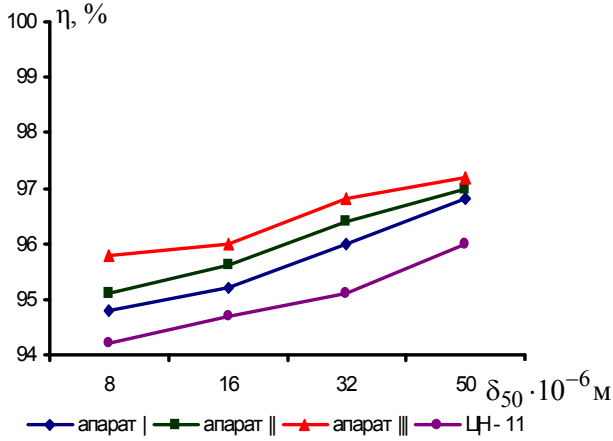
в



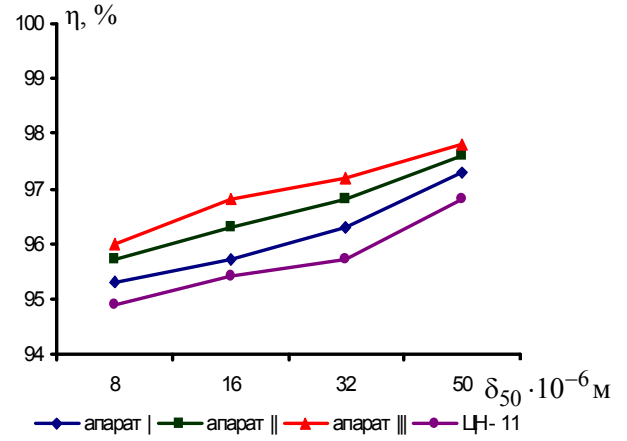
г

Рис. 4.10. Залежності ефективності пиловловлювання від витрат повітря в стенді для пилу з медіанним діаметром:

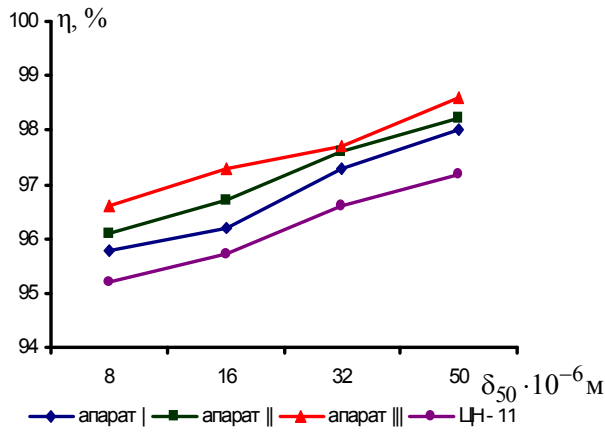
а) $8 \cdot 10^{-6}$ м; б) $16 \cdot 10^{-6}$ м; в) $32 \cdot 10^{-6}$ м; г) $50 \cdot 10^{-6}$ м



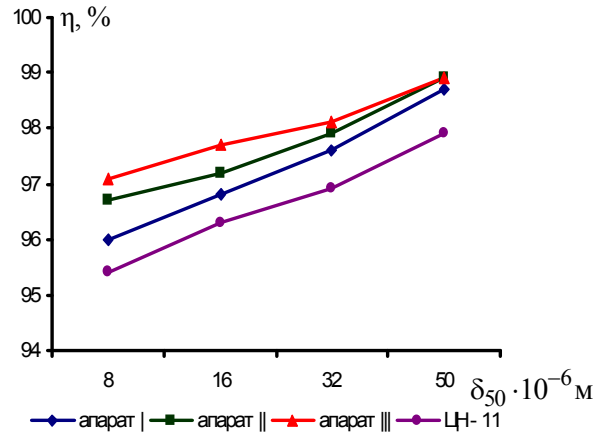
а



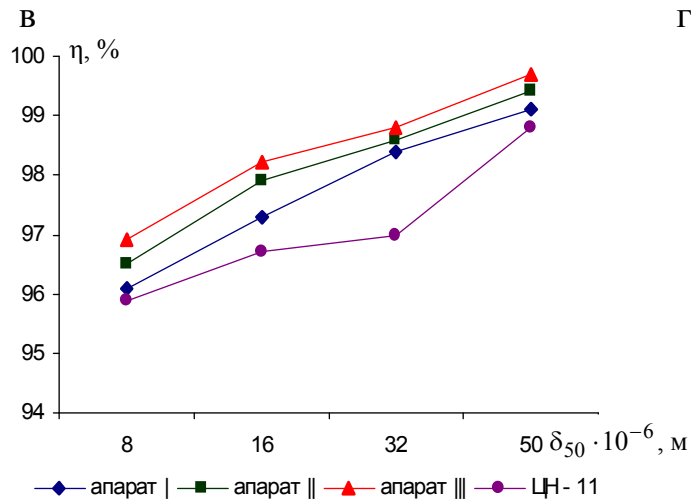
б



в



г



д

Рис. 4.11. Залежності ефективності пиловловлювання від медіанного діаметру пилу (δ_{50}) при витратах повітря:

а – 1000 м³/год; б – 1500 м³/год; в – 2000 м³/год; г – 2500 м³/год;
д – 3000 м³/год

- зі збільшенням витрат повітря в стенді ефективність пиловловлювання збільшується. Всі ці закономірності можна пояснити наступним чином. Збільшення медіанного діаметра пилу призводить до збільшення відцентрової та інерційної сили, а також сили ваги, які визначають процес виділення аерозолей з пилогазового потоку в усіх без винятку апаратах, які ми досліджували.

Збільшення витрат повітря в стенді призводить до збільшення швидкості руху пилогазової суміші, як в корпусі апарата, так і при проходженні через щілини між жалюзі відокремлювача, що в свою чергу збільшує величину відцентрових, інерційних сил і сили тяжіння та веде до збільшення ефективності пиловловлювання.

Порівняльні дослідження запропонованих трьох конструкцій відцентрово-інерційних пиловловлювачів і циклона ЦН-11-еталона, довели, що найгірший з них, виконаний за варіантом I, перевищує ефективність еталона на 0,8 – 1,2%; апарат, виконаний за варіантом II, на 2 – 3% ефективніше апарата I, а апарат, виконаний за варіантом III, на 3 – 5 % ефективніше апарата II, що пояснюється конструктивними особливостями кожного з них.

4.3. Оцінка погрішності

При порівнянні одержаних експериментальних даних з результатами чисельних експериментів спостерігається деяка відмінність. Ця відмінність пояснюється тим, що будь-яка модель (модель «ідеального» середовища, модель взаємодії сил в такому середовищі, рух «ідеальної» матеріальної точки в уявленому потоці) є дещо ідеалізованою. Для одержання числових значень вводяться початкові (граничні) умови, тобто умови однозначності, та ряд припущень. Можливості фізичного моделювання обмежені дуже вузькими діапазонами змін величин [120], які визначаються в дослідях. Відтворення процесів у пиловловлювачі на спрощених моделях (фізичне моделювання) в більшості випадків дозволяє визначити тільки той чи інший інтегральний ефект: коефіцієнт корисної дії апарата, ступінь осадження пилоповітряної суміші, розподіл потоку по

частині апарата тощо. При виведенні математичної моделі знехтували рядом факторів, вплив яких не може бути врахований в диференціальних рівняннях руху, а саме вплив нестационарності відносного руху частинки на її траєкторію, взаємодію між частинками, вплив маси частинок на потік, вплив турбулентності потоку на рух частинок тощо. Крім того, було зроблено припущення, що при дотику до зовнішньої стінки апарата частинка вважається вже вловленою, більше не відбивається і рухається вздовж зовнішньої стінки апарата до пиловипускного патрубку. В реальних умовах відбувається відскакування частинки від зовнішньої стінки апарата, її подальший рух у закручених потоках та неодноразове відбиття від стінок апарата. У подальшому планується визначити залежність конструктивних параметрів пиловловлювача із врахуванням деяких факторів, вплив яких не можливо було прослідити в даній роботі.

4.4. Статистичне моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлювання від конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача

Для оцінки значущості впливу вхідних факторів на ефективність пиловловлювання апарата було застосовано метод статистичного моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлення від конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача, заснований на регресійному аналізі вхідних та вихідних даних.

Регресійний аналіз є одним із основних методів, які застосовуються для знаходження багатofакторних моделей [121].

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.

Метод статистичного моделювання [122, 123] полягає в експериментальному дослідженні та спостереженні об'єкта, зокрема за значеннями вихідних параметрів

Y_1, Y_2, \dots, Y_n при відповідній зміні вхідних факторів X_1, X_2, \dots, X_k , і встановленні функціональної залежності виду $Y_i = f(X_j)$, тобто:

$$\begin{aligned} Y_1 &= f(X_1, X_2, \dots, X_k), \\ Y_2 &= f(X_1, X_2, \dots, X_k), \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$Y_n = f(X_1, X_2, \dots, X_k).$$

Для отримання аналітичної залежності ефективності пиловловлювання від параметрів пиловловлювача застосований метод найменших квадратів.

Залежність $Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ одержана в результаті експериментального визначення параметра Y_i з різними значеннями факторів X_1, X_2, \dots, X_k та представлення цих даних на першій стадії у вигляді таблиць, графіків та в аналітичній формі.

Аналітичну залежність одержали шляхом застосування методу регресійного аналізу, який базується на методі найменших квадратів, що поширюється для лінійних залежностей на багатомірний фазовий простір. У цьому випадку, для встановлення вищенаведеної функціональної залежності у вигляді:

$$Y_i = B_0X_0 + B_1X_1 + B_2X_2 \dots + B_kX_k \quad (4.2)$$

визнали коефіцієнти $B_0, B_1, B_2, \dots, B_k$ при відповідних параметрах регресії $X_0, X_1, X_2, \dots, X_k$, причому, X_0 називається фіктивною змінною і дорівнює одиниці за умови мінімуму суми середньоквадратичних відхилень експериментальних і розрахованих за знайденою залежністю даних.

На основі результатів експериментальних вимірювань з цією метою склали систему нормальних рівнянь:

$$\begin{aligned} B_0 \sum_n X_0^2 + B_1 \sum_n X_0 X_1 + B_2 \sum_n X_0 X_2 + \dots + B_k \sum_n X_0 X_k &= \sum_n X_0^2 Y, \\ B_0 \sum_n X_1 X_0 + B_1 \sum_n X_1^2 + B_2 \sum_n X_1 X_2 + \dots + B_k \sum_n X_1 X_k &= \sum_n X_1^2 Y, \\ B_0 \sum_n X_2 X_0 + B_1 \sum_n X_2 X_1 + B_2 \sum_n X_2^2 + \dots + B_k \sum_n X_2 X_k &= \sum_n X_2^2 Y, \\ \dots & \\ B_0 \sum_n X_k X_0 + B_1 \sum_n X_k X_1 + B_2 \sum_n X_k X_2 + \dots + B_k \sum_n X_k^2 &= \sum_n X_k^2 Y, \end{aligned} \quad (4.3)$$

де n – кількість експериментів; k – кількість змінних.

Матриця планування є матрицею точок, в яких проводяться експерименти. Розв'язуючи наведену систему нормальних рівнянь, одержуємо лінійне рівняння регресії, яке використовуємо як модель досліджуваного процесу.

Застосовуючи метод регресійного аналізу для знаходження багатofакторних моделей, розрахування зручно проводити у матричній формі. При цьому, якщо вихідні експериментальні дані подаємо матрицею X :

$$X = \begin{bmatrix} X_{00} & X_{01} & \dots & X_{0k} \\ X_{10} & X_{11} & \dots & X_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{k0} & X_{k1} & \dots & X_{kk} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

та векторами значень параметра Y і шуканих значень коефіцієнтів рівняння регресії B :

$$Y = \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y_k \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ \vdots \\ B_k \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

Одержана матриця X^*X називається інформаційною. За допомогою цієї матриці система нормальних рівнянь запишеться в такому виді:

$$(X^*X)B = X^*Y. \quad (4.6)$$

де X^* – матриця транспонована до матриці вихідних експериментальних даних X .

Матрицю коефіцієнтів системи нормальних рівнянь записують добутком X^*X :

$$\begin{bmatrix} \sum_n X_0^2 & \sum_n X_0 X_1 & \sum_n X_0 X_2 & \dots & \sum_n X_0 X_k \\ \sum_n X_1 X_0 & \sum_n X_1^2 & \sum_n X_1 X_2 & \dots & \sum_n X_1 X_k \\ \sum_n X_2 X_0 & \sum_n X_2 X_1 & \sum_n X_2^2 & \dots & \sum_n X_2 X_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_n X_k X_0 & \sum_n X_k X_1 & \sum_n X_k X_2 & \dots & \sum_n X_k^2 \end{bmatrix} = X^* X, \quad (4.7)$$

Це дає змогу знайти вектор B розрахованих значень коефіцієнтів рівняння

регресії:

$$B = (X^*X)^{-1} X^*Y, \quad (4.8)$$

де $(X^*X)^{-1}$ – обернена матриця до матриці коефіцієнтів системи нормальних рівнянь.

Для статистичної перевірки регресійних моделей передусім визначаємо залишкову дисперсію S_{μ}^2 , яка характеризує відхилення обчислених при даному значенні X_i величин Y_i і відповідних їм експериментальних даних Y_e :

$$S_{\mu}^2 = \frac{1}{f_1} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_e)^2, \quad (4.9)$$

де f_1 – число ступенів вільності, яке дорівнює кількості дослідів мінус число коефіцієнтів рівняння регресії, тобто

$$f_1 = n - k. \quad (4.10)$$

Поряд із цією дисперсією треба оцінити дисперсію відтворюваності дослідів, для чого проводимо декілька серій паралельних дослідів в однакових умовах, для кожної з яких знаходимо середнє арифметичне параметра Y_j :

$$Y_c = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t Y_j, \quad (4.11)$$

де t – число паралельних дослідів, проведених за однакових умов, і обчислюють для цих дослідів дисперсію відтворення:

$$S_B^2 = \frac{1}{f_2} \sum_{j=1}^t (Y_j - Y_c)^2, \quad (4.12)$$

де f_2 – число ступенів вільності.

Для t паралельних дослідів при розрахунку середнього арифметичного накладається один зв'язок рівнянням:

$$f_2 = t - 1. \quad (4.13)$$

Перевірку адекватності регресійної моделі проводимо, співставляючи відношення дисперсій:

$$F_p = S_{\mu}^2 / S_B^2 \quad (4.14)$$

і порівнюючи з відповідними затабульованими значеннями критерію Фішера

F_T , які наведені у довідниках [124, 125], для визначення рівнів ймовірності та значень ступенів вільності відповідних дисперсій f_1 та f_2 . Якщо виконується умова:

$$F_p \leq F_T, \quad (4.15)$$

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

Крім того, статистичний аналіз передбачає оцінку значущості коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стюдента. Для цього використовуємо дисперсійну, або коваріаційну матрицю:

$$D = (X^* X)^{-1} S^2(Y), \quad (4.16)$$

де

$$S^2(Y) = S_B^2, \quad (4.17)$$

або

$$D = \begin{bmatrix} S^2(B_0) & \text{cov}(X_0, X_1) & \text{cov}(X_0, X_2) & \dots & \text{cov}(X_0, X_k) \\ \text{cov}(X_1, X_0) & S^2(B_1) & \text{cov}(X_1, X_2) & \dots & \text{cov}(X_1, X_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{cov}(X_k, X_0) & \text{cov}(X_k, X_1) & \text{cov}(X_k, X_2) & \dots & S^2(B_k) \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

де $S^2(B_i)$ – дисперсії відповідних коефіцієнтів рівняння регресії; $\text{cov}(X_i, X_j)$ – відповідні коваріації.

Отже, з допомогою дисперсійної матриці визначаємо дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії $S^2(B_i)$. Далі за співвідношенням:

$$t_p = B_i / S(B_i), \quad (4.19)$$

визначаємо обчислене значення критерію, яке співставляють з табличним значенням цього критерію при відповідному числі ступенів вільності, що описують дисперсію (4.17). Якщо виконується умова:

$$t_p \geq t_T, \quad (4.20)$$

для коефіцієнта при факторі X_i , то робимо висновок про те, що даний фактор відчутно впливає на величину Y . У випадку незначущості будь-якого із

коефіцієнтів можна зробити висновок, що вплив даного фактора не виходить за межі похибки досліду і його можна не брати до уваги. При цьому треба провести розрахунок рівняння регресії з меншим числом факторів. Приклад статистичного моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлювання від параметрів пиловловлювача для апарата третього типу наведена нижче. Нехай нам треба оцінити вплив кількісних факторів, які визначають умови перебігу процесу (X_1 – відношення довжини вхідної щілини в пастку до довжини кола, що утворює цю пастку, X_2 – медіанний діаметр частинки (10^{-6} м), X_3 – витрати повітря ($\text{м}^3/\text{год}$), η – ефективність пиловловлювання апарата (%)). З цією метою проведено дослідження процесу, в ході якого одержані результати семи спостережень, які наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6

**Експериментальні та обчислені значення параметрів процесу для
відцентрового пиловловлювача зі спеціальною формою жалюзі – апарат
III типу**

№ досліду	X_0	X_1	X_2	X_3	η	η_p
1	2	3	4	5	6	7
1	+1	1/3	50	3000	99,4	99,7
2	+1	1/3	32	2500	97,9	98,1
3	+1	1/2	8	2000	96,1	96,6
4	+1	1/2	50	1500	97,6	97,8
5	+1	1/4	32	1000	96,4	96,8
6	+1	1/3	8	3000	96,5	96,9
7	+1	1/4	50	2000	98,2	98,6
8	+1	1/3	32	3000	98,6	98,8

Враховуючи матрицю експериментальних даних X , знаходимо матрицю коефіцієнтів системи нормальних рівнянь (4.6):

$$X * X = \begin{bmatrix} 7 & 3924 & 230 & 15000 \\ 3924 & 2917792 & 124944 & 7934000 \\ 230 & 124944 & 9644 & 477000 \\ 15000 & 7934000 & 477000 & 35500000 \end{bmatrix}. \quad (4.21)$$

Запишемо знайдену систему рівнянь (4.1), яка має вид:

$$\begin{array}{rclcl}
7b_0 & +3924b_1 & +230b_2 & +15000b_3 & =677,58; \\
3924b_0 & +2917792b_1 & +124944b_2 & +7934000b_3 & =381175,64; \\
230b_0 & +124944b_1 & +9644b_2 & +477000b_3 & =22302,24; \\
15000b_0 & +7934000b_1 & +477000b_2 & +35500000b_3 & =1449220.
\end{array} \quad (4.22)$$

Розв'язуючи систему нормальних рівнянь, знаходимо коефіцієнти рівняння регресії (4.4), яке має такий вид:

$$\eta = 95,2076 + 0,0018723X_1 + 0,0404002X_2 - 0,000363297X_3. \quad (4.23)$$

В одержане рівняння регресії підставляємо відповідні кожному дослідженню значення X_1 , X_2 та X_3 і таким чином знаходимо вектор обчислених значень параметра η_p . Для перевірки адекватності одержаного рівняння регресії (4.23) знаходимо залишкову регресію і дисперсію відтворення. Залишкова дисперсія, що характеризує відхилення експериментальних від обчислених за одержаною регресійною моделлю даних (4.9), становить:

$$S_{\mu}^2 = \sum_n (\eta_e - \eta_p)^2 / (7 - 3) = 0,353305. \quad (4.24)$$

Дисперсію відтворення визначаємо за окремою статистичною вибіркою експериментальних даних, одержаних при однакових значеннях вихідних факторів, зокрема в даному конкретному випадку значення параметра η в умовах іншого дослідження при $X_1 = 238$, $X_2 = 50$, $X_3 = 3000$ є таке: $\eta_1 = 99,5$; $\eta_2 = 99,4$; $\eta_3 = 99,6$; $\eta_4 = 99,7$; $\eta_5 = 99,6$. В ході статистичної обробки цих результатів знайдемо математичне сподівання $\eta_c = 98,48$ та дисперсію відтворення (4.12), яка дорівнює:

$$S_B^2 = \sum_t (\eta_t - \eta_c)^2 / (5 - 1) = 0,129996. \quad (4.25)$$

Висновок стосовно адекватності робимо за величиною критерія Фішера, який розраховуємо за співвідношенням дисперсій (4.14):

$$F_p = S_{\mu}^2 / S_B^2 = 2,80278. \quad (4.26)$$

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 $f_2 = 4$, $\epsilon F_T = 6,5914$. Отже виконання умов (4.15) 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 [122]. З цією метою проводять розрахунки дисперсії коефіцієнтів за дисперсійною матрицею D ,

$$D = (X^* X)^{-1} S^2(\eta), \quad (4.27)$$

$$D = \begin{bmatrix} S^2(B_0) & \text{cov}(X_0, X_1) & \text{cov}(X_0, X_2) & \dots & \text{cov}(X_0, X_k) \\ \text{cov}(X_1, X_0) & S^2(B_1) & \text{cov}(X_1, X_2) & \dots & \text{cov}(X_1, X_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{cov}(X_k, X_0) & \text{cov}(X_k, X_1) & \text{cov}(X_k, X_2) & \dots & S^2(B_k) \end{bmatrix}, \quad (4.28)$$

де $S^2(\eta) = S_B^2 = 0,129945$.

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

$$\begin{aligned} S^2(b_0) &= 129,92785, & t(b_0) &= 8,35025, \\ S^2(b_1) &= 87,37936 \cdot 10^{-9}, & t(b_1) &= 6,27758, \\ S^2(b_2) &= 0,128 \cdot 10^{-3}, & t(b_2) &= 3,54128, \\ S^2(b_3) &= 13,026 \cdot 10^{-9}, & t(b_3) &= 3,17692. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Табличне значення критерія Стюдента $t_T(4) = 2,1298$ [122]. Порівняння розрахункових і табличних значень критерія Стюдента показує, що для усіх коефіцієнтів у рівняннях регресії виконується умова (4.21), яка дає змогу стверджувати, що коефіцієнти є значущими і відповідні фактори суттєво впливають на параметр η . У зв'язку з тим, що проведення регресійного аналізу передбачає значний обсяг 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 А), яка визначає коефіцієнти рівняння регресії (4.5), залишкову дисперсію (4.9), дисперсію відтворення (4.12), величину критерія Фішера (4.14) та значення критерія Стюдента (4.19) для всіх коефіцієнтів

рівняння регресії.

За розрахунками одержуємо рівняння регресії досліджуваних процесів:

$$\eta = 90,589 + 9,96981 \cdot 10^{-5} \cdot X_1 + 0,178198 \cdot X_2 - 0,000715392 \cdot X_3,$$

де X_1 – відношення довжини вхідної щілини в пастку до довжини кола, що утворює цю пастку, X_2 – медіанний діаметр частинки (10^{-6} м), X_3 – витрати повітря ($\text{м}^3/\text{год}$); η – ефективність пиловловлювання апарата (%).

За допомогою одержаних рівнянь регресії визначені значення ефективності пиловловлювання для кожного досліджуваного пиловловлювача при відповідній зміні конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача. Відхилення розрахункових даних від експериментальних не перевищує 5 – 15 %.

Програма MNK.cpp – програма статистичного моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлювання від конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача наведена у додатку А.

4.5. Висновки

1. Згідно положень математичної моделі та аналізу існуючих конструкцій пиловловлювачів запропоновані, сконструйовані та впроваджені три типи відцентрово-інерційних пиловловлювачів, відмінною особливістю яких є поєднання в одному корпусі коаксіально встановленого жалюзійного відокремлювача певної конструкції і застосування води для змочування дрібнодисперсного пилу.

2. Проведені дослідження апарата типу І дозволили визначити конструктивні розміри жалюзі, оптимальну величину їх радіусу кривизни, що дозволило підвищити ефективність його роботи на 0,8 – 1,2% у порівнянні з еталоном.

3. Експериментальні дослідження апарата ІІІ визначили оптимальну величину пасток жалюзі в залежності від довжини самої жалюзі, а також оптимальні відношення довжини вхідної щілини в пастку жалюзі до довжини

кола, що її утворює, а це дозволило підвищити ефективність вловлювання пилу на 3 – 5%.

4. Зростає ефективність пиловловлювання з переходом від циклона ЦН–11 до першого апарата, потім до другого і нарешті до третього апарата, тобто третій варіант пиловловлювача має найвищу ефективність роботи. Доведено закономірність, що ефективність вловлювання зростає зі збільшенням медіанного діаметра пилу і збільшенням витрат повітря в стенді незалежно від конструктивного виконання пиловловлювача.

5. Проведені дослідження всіх трьох типів запропонованих пиловловлювачів з еталоном довели найвищу ефективність апаратів із спеціальною формою жалюзі.

6. Порівняльні дослідження запропонованих трьох конструкцій відцентрово-інерційних пиловловлювачів і циклона ЦН–11-еталона довели, що найгірший з них, виконаний за варіантом I, перевищує ефективність еталона на 0,8 – 1,2%; апарат, виконаний за варіантом II, на 2–3% ефективніше апарата I, а апарат, виконаний за варіантом III, на 3 – 5 % ефективніше апарата II, що пояснюється конструктивними особливостями кожного з них.

7. Проведені дослідження відкривають широкі перспективи впровадження запропонованих пиловловлювачів у виробництво.

РОЗДІЛ 5

ВПРОВАДЖЕННЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИЩУВАННЯ ПОВІТРЯ ВІД ПИЛУ

5.1. Стан питання

Алчевський металургійний комбінат – сучасне металургійне підприємство з повним циклом, яке включає всі основні металургійні виробництва: аглодоменне, сталеплавильне і прокатне. Готова продукція випускається у вигляді прокату (листових і сортових профілів і профілів спеціального призначення), а також напівфабрикатів (твердого чавуну в чушках, сталевих злитків, безперервнолитих або катаних заготовок). Напівфабрикати направляються на заводи, які не мають повного циклу переділів.

Початковою сировиною металургійного підприємства є: залізна руда, яка видобута на рудниках і пройшла попередню обробку та збагачення на збагачувальних фабриках (або гірничо-збагачувальних комбінатах); кам'яне вугілля, яке добуто у шахтах і пройшло також попередню обробку; флюси (вапняк і доломіт), здобуті в кар'єрах і піддані попередній обробці (дроблення та сортування).

Основними цехами металургійного комбінату є: агломераційний, доменний, мартенівський і прокатний. До складу підприємства входять також дробильно-сортувальні, коксохімічні, агломераційні цехи і цехи з виробництва окатишів, які, хоча і відносяться до основних цехів, але грають підсобну роль, і як правило, їх потужність і структура визначаються продуктивністю доменного цеху.

Хімічний склад агломерату [31] є найважливішою характеристикою, тому суворо і безперервно контролюється. Одночасно зі зміцненням агломерату спостерігається зниження пористості і, отже, зниження відновлюваності. Все це змушує вибирати оптимальне поєднання міцності та відновлюваності, тобто

температурний рівень процесу.

Останнім часом у зв'язку з інтенсифікацією процесу вплив якості залізорудних матеріалів на техніко-економічні показники роботи доменних печей став особливо відчутним. Тому поліпшення якості агломерату та обкотишів – підвищення вмісту в них заліза і основності, збільшення механічної міцності в холодному і особливо відновленому стані, зниження вмісту шкідливих домішок – є найважливішим напрямком технічного прогресу в доменному виробництві.

Агломераційний цех складається з наступних основних підрозділів: відділення прийому сирих матеріалів, підготовки палива і вапняку шихтові відділення, де дозуються компоненти шихти, що надходять на спікання,

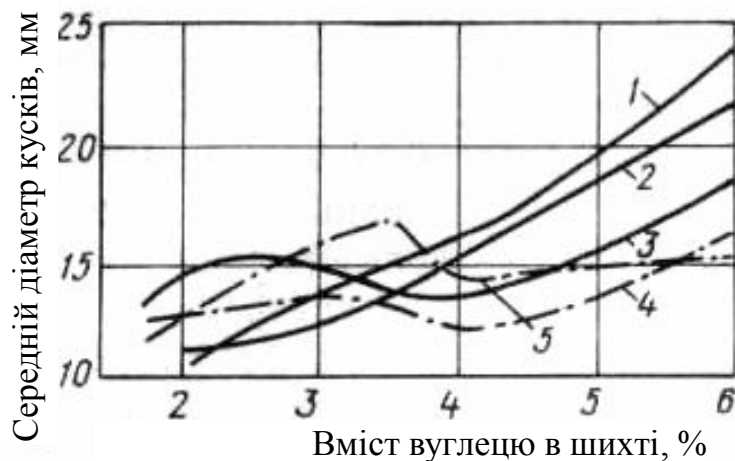


Рис. 5.1. Залежність міцності агломерату (середнього діаметру шматка після стабілізації гранулометричного складу) від витрати палива (за С. В. Базилевичем). Агломерат:

1 – з руди високогірської розміром $(0-12) \cdot 10^{-6}$ м; 2 – з руди соколовської розміром $(0-12) \cdot 10^{-6}$ м; 3 – з високогірського магнетитового концентрату розміром $(0-0,2) \cdot 10^{-6}$ м; 4 – з оленегірського концентрату розміром $(0-0,5) \cdot 10^{-6}$ м; 5 – з криворізького концентрату розміром $(0-0,1) \cdot 10^{-6}$ м

змішувальне відділення і головний: корпус, у складі якого – вузел спікання, дроблення, сортування і охолодження: агломерату, відводи продуктів горіння при спіканні й вузли повернення.

Для переміщення сипучих матеріалів на аглофабриках застосовуються стаціонарні стрічкові конвеєри, які встановлюються як горизонтально, так і похило. Несучим і тяговим органом конвеєра є гнучка нескінченна стрічка (найчастіше гумова), яка огинає приводний і натяжний

барабани. Робоча і неробоча гілки стрічки спираються на роликові опори, змонтовані на несучих металоконструкціях. Ширина стрічки становить 400 – 2000 мм, швидкість руху досягає 3,15 м/с, а довжина конвеєра 1500 м і

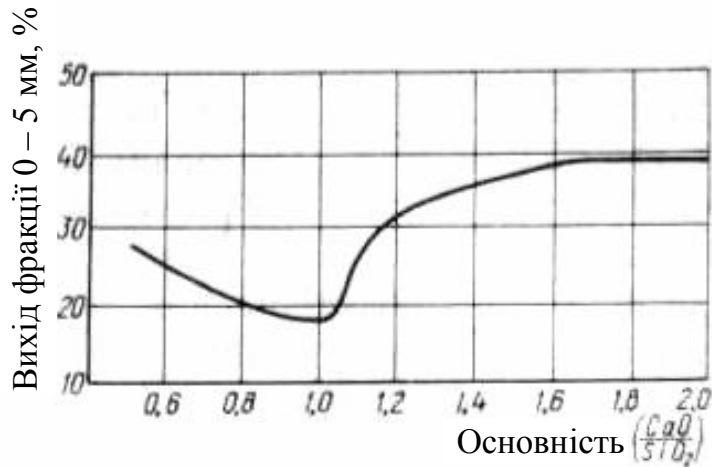


Рис. 5.2. Залежність міцності агломерату від його основності

Показниками процесу дроблення є ступінь і ефективність подрібнення, які визначаються масою дробленого матеріалу, яка одержується при витрачанні одиниці електроенергії і залежить, головним чином, від міцності дробленого матеріалу.

У залежності від величини подрібнюваного матеріалу умовно розрізняються дроблення: велике – від 1500 до 300 мм, середнє – від 300 до 30 мм; дрібне – від 30 до 3 – 5 мм; тонке – від 3 – 5 до 0 мм. При великому дробленні ступінь дроблення становить 2 – 5, при середньому – 5 – 10, при дрібному – 10 – 50 і при подрібнюванні 50 і вище. Дроблення, і особливо подрібнювання, є дуже енергоємними і дорогими операціями і вартість їх в собівартості залізородних концентратів становить близько 40%.

При подрібнюванні вапняку схема дроблення дещо ускладнена (рис. 5.3). Усереднена руда знову подається у відділення розподілу матеріалів і далі в шихтові відділення. Мерзла руда направляється в дробарку. Вапняк до подачі в шихтові відділення попередньо подрібнюється. З рудного двору він вантажиться в рухомий бункер, з якого вивантажується на стрічковий конвеєр,

більше. Для транспортування гарячих матеріалів застосовуються конвеєри зі сталеву стрічкою або стрічкою, яка набрана з окремих пластин (пластинчасті конвеєри).

Найбільша кількість пилу утворюється у відділенні дроблення палива і вапняків. Розглянемо більш детально цей процес [34, 35, 60].

а потім перевантажується в перевантажувальному вузлі на конвеєр 3, після чого конвеєром 3 подається в бункери відділення дроблення вапняку. З бункерів живильниками 2 вапняк видається в молоткові дробарки 4. Подрібнений вапняк гуркіт-конвеєром 5 подається на стрічковий конвеєр прибирання крупного вапняку 6 і стрічковий конвеєр дрібного вапняку 7, з яких вапняк, вже подрібнений, надходить в шихтові бункера.

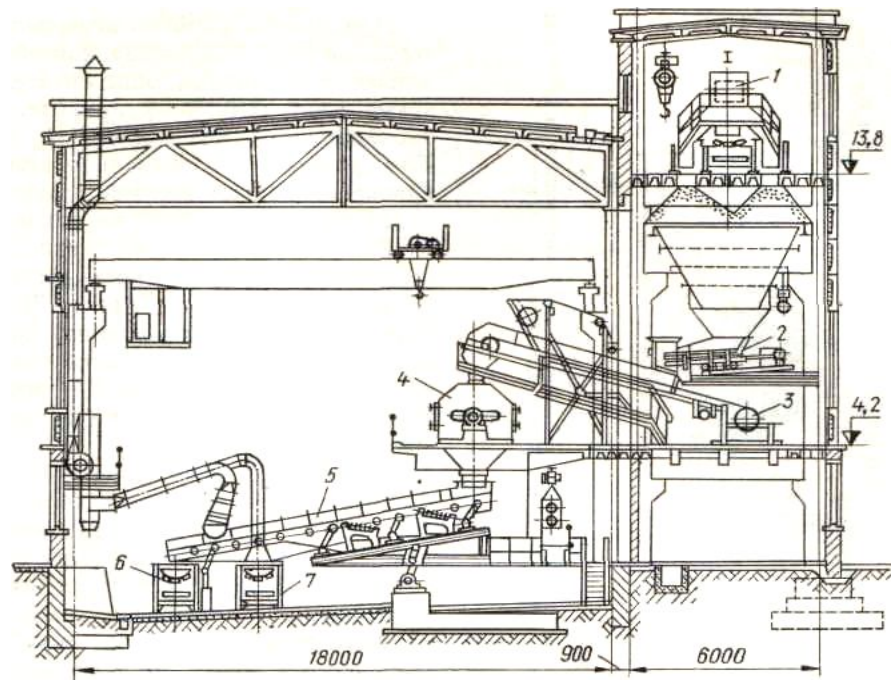


Рис. 5.3. Поперечний розріз відділення подрібнювання вапняку:

1 – стрічковий конвеєр зі скидальним візком; 2 – лотковий живильник; 3 – стрічковий конвеєр; 4 – молоткова дробарка; 5 – гуркіт-конвеєр; 6 – стрічковий конвеєр крупного вапняку; 7 – стрічковий конвеєр дрібного вапняку

Збагачення руд здійснюють на рудозбагачувальних фабриках (гірничозбагачувальних комбінатах), до складу яких входять відділення дроблення, подрібнювання, сортування та різних видів збагачення [31].

Для агломерації готують спеціальну шихту, що складається з дрібної руди розміром $(5 - 8) \cdot 10^{-6}$ м, колошникового пилу, рудного концентрату і подрібнених до $3 \cdot 10^{-6}$ м відходів коксу. Маса коксу становить 6 – 10% маси

шихти; співвідношення між масами дрібної руди, колошникового пилу і концентрату визначається місцевими умовами.

Цю шихту перед спіканням зволожують до 5 – 6% і ретельно перемішують в змішувальних пристроях. При перемішуванні утворюються грудочки, у результаті чого шихта набуває зернистого складу. У такому стані її завантажують на колосникові ґрати агломераційної машини шаром 200 – 300 мм і з зовнішньої поверхні підпалюють газовим пальником.

Аглошихта складається з дрібних залізорудних матеріалів, а саме залізорудного концентрату і залізної руди, а також заміників руд, обов'язкове введення в аглошихту обрату. Крупність руди до $(8-10) \cdot 10^{-6}$ м. Крупність залізорудного концентрату до $0,1 \cdot 10^{-6}$ м. Крім залізорудної частини до складу аглошихти входить флюс, паливо, коксова дрібнота – це відхід коксо-хімічного виробництва, або спеціально подрібнений кокс. Коксова дрібнота – розміром до $3 \cdot 10^{-6}$ м.

На Алчевському металургійному комбінаті агломераційний цех розташований безпосередньо на металургійному підприємстві і має можливість використовувати рудний двір доменного цеху, тому агломераційний цех не має складу шихтових матеріалів. А при виробництві агломерату використовуються побічні продукти і відходи металургійного виробництва: колошниковий пил, відсів агломерату, окалина, дрібний кокс (який отриманий при його сортуванні в доменних і коксохімічних цехах). Відпадає також необхідність у транспортуванні цих матеріалів. У якості палива для запалювання шихти використовуються доменні і коксові гази.

З бункерів шихтові матеріали у певних співвідношеннях видають живильниками на стрічковий конвеєр. Потім матеріали надходять в барабанний змішувач і згрудувач або вторинний змішувач, у яких вони перемішуються, зволожуються і огрудковуються.

Сучасна технологія агломераційного виробництва дозволяє отримати питому потужність агломераційних машин від 1 до 2 т на 1 м^2 площі спікання

на годину при витраті 60 – 80 кг коксу або антрациту на 1 т агломерату. Агломашина з площею спікання 250 м виробляє 12 – 15 тис. т агломерату на добу, а її річна потужність 4,0 – 4,5 млн. т.

На аглофабриці здійснюють контроль наступних параметрів [31]: хімічного складу матеріалів та їх розмірів; складу і маси складових шихти і палива на 1 м довжини транспортера; хімічного складу агломерату; швидкості руху аглоленти; об'ємних витрат газу і повітря на запалюванні; температури запалювання шару шихти на вакуум-камерах, колекторах агломашини, перед ексгаустерами, шихти перед барабанами-згрудувачами; розрядження у вакуум-камерах, колекторах агломашин, перед ексгаустерами; товщини шару агломерату на стрічках.

На (рис. 5.4) наведена принципова схема агломераційної конвеєрної машини. Головною частиною машини є конвеєр, що складається з окремих візків з колосниковими ґратами, які рухаються по замкнутих напрямних коліях. На верхньому і нижньому шляхах візки рухаються щільно притиснутими один до одного, утворюючи робочу і холосту гілки. Рух візків по робочій гілці здійснюється за рахунок їх підйому з холостої гілки і проштовхування приводними зірочками 7.

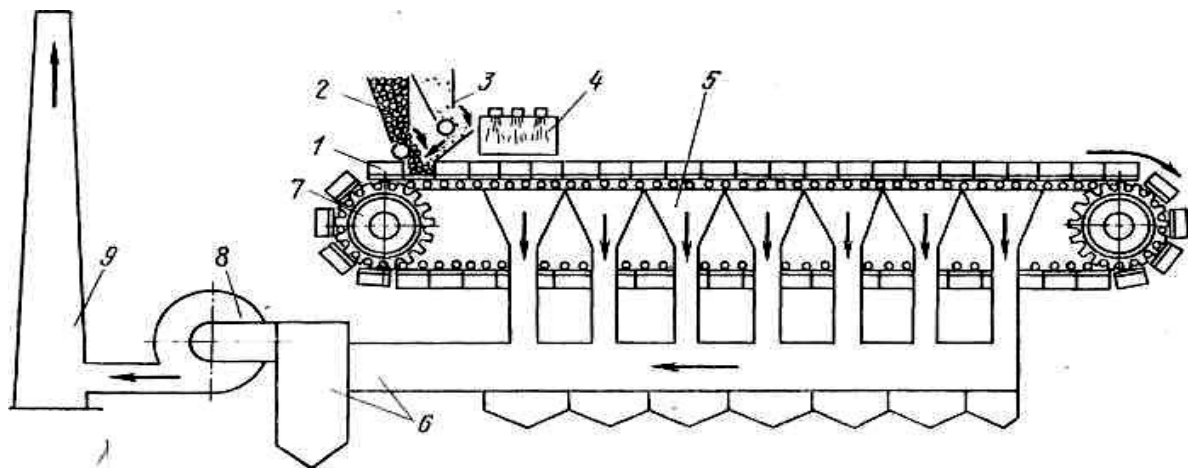


Рис. 5.4. Принципова схема агломераційної конвеєрної машини

Пристрій для вловлювання, прибирання і подачі просипу на конвеєр розташований у розвантажувальній частині машини. Просип, що падає у

бункер через два розвантажувальні отвори, направляється у змонтовані в зірочках тічки, що обертаються, звідки надходить у стаціонарні тічки, встановлені на каркасі машини. Далі просип лотками направляється на конвеєр.

Процеси розмелення, транспортування і грохочення руд, як правило, супроводжуються утворенням пилу. Окалина не повинна містити металу і масла, її медіанний діаметр має бути не більшим за $8 \cdot 10^{-6}$ м, а вологість – не менше 15%. Колошниковий пил повинен мати медіанний діаметр не більше за $8 \cdot 10^{-6}$ м і вологість не більше 10%.

Як флюси, застосовуються звичайний і доломітизований вапняки, вапно, верхня межа медіанного діаметру яких для отримання якісного агломерату, складає $3 \cdot 10^{-6}$ м, причому, вміст фракції більшої за $3 \cdot 10^{-6}$ м у подрібнюваній суміші флюсу не повинен перевищувати: 5% – при використанні на грохотах сіток з осередком 3 x 3 мм; 9% – при використанні на грохотах сіток з осередком 4 x 4 мм.

Як тверде паливо для агломерації використовується дріб коксовий, горішок коксовий, що поступають з доменного цеху і коксохімічного заводу, а також вугілля марок АШ і АС. Паливо перед використанням піддається усереднюванню в бункерах агломераційного цеху і піддається подрібненню до медіанного діаметра $3 \cdot 10^{-6}$ м. Масова доля фракції більшої за $3 \cdot 10^{-6}$ м у подрібнювальному паливі не повинна перевищувати 9%, а кількість фракцій менших за $0,5 \cdot 10^{-6}$ м має бути мінімально можливою.

Обрат величиною від (0 до 12) 10^{-3} м поступає в барабан гасіння, де охолоджується водою до 80°C , після чого системою конвеєрів подається в шихту на збірні конвеєри ПС–1 і ПС–2 і далі – в барабани первинного змішування. Кожній шихті відповідає оптимальний вміст вологи, що забезпечує найкраще її грудкування, а отже, газопроникність шару, який спікається, і швидкість спікання. Для шихти, в залізородній частині якої знаходиться від 50% до 80% концентрату, оптимальна вологість шихти складає від 72% до 80%. Коливання вологості шихти не повинні перевищувати $\pm 0,5\%$ від оптимальної. При зменшенні медіанного діаметру шихти (збільшення частки концентрату,

зменшення кількості обrotу тощо) вологість шихти необхідно збільшувати, а при його збільшенні – зменшувати.

Шихта з барабану видається на човниковий розподільник, який рівномірно завантажує її в проміжний бункер над агломашиною, для нормального завантаження його шихтою необхідно підтримувати постійний запас шихти, який дорівнює половині місткості бункера.

5.2. Фізико-хімічні якості пилу

Здатність змочуватись визначає наступні групи пилу: легко змочувані (гідрофільні) і погано змочувані (гідрофобні) і це необхідно враховувати при боротьбі з аерозолями та аерогелями в агломераційному виробництві.

Дисперсний склад пилу визначає розмір частинок пилу у загальній масі аерозолю [126]. Фракційний склад пилу на збагачувальних фабриках, зазвичай, представлений: а) великодисперсною фазою, яку видно очима (фракції пилу розміром більшим за $10 \cdot 10^{-6}$ м); б) дрібнодисперсною фазою з розміром частинок пилу $(10 - 0,25) \cdot 10^{-6}$ м; в) колоїдною фазою з розміром частинок пилу меншими за $0,25 \cdot 10^{-6}$ м.

Таблиця 5.1

Дисперсний склад пилу, який утворюється при переробці руд

Місце заміру	Конц. пилу	Дисперсний склад пилу, 10^{-6} м				
		До 1	1–2	2–5	5–10	10
Місток шнекової дробарки	647	61,5	26,0	10,0	2,5	0,6
Місток стрічкового подавача	406	66,0	25,0	7,0	1,9	0,6
Під щелепною дробаркою	3175	55,0	35,9	7,3	1,8	0,4
Біля конусної дробарки	1149	71,0	21,5	7,5	0,4	0,4
Між конусними дробарками	794	68,0	22,0	8,0	0,4	0,2
Транспортна галерея	2439	63,0	26,0	10,0	1,0	0,2

З табл. 5.1 видно, що основна маса пилу представлена частинками меншими за $2 \cdot 10^{-6}$ м (89,5%). Пил такої дисперсності може знаходитись у зваженому стані атмосфери цеху досить тривалий час, особливо при наявності потоків повітря, які створюються рухом окремих частин обладнання, найбільше клиноременевими передачами тощо. За дисперсним складом пилу можна робити висновок про її шкідливість.

В табл. 5.2 наведений дисперсний склад пилу, кількості якого наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.2

Дисперсний склад (ротаційна сепарація в промислових умовах)

d 10^{-6} м	4	6,3	10	16	25	40	63
g %(по масі)	95,9	93	87	78,5	67,5	53,5	40
v см/с	0,19	0,47	1,2	3,06	7,48	18	39

Концентрація пилу в повітрі залежить, в першу чергу, від вологості руд, які переробляються. Зазвичай, менше пилять руди, які видобуваються підземним способом. Вологість таких руд коливається між 2 і 6%, а при такій вологості виділення пилу відбувається, головним чином, на третій стадії розмелення і при грохоченні. В табл. 5.3 наведені дані про рівноважну вологість пилу при різній відносній вологості повітря.

Таблиця 5.3

**Рівноважна вологість пилу $\varphi_{п}$ при різній відносній вологості повітря $\varphi_{в}$
(змочуваність 36%)**

$\varphi_{п}, \%$	0,07	0,08	0,09	0,10	0,36	0,94
$\varphi_{в}, \%$	10	20	40	60	80	95

Абразивність пилу враховують обов'язково при проектуванні аспіраційних систем, через те, що відомі випадки, коли повітроводи аспіраційних систем, особливо їх фасонні частини, зношувались через 7 – 10 днів.

Характеристики пилу аглофабрики металургійного заводу: висота шару

шихти 250 мм, температура горну 1200 °С, склад шихти %: руда – 70, вапняк – 12, окалина – 8, шлам – 4, кокс – 6. Проба відібрана з газоходу перед батарейним циклоном і з бункеру циклону.

Морфологія частинок пилу. Частинки неправильної форми з гострими краями. Більшість частинок від бронзового до чорного кольору. Серед дрібних частинок зустрічаються світлі частинки голкоподібної форми. В загальній масі колір пилу – чорний ($d_{50} = 45 \cdot 10^{-6}$ м; $\alpha = 3,91$).

Механічні якості пилу: $\gamma_m = 4000$ кг/м³, $\gamma_{н.у.} = 2150$ кг/м³; $\gamma_{н.у.} = 2480$ кг/м³; $\alpha_{ст.} = 55^0$; $\alpha_{д.} = 55^0$; $p = 78$ Па; $K_a = 8,8 \cdot 10^{-11}$ м³ / кг.

Таблиця 5.4

Хімічний склад пилу (рН водної витяжки 8,0)

Компоненти	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	Al ₂ O ₃	S	MqO	п.п.п.
Склад, % (по масі)	6,5	56,8	18,9	6,3	1,6	0,2	2,95	3,2

5.3. Міроприємства технологічного порядку для покращення екологічних показників роботи

При проектуванні аспіраційних установок для цехів розмелення збагачувальних фабрик в наше завдання входив цілий комплекс питань, а саме: правильне визначення об'ємів аспірації, вибір обладнання, яке забезпечує вивільнення необхідних об'ємів повітря та його очищення перед викидом в атмосферу, а також міроприємства, що направлені на покращення та оздоровлення умов праці на цих підприємствах (гідрообезпилення, мокре прибирання цехів та дощування) [127]. Відомо, що застосування гідропнемообезпилювання значно збільшує загальний ефект боротьби з пилом. Іноді застосовують тільки один із цих способів обезпилювання. Але у всіх випадках, коли це допускається технологічним процесом, необхідно поєднувати аспірацію з гідро або пнемообезпилюванням.

Нормалізація умов праці та зменшення екологічного навантаження на

довкілля на рудозбагачувальних фабриках залежить від правильного вирішення наступних питань: а) винайдення систем і способів обезпилювання, які включають правильний при даних конкретних умовах вибір боротьби с пилом і правильне конструктивне оформлення окремих елементів установок обезпилювання; б) визначення об'ємів аспірації; в) вибір установки приточної вентиляції.

Крім того, поліпшенню санітарно-гігієнічних умов праці в дробільних цехах і вирішенню екологічних питань, в значній мірі, сприяють міроприємства технологічного порядку: зменшення кількості місць пересипів матеріалу, який транспортуємо з висоти падіння його зі стрічки на стрічку, скорочення стадії подрібнення, підвищення кута нахилу візків тощо.

Проте всі перераховані міроприємства можуть сприяти зменшенню тільки первинного пилоутворення, тобто пилоутворення, яке виникає в результаті транспортування і механічної переробки матеріалу.

Відомо, що крім первинного утворення пилу, у всіх цехах розмелення відбувається вторинне пилоутворення, яке дуже часто складає 40% від загальної запиленості цеху. Вторинне утворення пилу відбувається внаслідок вібрації механізмів, будівельних конструкцій, повітряних потоків, які виникають при русі стрічки пасів дробарок тощо. Для боротьби з вторинним пилоутворенням необхідно будівельні конструкції і підлоги підтримувати у вологому стані, проводити вологе прибирання і застосувати дощування.

Технічна характеристика молоткової реверсивної дробарки типу ДМРІЕ 14,5*1,3–1000: продуктивність – від 120 до 250 т/рік; вологовміст дробленого матеріалу – не більше 4%; кількість повздовжних молотків – 10 штук; загальна кількість молотків – 45 штук; розмір матеріалу, що поступає – до $80 \cdot 10^{-6}$ м; розмір шматка, що виходить – менше $25 \cdot 10^{-6}$ м.

Транспортування матеріалу здійснюється конвеєром СПЦ–230, з кутом транспортування до 35° , довжиною 200 м, дволанцюговий з центрально розташованим тяговим органом із накладними шкрябалками, що встановлюються з будь-яким кроком. Високоміцне з'єднання секцій конвеєра і

висока енергоозброєність забезпечують достатню його надійність і працездатність. Потужність приводу – 220 кВт.

Для транспортування матеріалу по конвеєрному ходу застосовані наступні конвеєри: СП–202 (скребковий), довжина в постачанні 200 м, продуктивність 600 т/рік, енергоозброєність – 2; електродвигуни типу 2ЕДКОФВ 250М4 потужністю по 55 кВт кожний, два стрічкових конвеєра ІЛ–100У – завдовжки 800 м кожний.

Транспортні засоби ділянки забезпечують роботу основних і допоміжних вантажопотоків. Транспортна лінія обладнана також скребковим конвеєром СПЦ–273 продуктивністю 480 т/рік, де матеріал перевантажується на скребковий конвеєр СП–202. Застосування скребкового конвеєра обумовлене його невеликими габаритами, високою надійністю і оперативністю монтажних робіт при його укороченні і нарощуванні. Зі скребкового конвеєра СПЦ–202 матеріал перевантажується на стрічковий конвеєр ІЛ – 100У (довжина одного стрічкового конвеєра 800 м), а потім на наступний стрічковий конвеєр.

Технологічна схема очисних робіт показана в розділі 1, де описані місця інтенсивного утворення пилу, концентрація якого значно перевищує гранично-допустимі норми.

5.4. Постановка завдання по реконструкції установки пиловловлювання

Донбаський державний технічний університет і ВАТ «Алчевський металургійний комбінат» розглянули пропозиції ДонДТУ, що стосуються поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці, які сприяють зменшенню кількості викидів шкідливих речовин в атмосферу. У цій пропозиції розглянуті принципово нові конструкції апаратів для очищування повітря від коксового пилу, створені в результаті дослідження математичної моделі процесу руху твердих часток в осесиметричних потоках полів швидкостей і розподілу рухів потоків у середині апарата, які задекларовані патентами України [117 – 119].

Усі запропоновані апарати були досліджені на дослідно-промисловій установці і експериментальному стенді, в повній відповідності з «Єдиною методикою порівняльних випробувань пиловловлювачів», в якій обумовлена методика проведення експерименту, методи підготовки пилу і методологія обробки експериментальних даних.

В результаті експериментів встановлено, що перепад статичного тиску в зоні сепарації пиловловлювача з жалюзійним відокремлювачем в 4 – 12 раз менший у порівнянні з аналогічним циклоном ЦН–11 з традиційною вихлопною трубою, який був застосований в існуючій установці. Зменшена металоємність конструкції. Установка жалюзійного відокремлювача сприяє підвищенню ефективності роботи пиловловлювача в середньому на 5 – 7%, при зниженні швидкості руху потоку повітря у вхідному патрубку від 18 до 20 м/с до 11 – 16 м/с. Гідравлічний опір апарата при цьому знижується в порівнянні з циклоном ЦН–11 в 1,7 – 2,4 рази. За результатами експериментальних і математичних досліджень встановлено, що кращою конструкцією є «Мокрий пиловловлювач із спеціальною формою жалюзі» авт. Батлук В.А., Проскуріна І.В., Мельников О.В. Патент на корисну модель № 29965 від 08.05.2007. В01D45/00, опубл. 11.02.2008 бюл. №3.

Розглянувши результати експериментальних досліджень, сторони прийшли до узгодженого рішення про те, що впровадження установки для очищення повітря від пилу, що включає запропонований пиловловлювач, може бути використано в промисловому виробництві для поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці і екологічної обстановки і вважають за доцільне проведення спільних робіт із впровадженням установки для очищення повітря від пилу, що включає мокрий пиловловлювач із спеціальною формою жалюзі (Патент на корисну модель № 29965 від 08.05.2007. В01D45/00, опубл. 11.02.2008 бюл. №3).

5.5. Опис установки для очищення повітря від пилу

У табл. 5.5 наведено наближений вміст пилу в аспіраційному повітрі.

Таблиця 5.5

Наближений вміст пилу в аспіраційному повітрі

Місце відбору пилу	Концентрація пилу, кг/м ³	Об'ємна маса суміші, мг/м ³	Дані
1	2	3	4
Подрібнювальний відділ окремих динасосових заводів при сухому процесі	2000 – 4000	1,202 – 1,204	Свердловський інститут охорони праці
Так само при зволоженні	130	1,2	Так само
Подрібнювальний відділі олов'яних та молібденових заводів	102420 – 22300	1,21 – 1,22	Інститут охорони праці

Як видно з даних табл. 5.5, концентрація пилу в аспірованому повітрі є досить високою, значне зниження вмісту пилу в аспірованому повітрі досягається лише при зволоженні руди, при цьому великі частинки пилу в повітрі майже не спостерігаються.

Зменшити винос пилу в аспіраційні повітрявловлювачі можна також за рахунок зменшення швидкості повітря в вертикальних повітрявловлювачах. На горизонтальних ділянках магістральних повітрявловлювачів аспіраційних систем швидкості пилоповітряної суміші є не меншими за 20 м/сек. Накопичування пилу може виникнути також через конденсацію вологи на стінках повітрявловлювача. Сухий пил при відсутності конденсації відкладається тільки в нижній частині повітрявловлювача, а при конденсації пил налипає по всьому його периметру. Така ситуація може виникати в приміщенні, яке не опалюється, або повітрявловлювачі аспіраційних систем знаходяться за межами приміщення, яке опалюється, наприклад коли

обладнання встановлюється за межами приміщення, тобто на вулиці. Змішування теплого повітря з відносно високою вологістю, особливо при гідрознепилюванні з більш холодним, може деколи призводити до конденсації на поверхні пилинок, а в деяких випадках і на стінках повітрявловлювачів.

Визначимо об'єми аспірації від сховищ подрібнювання, а також від сховищ на стрічці транспортера на другій і третій стадії подрібнювання при застосуванні звичайної схеми середнього і дрібного подрібнювання:

Продуктивність подрібнювача $W_M = 300 \text{ м}^3/\text{год}$; коефіцієнт тертя руди зі сталлю $f = 0,58$.

Визначаємо об'єм відсмоктувача від сховища подрібнювача.

Висота падіння матеріалу за течією під кутом до горизонту $\alpha = 40^\circ$ сягає 2 м.

$$v_k = \sqrt{19,62 \cdot 2(1 - 1,2 \cdot 0,58 \text{ctg}40)} = 2 \text{ м/с.}$$

На другій ділянці падіння матеріалу відбувається під кутом $\alpha = 90^\circ$, висота падіння 1 м. Збільшення кута нахилу: $90 - 40 = 50^\circ$.

Коефіцієнт, який враховує зменшення швидкості, $K_T = 0,64$:

$$\begin{aligned} v_k &= \sqrt{19,62 \cdot H(1 - 1,2f \cdot \text{ctg}\alpha) + (v_{\text{нач}} \cdot K_T)^2} = \\ &= \sqrt{19,62 \cdot 1 + (3 + 0,64)^2} = 4,8 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

Об'єм повітря, з яким виноситься матеріал:

$$L_e = 0,12W_M v_k^2 = 0,12 \cdot 300 \cdot 4,8^2 = 838 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Об'єм повітря, яке всмоктується через нещільність прилягання, тобто через щілини:

$$L_H = 250Dv_k = 250 \cdot 2,2 \cdot 4,8 = 2640 ,$$

де D – діаметр подрібнювача, м.

Сумарний об'єм аспірації

$$L_a = 838 + 2640 = 3478 \text{ м}^3/\text{год.}$$

З подрібнювача КСД матеріал розвантажується на транспортер розміром 1750×3500 мм. При цьому руда падає на рудну подушку з висоти $H = 2,5$ м під

кутом 90° .

Кінцева швидкість падіння матеріалу

$$v_k = \sqrt{19,62 \cdot 2,5} = 7,0 \text{ м/с.}$$

Рух матеріалу на рудній подушці здійснюється під кутом 45° ; $K_T = 0,69$; висота падіння матеріалу $H = 2$ м.

$$v_k = \sqrt{19,62 \cdot 2(1 - 1,2 \cdot \text{ctg}45 + (7 \cdot 0,69)^2)} = 6,3 \text{ м/с.}$$

Об'єм повітря, яке виноситься падаючим матеріалом:

$$L_e = 0,12W_M v_k^2 = 0,2 \cdot 300 \cdot 6,3^2 = 2400 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Об'єм повітря, яке всмоктується через нещільність прилягання, тобто через щілини:

$$L_H = 300W_y = 300(2,2 \cdot 3,8 \cdot 2,5) = 6300 \text{ м}^3/\text{год.}$$

де W_y – об'єм сховища, м.³

$$L_a = 2400 + 6300 = 8700 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Надалі матеріал з транспортера прямує на мілке подрібнювання в подрібнювач КМД –2200–600. Продуктивність подрібнювача $W_M = 200$ м³/год.

Ділянка перша.

Падіння матеріалу по похилій під кутом 40 град. Висота падіння $H = 2,1$ м.

$$v_k = \sqrt{19,62 \cdot 2,1 \cdot (1 - 1,2 \cdot 0,58 \text{ctg}40)} = 2,65 \text{ м/с.}$$

Друга ділянка.

На цій частині напрямку течії змінюється – кут падіння матеріалу стає рівним 90град.

Висота падіння матеріалу $H = 1$ м. Величина кута $90 - 40 = 50^\circ$. $K_T = 0,64$.

Звідси кінцева швидкість падіння:

$$v_k = \sqrt{(2,65 \cdot 0,64)^2 + 19,62 \cdot 1,0} = 4,75 \text{ м/с.}$$

Об'єм повітря, що виноситься матеріалом:

$$L_e = 0,12 \cdot 220 \cdot 4,75^2 = 600 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Об'єм повітря, яке всмоктується через нещільність прилягання, тобто

через щілини:

$$L_H = 150 \cdot 2,2 \cdot 4,75 = 1570 \text{ м}^3/\text{год},$$

$$L_a = 600 + 1570 = 2170 \text{ м}^3/\text{год}.$$

З подрібнювача КМД–2200–2600 подріблений матеріал знов вивантажується на конвеєр.

$$W_M = 200 \text{ м}^3/\text{год}, \text{ ширина конвеєра } B = 1600 \text{ мм}.$$

Матеріал падає на рудну подушку з висоти 3 м під кутом 90° зі швидкістю:

$$v_K = \sqrt{19,62 \cdot 3,0} = 7,6 \text{ м/с}.$$

Надалі напрямок руху матеріалу змінюється і він падає під кутом 45° , тоді $K_T = 0,69$; а висота падіння матеріалу $H = 2$ м, тоді швидкість:

$$v_K = \sqrt{19,62 \cdot 2(1 - 1,2 \cdot 0,58 \cdot \text{ctg}45 + (7,6 \cdot 0,69)^2)} = 6,6 \text{ м/с}.$$

Об'єм повітря, яке виноситься падаючим матеріалом:

$$L_e = 0,12W_M v_K^2 = 0,2 \cdot 200 \cdot 6,6^2 = 1760 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Об'єм повітря, яке всмоктується через нещільність прилягання, тобто через щілини:

$$L_H = 460B^2 v_K = 460 \cdot 1,6^2 \cdot 6,6 = 9650 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Кількість матеріалу пересипаного на конвеєр під решіткою:

$$W_M = 300 - 200 = 100 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Швидкість падіння матеріалу на рудну подушку з висоти 4,0 м під кутом 90° :

$$v_K = \sqrt{19,62 \cdot 4,0} = 8,8 \text{ м/с}.$$

Швидкість ковзання матеріалу за течією та частково по рудній подушці ($H = 3,0$ м; $\alpha = 50^\circ$; $\beta = 40^\circ$; $f = 0,58$; $K_T = 0,63$):

$$v_K = \sqrt{(8,8 \cdot 0,63)^2 + 19,62 \cdot 3,0(1 - 1,2 \cdot 0,58 \cdot \text{ctg}50)} = 8,4 \text{ м/с}.$$

Далі матеріал падає на конвеєр: $H = 2,0$ м; $\alpha = 90^\circ$; $\beta = 40^\circ$; $K_T = 0,64$ зі швидкістю:

$$v_K = \sqrt{(8,4 \cdot 0,64)^2 + 19,62 \cdot 2} = 8,3 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Об'єм повітря, яке виноситься падаючим матеріалом:

$$L_e = 0,2 \cdot 120 \cdot 8,3^2 = 1650 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Об'єм повітря, яке всмоктується через нещільність прилягання, тобто через щілини:

$$L_n = 460 \cdot 1,6^2 \cdot 8,3 = 9780 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Кількість повітря, що аспірується від сховища конвеєра, складається із об'ємів матеріалу, що виноситься з подрібнювача та продукту, що знаходиться під решіткою, та об'єму, що всмоктується через нещільності при $v_k = 8,3 \text{ м/с}$:

$$L_a = 3050 + 9780 + 1650 = 14480 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Підсумок аспіраційних об'ємів:

1. Завантаження подрібнювача КСД – 3478 м³/год.
2. Розвантаження подрібнювача КСД – 8700 м³/год.
3. Завантаження подрібнювача КСМ – необхідний об'єм повітря що відсмоктується дорівнює 2170 м³/год, а кількість повітря, що ежектується матеріалом, який проходить через подрібнювач складає 3050 м³/год. Цей об'єм повітря ежектується через подрібнювач, який є щільним, тому нема необхідності в обладнанні відсмоктувача від місця завантаження цього подрібнювача. Та все одно автор вважає, що пристрій відсмоктування буде корисним, наприклад, при можливості затримання матеріалу в подрібнювачі.

4. Розвантаження подрібнювача КДМ – 14480 м³/год.

5. Сумарний об'єм аспірації від запилених місць другої і третьої стадії подрібнення: $3478+8700+14480=26\ 658 \text{ м}^3/\text{год}$, що складає на одну тонну руди близько 94 м³ повітря, а сумарно з об'ємами аспірації першої стадії подрібнення, розрахунки якої тут наведені – приблизно 110 м³ на 1 т руди. Цей об'єм є наближеним до середнього об'єму. Ефективність аспіраційних установок з об'ємами повітря, наближені до тих, які ми отримали при розрахунках, спонукала авторів пропонувати саме цей метод розрахунку.

Для очищення повітря, яке відсмоктується від різних джерел пилу, перед його викидом ми запропонували наступні пиловловлюючі апарати:

1) від приймальних бункерів руди – мокрі пиловловлювачі нашої конструкції (розділ 4 – апарат I), які встановлюються на відкритому повітрі з розрахунковою температурою до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, із захистом проти замерзання, подача води з пиловловлювачем, випуск води із пиловловлювачів через труби з перерізом і постійно наповнені водою, теплоізоляція самих пиловловлювачів;

2) від місць крупного, середнього та мілкового подрібнення руди, складів та бункерів подрібненої руди, перевантажувальних вузлів – мокрі пиловловлювачі апарати другого типу (розділ 4 – апарат II).

Відпрацьована вода містить 15 – 20 г/л твердих речовин, яка очищується у фільтрах самого апарата. Для ефективної роботи аспірації важливо забезпечити герметичність аспіраційних систем.

Установка для очищення повітря від пилу складається з герметичних укриттів: для верхньої частини конвеєра 1 і для нижньої частини його – 2, вертикального каналу, відцентрово-інерційного апарата для очищування повітря від пилу з пластинами жалюзі складної конфігурації 4 сухого типу, підводного патрубку 5 для відбирання пилоповітряного потоку з конвеєра і патрубка 6 для відводу очищеного в апараті 4 повітря назад у верхню частину конвеєра, патрубка 9 для відводу виділеного з потоку пилу в бункер апарата 10. Герметичні укриття верхнього і нижнього конвеєрів типові з покращеною конструкцією бічних і торцевих ущільнень 8, які є еластичними елементами, що контактують із гірською масою, що транспортується, і утворюють шлюзові камери, що сприяють вирівнюванню тиску повітря, що знаходиться в укритті. Конструкція торцевих ущільнень не перешкоджає транспортуванню пилової маси. Канал-тічка є герметичним каналом, який зв'язує як подаючий, так і приймальний стрічкові конвеєри без порушення раніше прийнятої технології перевантаження.

Запропонована схема є вдосконаленою схемою існуючої на даний день установки, в якій апарат пиловловлювання замінений на відцентрово-інерційний пиловловлювач з пластинами жалюзі складної конфігурації (розділ 4 – апарат III).

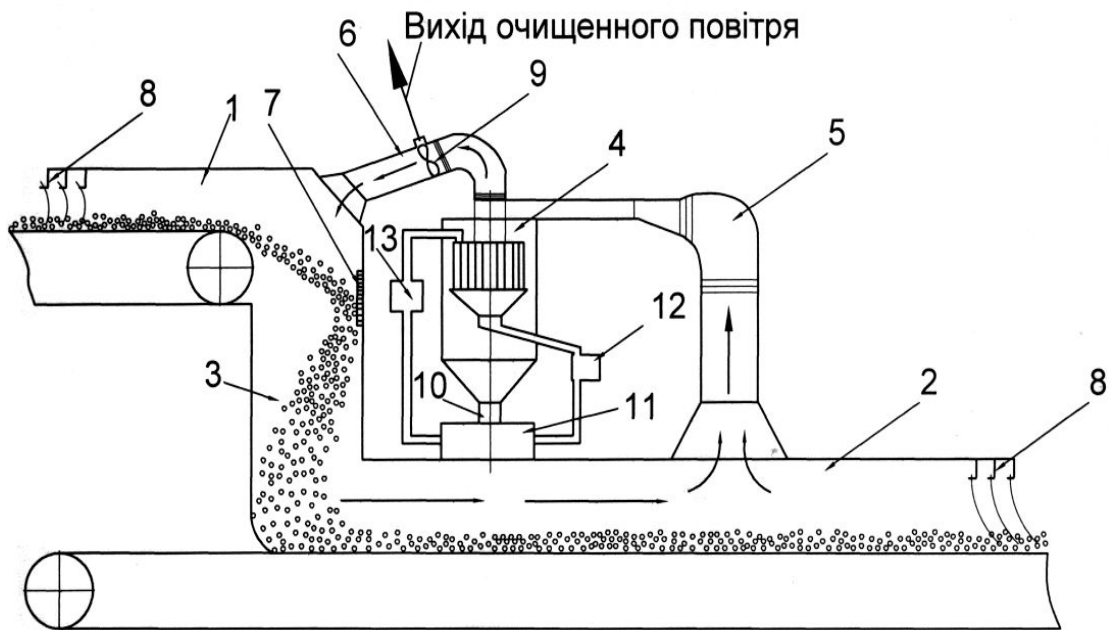


Рис. 5.5. Рециркуляційна установка знепилювання повітря з відцентровим апаратом з жалюзійним відокремлювачем:

1 – укриття верхнього конвеєра; 2 – укриття нижнього конвеєра; 3 – укриття каналу-тічки; 4 – відцентровий апарат з жалюзійним відокремлювачем; 5 – трубопровід, який підводить повітря; 6 – трубопровід, який відводить повітря; 7 – відбійна плита; 8 – шлюзова камера; 9 – вентилятор високого тиску ВВД-3; 10 – патрубок для відводу повітря; 11 – бункер; 12 – фільтр; 13 – насос

Для експериментального дослідження дослідно-промислової установки, наведеної на рис. 5.5, був проведений весь комплекс досліджень, згідно з вимогами, які наведені в Розділі 2 і аналогічно дослідженням апаратів для очистки повітря від пилу, наведених у розділі 4 роботи.

5.6. Дослідження дослідно-промислової установки

Як уже зазначалось вище, в установці, наведеної на рис. 5.5, ми замінили апарат 4 з циклона на мокрий пиловловлювач із спеціальною формою пластин жалюзі (рис. 5.6), який описаний у розділі 4 роботи (рис. 4.5, 4.6).

Загальний вигляд впровадженої установки для очищування повітря від

пилу на вузлах пересипу наведений на рис. 5.6. З метою дослідження роботи запропонованого пиловловлювача у виробничих умовах ми визначили залежність ефективності роботи (рис. 5.7) і гідравлічного опору (рис. 5.8) пиловловлювача від витрат повітря (Додаток Д), які підтвердили результати експериментальних досліджень на стандартному лабораторному стенді та довели, що впровадження запропонованого пиловловлювача дозволяє підвищити ефективність уловлення пилу, який утворюється на пересипах стрічкових транспортерів на 2 – 3%, і дозволить досягти нормованих гранично-допустимих норм концентрації пилу в повітрі робочої зони та зменшити викиди пилу у навколишнє середовище. Також слід зазначити, що розміри апарата та його металоємність зменшились приблизно в 1,2 раза.



Рис. 5.6. Загальний вигляд пересипної ділянки

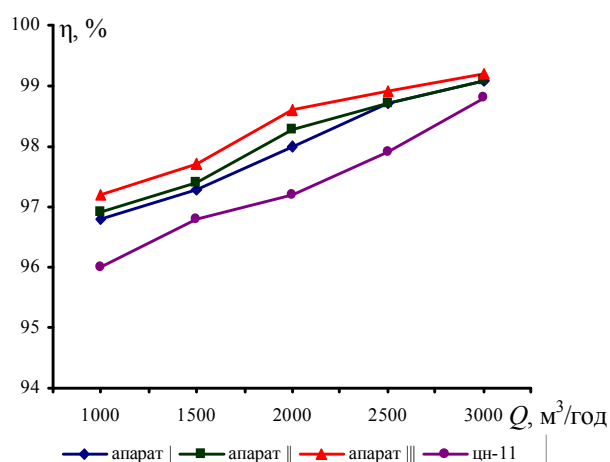


Рис. 5.7. Залежність ефективності пилоловлювання від витрат повітря

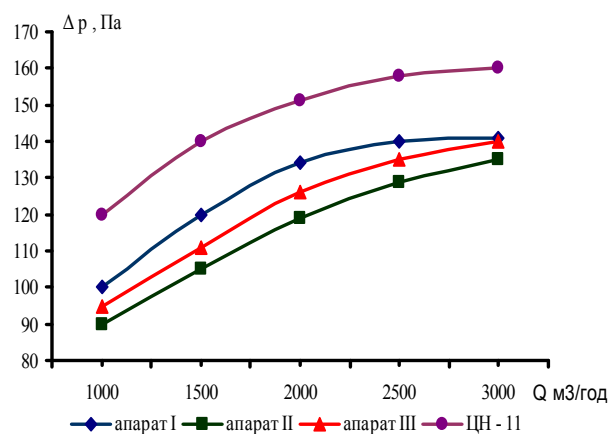


Рис. 5.8. Залежність гідравлічного опору від витрат повітря

5.7. 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 розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться в викидах підприємств (ОНД–86)”. 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 кожного майданчика в розрахункових прямокутниках з розміром сторін 2000 м на 2000 м та кроком розрахункової сітки 100 м. Шкідливою речовиною в даному випадку є викиди пилу, який утворюється на пересипах агломераційного виробництва, фізико-хімічні характеристики якого наведені в розділі 5.2.

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. 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 пиловловлювачами ЦН–11, виявлено перевищення ГДК для пилу агломераційного виробництва. Концентрація пилу на межі санітарно-захисної зони становить 1,74 ГДК.

У випадку джерел викиду, що обладнані розробленими пиловловлювачами, перевищень ГДК не спостерігається. Для всіх джерел викиду, що обладнані розробленими пиловловлювачами, концентрація пилу на межі санітарно-захисної зони становить 0,62 ГДК.

Для існуючого пиловловлюючого обладнання та створених і впроваджених пиловловлювачів, де ми замінили циклон ЦН–11 на мокрий пиловловлювач із спеціальною формою пластин жалюзі (рис. 5.6), який описаний у розділі 4 роботи (с. 106) під номером III, побудовані карти розсіювання пилу на території підприємств, де розташоване металургійне виробництво.

Продуктивністю 26 658 м³/год. Ефективність цієї установки 95,7% (при використанні циклонів – 93,8%), тобто впровадження запропонованого пиловловлювача дозволяє вловити пил, який утворюється на пересипах стрічкових транспортерів на 2 – 3%, що дозволить досягти нормованих гранично-допустимих норм концентрації пилу в повітрі робочої зони. Акти випробувань і використання наведені в додатку Е (загальний вигляд установки

наведений на рис. 5.5, 5.6).

Карти розсіювання пилу на території підприємства, що було обладнано пиловловлювачами ЦН-11 (рис. 5.9) та після впровадження нових пиловловлювачів (рис. 5.10). Параметри розрахункових даних для визначення карти розсіювання наведені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6.

Параметри розрахункових даних

	Система очистки від золи	
	циклон ЦН-11	пиловловлювач
Потужність викиду, 10^{-3} кг/с	1,3764	0,3182
Потужність викиду за рік, кг/рік	29730	6873
Частка ГДК	2,1493	0,4969
Витрат пилогазової суміші, $\text{м}^3/\text{с}$	10	10
Висота джерела викиду, м	12	12
Діаметр джерела викиду, м	1	1
Температура, $^{\circ}\text{C}$	130	130

Впровадження пиловловлювачів нашої конструкції для очистки викидів агломераційних виробництв дозволило тільки шляхом заміни існуючих апаратів пилоочистки (циклонів ЦН-11) збільшити ефективність пиловловлення, зменшивши при цьому гідравлічний опір і габаритні розміри установки. Відповідно, можна зробити висновок, що встановлення нових пиловловлювачів на дані джерела викидів, в порівнянні з попереднім очисним обладнанням, дозволило суттєво знизити приземні концентрації та обсяги викидів пилу, що призвело до покращення стану навколишнього середовища в районах даних населених пунктів.

5.8. Висновки

1. Аналіз стану вивчення питання вловлювання пилу при роботі металургійного комплексу довів, що в даний час не існує системи пиловловлювання, яка здатна високоефективно вловлювати дрібнодисперсний пил і довести його викиди до гранично допустимих норм. Тому нами запропонована

пил агломераційного цеху

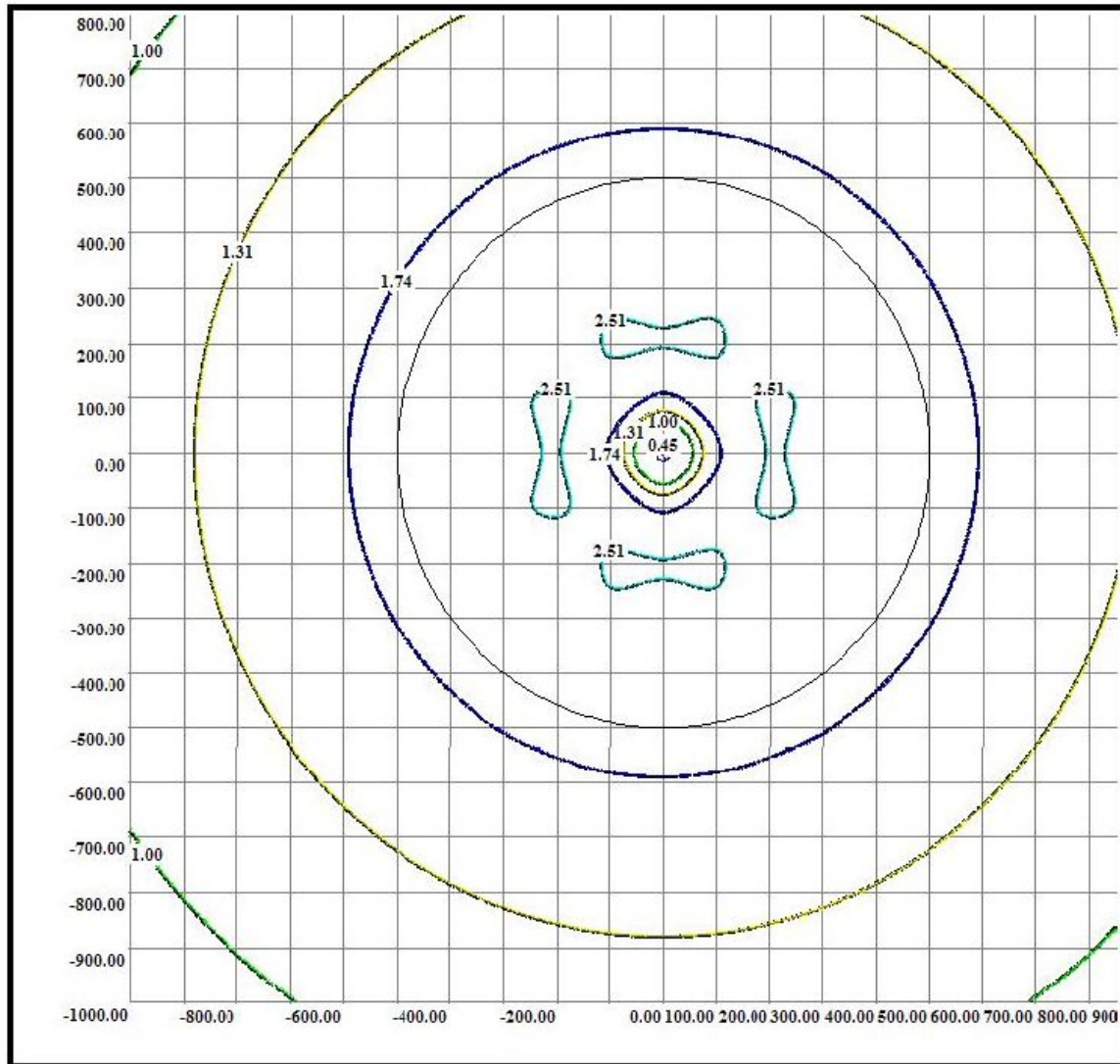
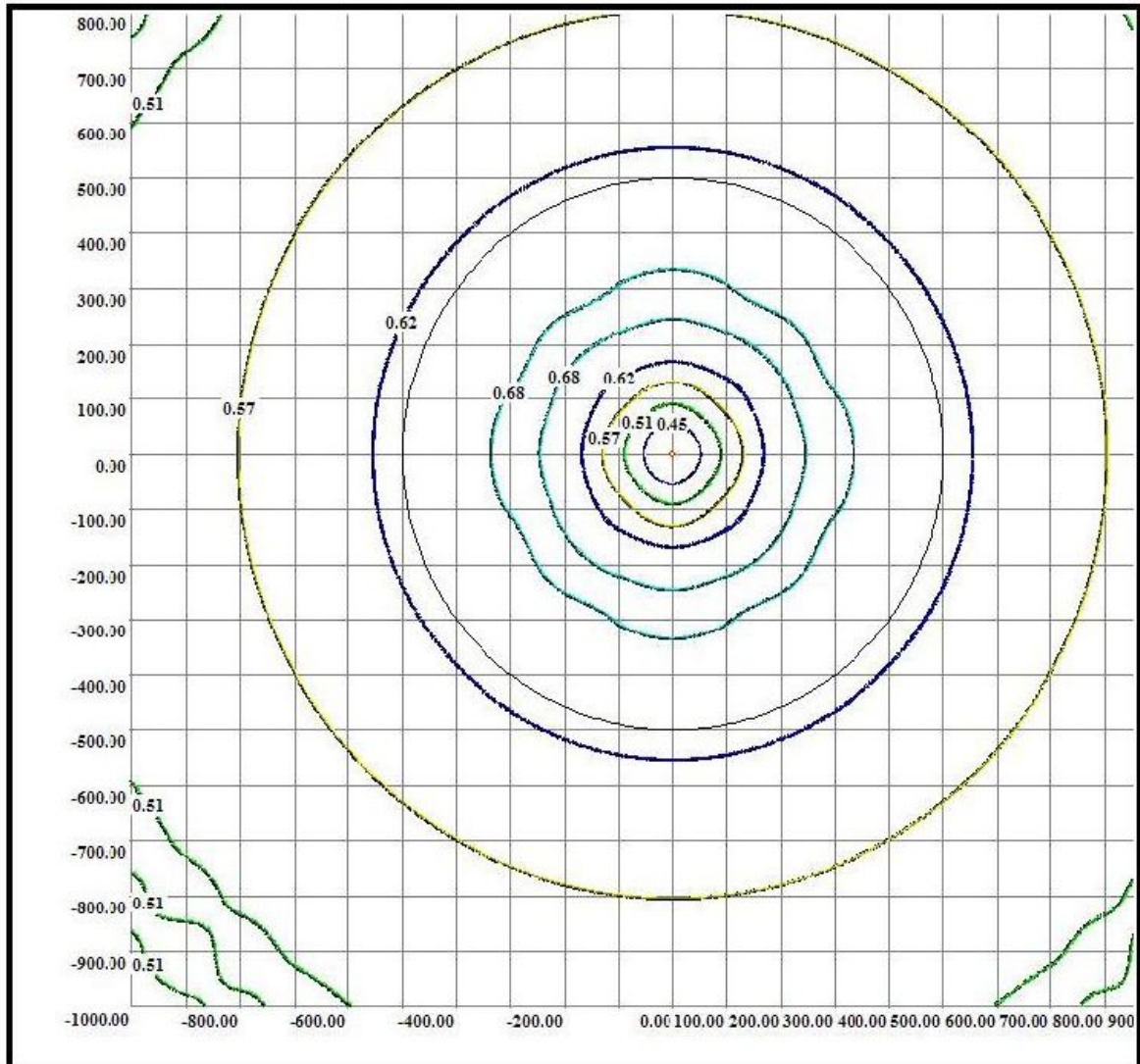


Рис. 5.9. Карта розсіювання пилу для всіх джерел викиду пилу агломераційного виробництва, які обладнані циклоном ЦН-11

пил агломераційного цеху



— Нормативна санітарно-захисна зона

Рис. 5.10 Карта розсіювання пилу для всіх джерел викиду пилу агломераційного виробництва, які обладнані мокрими пиловловлювачами із спеціальною формою жалюзі

пиловловлююча система, в якій в якості апарата для очищування повітря від пилу використаний апарат третього типу, розроблений автором замість встановленого в існуючій установці циклона ЦН-11.

2. Експериментальні дослідження реконструйованої установки дозволяють говорити про значне (до 4 – 5%) підвищення ефективності вловлювання дрібнодисперсного пилу у запропонованій системі пилоочищування при тому, що вловлення грубодисперсного пилу виросло на 14 – 17%, а це відкриває широкі перспективи для впровадження запропонованої конструкції в металургійному виробництві. Впровадження запропонованих пиловловлювачів дозволяє знизити промисловий негативний вплив на атмосферу і зменшити загрозу глобальних наслідків для майбутніх поколінь, шляхом проведених серйозних інженерних рішень по попередженню викидів дрібнодисперсних аерозолей металургійної галузі.

РОЗДІЛ 6

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ

6.1. Техніко-економічні показники пиловловлюючого обладнання

Економічне значення пиловловлення полягає не тільки у використанні коштовних компонентів пилу й газових домішок, але і у запобіганні збитку, заподіюваного пилом, що викидається як у повітря робочої зони, так і в атмосферу, і у чималій мірі збереженню здоров'я людей.

Величина витрат на очищення газів залежить від багатьох факторів: методу пиловловлення й конструкції апаратури, особливостей технологічного процесу, витрат енергії й матеріалів тощо. Капітальні вкладення і вартість основних фондів на пиловловлення залежать переважно від числа і вартості пиловловлюючих апаратів, обумовлених об'ємами газів, що очищаються, і ступенем уловлення пилу.

За даними В.Н. Лексина і А.Г. Токаревіч, у загальних витратах на очищення газів амортизація і вміст основних засобів становлять від 20 до 40%, на електроенергію і матеріали доводиться від 20 до 30% витрат, на поточний ремонт витрачається від 10 до 20%, трудові витрати на обслуговування обладнання у загальних витратах не перевищують, як правило, 10% і постійно скорочуються.

Чим вище повинна бути ступінь уловлювання дрібнодисперсного пилу ($(0-5) \cdot 10^{-6}$ м), тим більші капітальні і експлуатаційні витрати на газоочисну установку.

Нижче наведені дані (табл. 6.1), що ілюструють взаємозв'язок ефективності вловлювання дрібнодисперсного пилу ($(0-5) \cdot 10^{-6}$ м), капітальних і експлуатаційних витрат (витрати наведені в умовних одиницях; за одиницю прийняті витрати для циклону ЦН-11).

Таблиця 6.1

Взаємозв'язок ефективності вловлювання дрібнодисперсного пилю, капітальних і експлуатаційних витрат

Пиловловлювач	Ефективність уловлення, %	Втрати тиску, мм вод. ст.	Капітальні витрати	Експлуатаційні витрати
Циклон середньої ефективності	27	95	1	1
Циклон підвищеної ефективності	73	125	1,9	1,43
Сухий електрофільтр	92	15	9,1	1,90
Рукавний фільтр	99,9	125	5,15	4,10
Швидкісний пиловловлювач (труба Вентурі)	99,6	560	4,55	6,60

Підвищення вимог до очищення газів призводить до збільшення кількості і ціни пиловловлюючого устаткування, але вартість додатково вловленого тонкого пилю вже не покриває непропорційно зростаючі витрати, але у масштабах країни це компенсується зниженням економічного збитку від забруднення атмосфери пиловими викидами, і більш раціональним використанням продуктів тонкої газоочистки, як більш якісних у порівнянні з пилом грубого очищення, насамперед збереженням здоров'я працюючих.

Основними напрямками розвитку пило- і газовловлення у металургійній промисловості є наступні: оснащення всіх пило- і газовиділяючих агрегатів ефективними пиловловлювачами; герметизація транспортних пристроїв та інших механізмів з відводом запилених вентиляційних газів для тонкого очищення їх від пилю; широке застосування води в процесах для зменшення кількості газів, що викидаються.

6.2. Розрахунок техніко-економічного ефекту від впровадження відцентрово-інерційних апаратів на металургійних підприємствах

При техніко-економічному обґрунтуванні застосування апаратів

пиловловлення повинна враховуватись максимально більша кількість факторів, а саме:

а) найбільш імовірний повний обсяг усіх соціально-економічних наслідків в металургійній промисловості, як у найближчих, так і у більш віддалених перспективах;

б) повний обсяг усіх витрат пов'язаний із впровадженням апаратів;

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

Економічним ефектом впровадження нових пиловловлюючих апаратів є сума наступних величин:

- запобігання економічних збитків від забруднення робочих місць у матеріальному виробництві та невиробничій сфері;

- приросту економії за рахунок поліпшення умов праці, дякуючи впровадженню нових апаратів;

- приросту грошової оцінки реалізованої продукції, внаслідок більш повного використання шихти та інших матеріальних ресурсів;

- приросту готової продукції, за рахунок підвищення ефективності вловлювання пилу, який містить готовий продукт.

Вихідною інформацією для визначення економічної ефективності приймається:

- для населення – екологічно обумовлені працездатність, захворюваність та інвалідність по кожному нозологічному виду (по віку, зайнятості і тривалості захворювання або інвалідності з тимчасовою чи постійною втратою працездатності); витрати організацій та установ охорони здоров'я на стаціонарне і 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 і інвалідності для зайнятих у сфері матеріального виробництва;

- для підприємства – термін служби основних фондів; періодичність проміжного та планового (попереджувального) ремонтів житлових і суспільних будівель; тривалість міжремонтних циклів, капітальних ремонтів; простоїв обладнання під час ремонту;

- 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 фондівдачі (у натуральних вимірниках); вартість основних виробничих фондів, які знаходяться в забрудненій зоні.

Як приклад, розглянемо економічну ефективність від впровадження пиловловлювача нашої конструкції на дільниці пересипу конвеєра за добу.

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

$$Z = \gamma \cdot G \cdot F \cdot M, \quad (6.1)$$

де Z – 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 повітрі дрібнодисперсних частинок пилу зі швидкістю осідання понад $20 \cdot 10^{-2}$ м/с; M – значення приведеної маси річного викиду забруднень, яке визначається за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^N A_i \cdot m_i, \quad (6.2)$$

де m_i – маси річного викиду домішок i -го виду пилу в повітря приміщення, залежить від ефективності роботи застосованого апарата, т/рік; A_i – показник відносної агресивності домішок i -го виду, для шихти – $A_i = 45$; N – загальна кількість домішок, т/рік.

У конкретному випадку до застосування нашого апарата ефективність вловлення пилу складала 95,1 %, а після впровадження апарата нашої

конструкції (Розділ 4) ефективність вловлення складала 96,3 %, тобто вдалося підвищити її на 4,5 %.

За добу в повітря робочої зони виноситься 170 – 180 кг пилу (візьмемо для розрахунку 175 кг).

При ефективності вловлення – 95,1 % викидається в повітря робочої зони 8,57 кг пилу за добу; при ефективності 96,3 % – 6,47 кг шихти за добу.

Відповідно m_i до впровадження складає:

$$45 \cdot 365 \cdot 8,57 \text{ кг} = 140,76 \text{ т},$$

m_i після впровадження:

$$45 \cdot 365 \cdot 6,47 \text{ кг} = 106,26 \text{ т}.$$

Збитки до впровадження установок пиловловлювання складають:

$$2,4 \text{ грн/т} \cdot 4 \cdot 10 \cdot 140,76 \text{ т} = 13513 \text{ грн}.$$

Збитки після впровадження запропонованих установок складають:

$$2,4 \text{ грн/т} \cdot 4 \cdot 10 \cdot 106,26 \text{ т} = 10201 \text{ грн}.$$

Наведений приклад розрахунку економічної оцінки збитків, що спричиняють викиди металургійного пилу в повітря робочої зони, показує, що використання розробленого пиловловлювача в установці для очищення повітря від пилу зменшує збитки у 1,32 раза.

Розрахуємо чистий економічний ефект від впровадження запропонованих нами пиловловлювачів. Чистий економічний ефект в даному випадку визначається, як вартість додаткового продукту (в даному випадку шихти), вловленого з пилоповітряної суміші, завдяки підвищенню ефективності пиловловлювання системи з 95,1 % до 96,3 %. Розрахунок проводиться за формулою:

$$E_{\text{ч}} = (M_{\text{ст}} - M_{\text{н}}) \cdot B, \quad (6.3)$$

де $E_{\text{ч}}$ – чистий економічний ефект, грн.; $M_{\text{ст}}$ – маса в пилу, що викидається у повітря в старій системі пиловловлювання, т; $M_{\text{н}}$ – маса пилу, що викидається у повітря в впровадженій системі пиловловлювання, т; B – вартість пилу, 20 грн./т.

$$E_{\text{ч}} = (140,76 - 106,26) \cdot 20 = 690 \text{ грн.}$$

Таким чином, сумарний економічний ефект становить суму всіх складових даного розрахунку:

$$\Sigma = 3312 + 690 = 4002 \text{ грн.}$$

Аналогічним чином проводиться техніко-економічне обґрунтування впровадження у виробництво всіх розроблених нами пиловловлювачів.

Крім показників, які легко можна підрахувати, існує ціла низка питань морального походження. Пилова патологія легенів, перш за все пневмокніоз та хронічний пиловий бронхіт, традиційно займають перші місця в структурі професійної захворюваності населення протягом багатьох десятиріч. Частка вперше виявлених в Україні пневмокніозів та хронічних бронхітів в 2009 р. складає 27,5 % (710 випадків) та 21,8 % (564 випадки), а в 2001 р. – 34,9 % (1406 випадків) та 21,7 % (876 випадків) відповідно. При цьому переважаюча більшість випадків зафіксована у Донецькій області, яка є лідером металургійної галузі.

Серйозним недоліком діючої Гігієнічної класифікації праці є неврахування фактору часу – стажу роботи, при якому виникає професійний ризик здоров'ю. Цей критерій має значення при будь-яких рівнях шкідливих виробничих факторів. Зокрема, пил руди має властивість затримуватись в легенях та виявляти патогенний ефект у віддалені строки життя після припинення роботи в контактi з пилом. Показники відносного ризику захворювання пневмокніозом робітників металургійних підприємств Донецької області були розраховані на основі даних про захворюваність працівників 11 виробничих об'єднань. Ці дані представлені в табл. 1.3. Результати розрахунків показують, що вже при 5-річному стажі роботи в умовах підвищеної запиленості (перевищення ГДК пилу в 2 – 15 разів) ризик розвитку пневмокніозу зростає з 1,75 до 17 %. Ризик подвоюється при 10-річному стажі роботи та збільшується в 5 разів при 25-річному стажі роботи. В екстремальних умовах роботи (перевищення ГДК пилу в 15 разів) ризик захворіти пневмокніозом вже при 15-річному стажі досягає 60 %, а при 25-річному стажі має становити 100 %

[127].

Встановлено достовірний сильний кореляційний зв'язок між пилом та захворюваністю органів дихання та загальною захворюваністю населення. Також спостерігається високий ступінь впливу пилу на нервову та ендокринну системи, на хвороби шкіри та органів травлення.

Безпека людини та стан оточуючого її середовища – одна з найважливіших характеристик якості життя, науково-технічного та економічного розвитку держави [17, 18, 59 – 63] і яку необхідно враховувати при оцінці економічної доцільності впровадження установок для очистки повітря від пилу.

Дані державної офіційної статистичної звітності та спеціальних досліджень свідчать про тісний зв'язок між змінами в виробничому середовищі та станом здоров'я населення.

Таблиця 6.2

Очікуваний ризик розвитку пневмоконіозу (РРП, %) в залежності від рівнів впливу пилу, співвіднесених з класами умов праці та стажу роботи

Показники	Класи умов праці				
	3.1	3.2	3.3	3.4	4
Перевищення ГДК пилу, раз	1,1 – 2,0	2,1 – 5,0	5,1 – 10,0	10,0 – 15,0	15,0 та >
РРП при стажу роботи 5 років, %	1,7 – 5,8	2,5 – 9,7	3,7 – 14,5	4,2 – 17,0	5,0 – 19,5
РРП при стажу роботи 10 років, %	3,5 – 11,7	5,0 – 19,4	7,5 – 29,0	8,5 – 34,0	10,0 – 39,0
РРП при стажу роботи 15 років, %10	5,2 – 17,5	7,5 – 29,1	11,2 – 43,5	12,7 – 51,0	15,0 – 58,5
РРП при стажу роботи 25 років, %15	8,7 – 29,2	12,5 – 48,5	18,7 – 72,5	21,2 – 85,0	25,0 – 97,5

Особливо негативний вплив змін оточуючого повітряного середовища простежується відносно хвороб органів дихання (хронічний бронхіт, бронхіальна астма, алергічний риніт), онкозахворювань, патології щитовидної залози, уроджених вад розвитку.

6.3. Висновки

1. Підвищення вимог до очищення газів призводить до збільшення кількості і ціни пиловловлюючого устаткування, але вартість додатково вловленого тонкого пилу, вже не покриває непропорційно зростаючі витрати, але у масштабах країни це компенсується зниженням економічного збитку від забруднення атмосфери пиловими викидами, і більш раціональним використанням продуктів тонкої газоочистки, як більш якісних у порівнянні з пилом грубого очищування, і насамперед збереженням здоров'я працюючих.

2. Наведений приклад розрахунку економічної оцінки збитків, що спричиняють викиди металургійного пилу в повітря робочої зони, показує, що використання розробленого пиловловлювача в установці для очищування повітря від пилу зменшує збитки у 1,32 раза.

3. Чистий економічний ефект від впровадження запропонованих нами пиловловлювачів складає 690 грн, а сумарний економічний ефект становить 4002 грн. на рік.

4. Встановлено достовірний кореляційний зв'язок між пилом та захворюваністю органів дихання та загальною захворюваністю населення. Також спостерігається високий ступінь впливу пилу на нервову та ендокринну системи, на хвороби шкіри та органів травлення. Комплексне вирішення еколого-гігієнічних проблем дасть змогу оптимізувати та цілеспрямовано керувати процесом оздоровлення населення.

ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень у дисертації вирішено важливу наукову задачу, яка полягає у встановленні факторів шкідливого впливу агломераційного виробництва металургійної промисловості на довкілля і створенні високоефективних систем пилоочищення в них за допомогою апаратів з покращеними аеродинамічними характеристиками та зниженим рівнем енергоспоживання, що відображається в наступних наукових положеннях і висновках:

1. Проведений аналіз сучасного стану проблеми з екологічної безпеки в металургійному виробництві в цілому і в агломераційному виробництві, зокрема, а також дослідження аеродинаміки закрученого двофазного потоку в криволінійних каналах довів необхідність зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище за рахунок створення конструкцій апаратів, здатних високоефективно вловлювати дрібнодисперсні фракції пилу з метою досягнення вимог ГДК і ГДВ.

2. Дослідивши траєкторії руху повітряних потоків і розподіл швидкостей і тисків у горизонтальних і вертикальних перерізах у запропонованому пиловловлювачі, вперше на основі теоретичних та експериментальних досліджень створена математична модель процесу руху частинки пилу в криволінійних потоках і отримані залежності сепараційної здатності його від геометричних параметрів самого апарата і жалюзійного відокремлювача в ньому, що дозволило спроектувати пиловловлювачі з чітко обмеженими конструктивними розмірами, які здатні значно підвищити ефективність роботи й тим самим забезпечити дотримання нормативів викидів пилу в навколишнє середовище, зменшивши таким чином техногенне навантаження на довкілля.

3. Для проведення розрахунку в програмі твердотілого моделювання створено тривимірну геометричну модель апарату з жалюзійним відокремлювачем, аналіз якої, на основі методів скінчених елементів та рівнянь Нав'є-Стокса, дав змогу розкрити фізичну суть руху повітряних потоків у новій

конструкції пиловловлювача, значно знизити кількість експериментальних досліджень та повести їх більш цілеспрямовано. Підтверджено доцільність застосування САПР Cosmos Flowworks для моделювання руху повітряних потоків у сепараторах нового типу (похибка між змодельованими та експериментальними результатами не перевищує 8% – 15%). Установлено, що інерційні сили сепарації на ділянці нестационарного руху на декілька порядків вище відцентрових, але внаслідок нетривалості їх дії вони можуть викликати несприятливі зміщення частинок до патрубку виходу очищеного повітря. У зоні встановленого руху сили гальмування, які діють на дрібнодисперсні частинки, можуть не враховуватися через їх невелику кількість.

4. Досліджено вплив конструктивних, технологічних і експлуатаційних характеристик створених пиловловлювачів на аеродинамічні процеси, які визначають ступінь очищення повітря від пилу. При встановленні жалюзійного відокремлювача коаксіально корпусу апарата, швидкість повітряного потоку у внутрішньому вгору спрямованому вихорі значно знижується, що призводить до сприятливіших умов пилоочищення за рахунок уникнення зайвої турбулізації потоку. Результати математичного моделювання, задіяні при комп'ютерному аналізі тривимірної моделі, продубльовані на стандартному експериментальному стенді для порівняльних випробувань пиловловлювачів. Установлено, що використання жалюзійного віддільника не знижує перепаду статичного тиску між віссю і периферією апарата, але впливає на його розподіл у просторі сепарації, знижуючи перепад тиску між стінкою апарата й жалюзійним відокремлювачем, що позитивно впливає на процес сепарації й тим самим сприяє зниженню пилових викидів. Установлення жалюзійного відокремлювача коаксіально корпусу апарата підвищує ефективність його роботи на 5 – 7% при зниженні швидкості руху пилоповітряного потоку у вхідному патрубку від 18 – 20 м/с до 11 – 16 м/с, гідравлічного опору апарата у 1,5 – 1,9 раза, а перепаду статичного тиску в сепараційній зоні пиловловлювача у 4 – 12 разів порівняно з еталоном. Це значно зменшує кількість викидів пилу в атмосферу, тим самим поліпшує

екологічну обстановку.

5. Обґрунтовано конструкції перспективних відцентрово-інерційних пиловловлювачів, які забезпечують зниження аеродинамічних втрат і підвищення ефективності очищення повітря від пилу за результатами експериментального визначення інтенсивності пиловидалення під час роботи транспортерних ліній в агломераційних цехах металургійного виробництва з урахуванням дисперсного складу, фізико-хімічних та механічних властивостей пилу, який при цьому утворюється. Розроблена й пройшла випробування схема знепилювання з використанням запропонованого мокрого пиловловлювача зі спеціальною формою жалюзі при роботі аспіраційних установок для цехів розмелення збагачувальних фабрик в умовах виробництва на ВАТ «АМК», яка дозволила підвищити на 4 – 5 % ефективність вловлювання дрібнодисперсного пилу на пересипних ділянках стрічкових транспортерів, знизивши тим самим викиди шкідливих речовин з них на десятки тон на день, досягти нормованих значень граничнодопустимих норм (ГДК та ГДВ), і зменшивши при цьому енерго- та металоємність в 1,2 раза. Це відкриває широкі перспективи для її впровадження в аналогічних виробництвах для значного зменшення викидів дрібнодисперсного пилу в атмосферу і покращення техногенного навантаження на довкілля.

6. Проведене екологічне та економічне обґрунтування впровадження запропонованих пиловловлювачів на пересипних ділянках стрічкових транспортерів агломераційного виробництва металургійних заводів. Визначено річний сумарний економічний ефект, який становить 4002 гривні. Крім того, комплексне вирішення еколого-гігієнічних проблем дозволило оптимізувати та цілеспрямовано управляти процесом оздоровлення населення, а також зменшити екологічну ситуацію в цілому.

Додаток А

**Програма статистичного моделювання аналітичної залежності
ефективності пиловловлювання від конструктивних розмірів і режимів
роботи пиловловлювача**

Програма MNK.cpp – програма статистичного моделювання аналітичної залежності ефективності пиловловлювання від конструктивних розмірів і режимів роботи пиловловлювача.

```
// 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 >>

```



```

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;}

```

Додаток Б

Програма розрахунку переміщення частинок у різних зонах

Зона 2–3

```
C    MajnZ2_3
      common /udar/ UC,FT
      common /geom/ Rp,Rm,Ac,Vf,USK
c
      dimension WU(4),WK(300),IWK(4)
c
      EXTERNAL FCN,FCNJ
c
      READ (7,13) UC,FT
      READ(7,13) USK,Rp,Rm,Ac,Vf
      13 format(e10.3)
c
      read (7,8566) NTTT
      8566 format(i4)
c
      20 format(e13.6)
      22 format(e13.6)
c    read(7,812) NMOD
      read(7,500) T0,TTK
c
      open(42,file='Tr.dat')
      open(32,file='P.dat')
      open(22,file='m.dat')
c
      pi = 3.1415
c
      do 53 ip = 1,201
```

```

Xp = Rp*cos((ip-1)*2.*pi/200.)
Yp = Rp*sin((ip-1)*2.*pi/200.)
c
Xm = Rm*cos((ip-1)*2.*pi/200.)
Ym = Rm*sin((ip-1)*2.*pi/200.)
write (32,443) Xp,Yp
53 write (22,443) Xm,Ym
c
NS=4
c
c Wu(1) = 0.
c Wu(2) = Rm
c Wu(3) = Vf/Rm
c Wu(4) = 0.
c
read (7,13) (WU(i),i=1,4)
c
H=1.E-9
TK = 0.0
c TEND = .40
TOL = 1.E-4
INDEX=1
METH = 2
MITER = 2
c
do 6 itt=1,NTTT
TEND=itt*TTK
c tk=0.5.

CALL

```

```

(NS,FCN,FCNJ,TK,H,WU,TEND,TOL,METH,MITER,INDEX,
  1          IWK,WK,IER)
c
  IF (IER .GT. 0) GO TO 80
c
  Xx = WU(2)*cos(WU(4))
  Yy = Wu(2)*sin(WU(4))
c
  write(42,443) Xx,Yy
  print 7443, TK,WU(2)
c
  6 continue
c
  443 format((2x,2(2x,e13.6)))
  243 format((2x,e10.3,2(1x,e13.6),1x,2(1x,e13.6)))
  7443 format((2x,5(2x,e13.6)))
  500 format(E14.7)
  812 format(I4)
  80 WRITE(6,90)IER
  90 FORMAT(///2x,' ERROR HALT.. IER =',I5)
  stop
  end
  subroutine FCN(NS,T,YSS,G)
c
  common /udar/ UC,FT
  common /geom/ Rp,Rm,Ac,Vf,USK
c
  dimension YSS(NS),G(NS)
c
  G(2) = YSS(1)

```

$$G(4) = YSS(3)$$

c

if (YSS(2).ge.Rp) go to 22

if (YSS(2).LE.Rm) go to 33

c

$$G(1) = + Yss(2)*Yss(3)**2. - Ac*Yss(1)$$

$$G(3) = - 2.*Yss(1)*Yss(3)/Yss(2)$$

$$* - Ac*(Yss(3)*Yss(2)-Vf/(Yss(2)))/Yss(2)$$

go to 4444

22 if(Yss(1).ge.0.) go to 221

$$G(1) = + Yss(2)*Yss(3)**2. - Ac*Yss(1) - UC*USK$$

$$G(3) = - 2.*Yss(1)*Yss(3)/Yss(2) - FT*UC*USK/RP$$

$$* - Ac*(Yss(3)*Yss(2)-Vf/Yss(2))/Yss(2)$$

go to 4444

c

$$221 G(1) = + Yss(2)*Yss(3)**2. - Ac*Yss(1) - USK$$

$$G(3) = - 2.*Yss(1)*Yss(3)/Yss(2) - FT*USK/RP$$

$$* - Ac*(Yss(3)*Yss(2)-Vf/Yss(2))/Yss(2)$$

go to 4444

33 continue

$$G(1) = + Yss(2)*Yss(3)**2. - Ac*Yss(1)$$

$$G(3) = - 2.*Yss(1)*Yss(3)/Yss(2)$$

$$* - Ac*(Yss(3)*Yss(2)-Vf*YSS(2))/Yss(2)$$

4444 continue

c

$$PRYSK = G(1)$$

c print 100, Demp,Eprp,Eprm,EJ,EM,EK0,EKF0

100 format(2x,7(1x,e10.3))

c

return

```

end
Зона 4
c MajnZ4
    common /udar/ UC,FT
    common /geom/ Rp,Rm,Ac,Vf,USK
c
    dimension WU(4),WK(300),IWK(4)
c
    EXTERNAL FCN,FCNJ
c
    READ (7,13) UC,FT
    READ(7,13) USK,Rp,Rm,Ac,Vf
    13 format(e10.3)
c
    read (7,8566) NTTT
    8566 format(i4)
c
    20 format(e13.6)
    22 format(e13.6)
c    read(7,812) NMOD
    read(7,500) T0,TTK
c
    open(42,file='Tr.dat')
    open(32,file='P.dat')
    open(22,file='m.dat')
c
    pi = 3.1415
c
    do 53 ip = 1,201
    Xp = Rp*cos((ip-1)*2.*pi/200.)

```

```

Yp = Rp*sin((ip-1)*2.*pi/200.)
c
Xm = Rm*cos((ip-1)*2.*pi/200.)
Ym = Rm*sin((ip-1)*2.*pi/200.)
write (32,443) Xp,Yp
53 write (22,443) Xm,Ym
c
NS=4
c
c Wu(1) = 0.
c Wu(2) = Rm
c Wu(3) = Vf/Rm
c Wu(4) = 0.
c
read (7,13) (WU(i),i=1,4)
c
H=1.E-9
TK = 0.0
c TEND = .40
TOL = 1.E-4
INDEX=1
METH = 2
MITER = 2
c
do 6 itt=1,NTTT
TEND=itt*TTK
c tk=0.5.

CALL

```



```

(NS,FCN,FCNJ,TK,H,WU,TEND,TOL,METH,MITER,INDEX,
  1          IWK,WK,IER)
c
  IF (IER .GT. 0) GO TO 80
c
  Xx = WU(2)*cos(WU(4))
  Yy = Wu(2)*sin(WU(4))
c
  write(42,443) Xx,Yy
  print 7443, TK,WU(2)
c
  6 continue
c
  443 format((2x,2(2x,e13.6)))
  243 format((2x,e10.3,2(1x,e13.6),1x,2(1x,e13.6)))
  7443 format((2x,5(2x,e13.6)))
  500 format(E14.7)
  812 format(I4)
  80 WRITE(6,90)IER
  90 FORMAT(///2x,' ERROR HALT.. IER =',I5)
  stop
  end

subroutine FCN(NS,T,YSS,G)
c
  common /udar/ UC,FT
  common /geom/ Rp,Rm,Ac,Vf,USK
c
  dimension YSS(NS),G(NS)

```

c

$$G(2) = YSS(1)$$

$$G(4) = YSS(3)$$

c

if (YSS(2).ge.Rp) go to 22

if (YSS(2).LE.Rm) go to 33

c

$$G(1) = + Yss(2)*Yss(3)**2. - Ac*Yss(1)$$

$$G(3) = - 2.*Yss(1)*Yss(3)/Yss(2)$$

$$* - Ac*(Yss(3)*Yss(2)-Vf/(Yss(2)))/Yss(2)$$

go to 4444

22 if(Yss(1).ge.0.) go to 221

$$G(1) = + Yss(2)*Yss(3)**2. - Ac*Yss(1) - UC*USK$$

$$G(3) = - 2.*Yss(1)*Yss(3)/Yss(2) - FT*UC*USK/RP$$

$$* - Ac*(Yss(3)*Yss(2)-Vf/Yss(2))/Yss(2)$$

go to 4444

c

$$221 G(1) = + Yss(2)*Yss(3)**2. - Ac*Yss(1) - USK$$

$$G(3) = - 2.*Yss(1)*Yss(3)/Yss(2) - FT*USK/RP$$

$$* - Ac*(Yss(3)*Yss(2)-Vf/Yss(2))/Yss(2)$$

go to 4444

33 if(Yss(1).le.0.) go to 331

$$G(1) = + Yss(2)*Yss(3)**2. - Ac*Yss(1) + UC*USK$$

$$G(3) = - 2.*Yss(1)*Yss(3)/Yss(2)$$

$$* - Ac*(Yss(3)*Yss(2)-Vf*YSS(2))/Yss(2) - FT*UC*USK/RM$$

go to 4444

$$331 G(1) = + Yss(2)*Yss(3)**2. - Ac*Yss(1) + USK$$

$$G(3) = - 2.*Yss(1)*Yss(3)/Yss(2) - FT*USK/RM$$

$$* - Ac*(Yss(3)*Yss(2)-Vf*YSS(2)/Rm)/Yss(2)$$

4444 continue

```

c
  PRYSK = G(1)
c  print 100, Demp,Eprp,Eprm,EJ,EM,EK0,EKF0
  100 format(2x,7(1x,e10.3))
c
  return
  end

```

Зона 7

```

c  MajnZ7
  common /geom/ Rp,Rm,Ac,Vf,USK
  common /gal/ Anah, Ng,alfa
c
  dimension WU(4),WK(300),IWK(4)
c
  EXTERNAL FCN,FCNJ
c
  READ(7,13) ALFA,USK,Rp,Rm,Ac,Vf
  *, Anah
  13 format(e10.3)
c
  read (7,8566) Ng
  read (7,8566) NTTT
  8566 format(i4)
c
  20 format(e13.6)
  22 format(e13.6)
c  read(7,812) NMOD
  read(7,500) T0,TTK
c

```

```

open(42,file='Tr.dat')
open(32,file='P.dat')
open(22,file='m.dat')
  open (45,file='g.dat')
c
  pi = 3.1415
c
do 53 ip = 1,201
  Xp = Rp*cos((ip-1)*2.*pi/200.)
  Yp = Rp*sin((ip-1)*2.*pi/200.)
c
  Xm = Rm*cos((ip-1)*2.*pi/200.)
  Ym = Rm*sin((ip-1)*2.*pi/200.)
  write (32,443) Xp,Yp
53 write (22,443) Xm,Ym
c
c  gal
c
  pi = 3.1416
  df = 2.*Pi/500.
c
do 153 ic = 1,501
  fiz = df*(ic-1)
do 828 ig = 1,Ng
c
  Fn = 2.*pi/Ng
  Fm = Fn*(ig-1)
  Fp = Fn*ig
c
  if(fiz.gt.Fm.and.fiz.le.Fp) go to 820

```

828 continue

goto 153

820 ggg = Anah * (-fiz + ig*Fn) + Rp

xgg = ggg * cos(fiz)

ygg = ggg * sin(fiz)

write(45,443) xgg,ygg

153 continue

c

NS=4

c

read (7,13) (WU(i),i=1,4)

c

c Wu(1) = 0.

c Wu(2) = Rm

c Wu(3) = Vf/Rm

c Wu(4) = 0.

c

H=1.E-9

TK = 0.0

c TEND = .40

TOL = 1.E-4

INDEX=1

METH = 2

MITER = 2

c

do 6 itt=1,NTTT

TEND=itt*TTK

c tk=0.5.

CALL

DGEAR

(NS,FCN,FCNJ,TK,H,WU,TEND,TOL,METH,MITER,INDEX,

```

1          IWK,WK,IER)
c
  IF (IER .GT. 0) GO TO 80
c
  Xx = WU(2)*cos(WU(4))
  Yy = Wu(2)*sin(WU(4))
c
  write(42,443) Xx,Yy
  print 7443, TK,WU(2)
c
  6 continue
c
  443 format((2x,2(2x,e13.6)))
  243 format((2x,e10.3,2(1x,e13.6),1x,2(1x,e13.6)))
  7443 format((2x,5(2x,e13.6)))
  500 format(E14.7)
  812 format(I4)
  80 WRITE(6,90)IER
  90 FORMAT(///2x,' ERROR HALT.. IER =',I5)
  stop
  end

subroutine FCN(NS,T,YSS,G)
c
  common /geom/ Rp,Rm,Ac,Vf,USK
  common /gal/ A, Ng,Alfa
c
  dimension YSS(NS),G(NS)
c

```

```

G(2) = YSS(1)
G(4) = YSS(3)
  rad = YSS(2)
  fiz = YSS(4)
  ggg = 2.*Rp
  pi = 3.1416

  do 828 ig = 1,Ng
c
  Fn = 2.*pi/Ng
  Fm = Fn*(ig-1)
  Fp = Fn*ig
c
  if(fiz.gt.Fm.and.fiz.le.Fp) go to 820
828 continue
  goto 153
820ggg = A * (-fiz + ig*Fn) + Rp
153continue
c
c  do 820 ig = 1,Ng
c  Fn = 2.*pi/Ng
c  Fm = Fn*(ig-1)
c  Fp = Fn*ig
c  if(fiz.lt.Fm.and.fiz.ge.Fp) go to 820
c  ggg = A * (-fiz + ig*Fn) + Rp
c 820 continue
c
  gp = ggg*(1.+0.2)
  if(rad.ge(gp) go to 222
  if(rad.ge.ggg) go to 22

```

if (rad.gt.RP.and.rad.lt.ggg) go to 55

if (rad.LE.RP) go to 44

if (rad.LE.Rm) go to 33

c

$$G(1) = + Y_{ss}(2) * Y_{ss}(3) ** 2. - Ac * Y_{ss}(1)$$

$$G(3) = - 2. * Y_{ss}(1) * Y_{ss}(3) / Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac * (Y_{ss}(3) * Y_{ss}(2) - Vf / (Y_{ss}(2) / Rm)) / Y_{ss}(2)$$

go to 4444

$$22 G(1) = + Y_{ss}(2) * Y_{ss}(3) ** 2. - Ac * Y_{ss}(1) - USK$$

$$G(3) = - 2. * Y_{ss}(1) * Y_{ss}(3) / Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac * (Y_{ss}(3) * Y_{ss}(2) + 0.2 * Vf / (Y_{ss}(2) / Rm)) / Y_{ss}(2)$$

go to 4444

$$222 G(1) = + Y_{ss}(2) * Y_{ss}(3) ** 2. - Ac * Y_{ss}(1)$$

$$G(3) = - 2. * Y_{ss}(1) * Y_{ss}(3) / Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac * (Y_{ss}(3) * Y_{ss}(2) + 0.2 * Vf / (Y_{ss}(2) / Rm)) / Y_{ss}(2)$$

go to 4444

$$44 G(1) = + Y_{ss}(2) * Y_{ss}(3) ** 2. - Ac * Y_{ss}(1)$$

$$G(3) = - 2. * Y_{ss}(1) * Y_{ss}(3) / Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac * (Y_{ss}(3) * Y_{ss}(2) - Vf / (Y_{ss}(2) / Rm)) / Y_{ss}(2)$$

go to 4444

$$55 G(1) = + Y_{ss}(2) * Y_{ss}(3) ** 2. - Ac * Y_{ss}(1)$$

$$G(3) = - 2. * Y_{ss}(1) * Y_{ss}(3) / Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac * (Y_{ss}(3) * Y_{ss}(2) + 0.2 * Vf / (Y_{ss}(2) / Rm)) / Y_{ss}(2)$$

go to 4444

$$33 G(1) = + Y_{ss}(2) * Y_{ss}(3) ** 2. - Ac * Y_{ss}(1)$$

$$G(3) = - 2. * Y_{ss}(1) * Y_{ss}(3) / Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac * (Y_{ss}(3) * Y_{ss}(2) - Vf * Y_{SS}(2) / Rm) / Y_{ss}(2)$$

4444 continue

c


```

    PRYSK = G(1)
c   print 100, Demp,Eprp,Eprm,EJ,EM,EK0,EKF0
    100 format(2x,7(1x,e10.3))
c
    return
    end

Зона 8
C   MajnZ8
    common /geom/ Rp,Rm,Ac,Vf,USK
    common /gal/ Anah, Ng,alfa
c
    dimension WU(4),WK(300),IWK(4)
c
    EXTERNAL FCN,FCNJ
c
    READ(7,13) ALFA,USK,Rp,Rm,Ac,Vf
    *, Anah
    13 format(e10.3)
c
    read (7,8566) Ng
    read (7,8566) NTTT
    8566 format(i4)
c
    20 format(e13.6)
    22 format(e13.6)
c   read(7,812) NMOD
    read(7,500) T0,TTK
c
    open(42,file='Tr.dat')

```

```
open(32,file='P.dat')
open(22,file='m.dat')
  open (45,file='g.dat')
c
  pi = 3.1415
c
do 53 ip = 1,201
  Xp = Rp*cos((ip-1)*2.*pi/200.)
  Yp = Rp*sin((ip-1)*2.*pi/200.)
c
  Xm = Rm*cos((ip-1)*2.*pi/200.)
  Ym = Rm*sin((ip-1)*2.*pi/200.)
  write (32,443) Xp,Yp
53 write (22,443) Xm,Ym
c
c  gal
c
  pi = 3.1416
  df = 2.*Pi/500.
c
do 153 ic = 1,501
  fiz = df*(ic -1)
do 828 ig = 1,Ng
c
  Fn = 2.*pi/Ng
  Fm = Fn*(ig-1)
  Fp = Fn*ig
c
  if(fiz.gt.Fm.and.fiz.le.Fp) go to 820
828 continue
```

```

      goto 153
820ggg = Anah * (-fiz + ig*Fn) + Rp
      xgg = ggg * cos(fiz)
      ygg = ggg * sin(fiz)
      write(45,443) xgg,ygg
153continue
c
      NS=4
c
      read (7,13) (WU(i),i=1,4)
c
c   Wu(1) = 0.
c   Wu(2) = Rm
c   Wu(3) = Vf/Rm
c   Wu(4) = 0.
c
      H=1.E-9
      TK = 0.0
c   TEND = .40
      TOL = 1.E-4
      INDEX=1
      METH = 2
      MITER = 2
c
      do 6 itt=1,NTTT
      TEND=itt*TTK
c   tk=0.5.

```

CALL

DGEAR

(NS,FCN,FCNJ,TK,H,WU,TEND,TOL,METH,MITER,INDEX,

```

1          IWK,WK,IER)
c
  IF (IER .GT. 0) GO TO 80
c
  Xx = WU(2)*cos(WU(4))
  Yy = Wu(2)*sin(WU(4))
c
  write(42,443) Xx,Yy
  print 7443, TK,WU(2)
c
  6 continue
c
  443 format((2x,2(2x,e13.6)))
  243 format((2x,e10.3,2(1x,e13.6),1x,2(1x,e13.6)))
  7443 format((2x,5(2x,e13.6)))
  500 format(E14.7)
  812 format(I4)
  80 WRITE(6,90)IER
  90 FORMAT(///2x,' ERROR HALT.. IER =',I5)
  stop
  end

subroutine FCN(NS,T,YSS,G)
c
  common /geom/ Rp,Rm,Ac,Vf,USK
  common /gal/ A, Ng,Alfa
c
  dimension YSS(NS),G(NS)
c

```

```

G(2) = YSS(1)
G(4) = YSS(3)
  rad = YSS(2)
  fiz = YSS(4)
  ggg = 2.*Rp
  pi = 3.1416

  do 828 ig = 1,Ng
c
  Fn = 2.*pi/Ng
  Fm = Fn*(ig-1)
  Fp = Fn*ig
c
  if(fiz.gt.Fm.and.fiz.le.Fp) go to 820
828 continue
  goto 153
820ggg = A * (-fiz + ig*Fn) + Rp
153continue
c
c  do 820 ig = 1,Ng
c  Fn = 2.*pi/Ng
c  Fm = Fn*(ig-1)
c  Fp = Fn*ig
c  if(fiz.lt.Fm.and.fiz.ge.Fp) go to 820
c  ggg = A * (-fiz + ig*Fn) + Rp
c 820 continue
c
  gp = ggg*(1.+0.2)
  if(rad.ge.gp) go to 222
  if(rad.ge.ggg) go to 22

```

if (rad.gt.RP.and.rad.lt.ggg) go to 55

if (rad.LE.RP) go to 44

if (rad.LE.Rm) go to 33

c

$$G(1) = + Y_{ss}(2)*Y_{ss}(3)**2. - Ac*Y_{ss}(1)$$

$$G(3) = - 2.*Y_{ss}(1)*Y_{ss}(3)/Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac*(Y_{ss}(3)*Y_{ss}(2)-Vf/(Y_{ss}(2)/Rm))/Y_{ss}(2)$$

go to 4444

$$22 G(1) = + Y_{ss}(2)*Y_{ss}(3)**2. - Ac*Y_{ss}(1) - USK$$

$$G(3) = - 2.*Y_{ss}(1)*Y_{ss}(3)/Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac*(Y_{ss}(3)*Y_{ss}(2)+0.2*Vf/(Y_{ss}(2)/Rm))/Y_{ss}(2)$$

go to 4444

$$222 G(1) = + Y_{ss}(2)*Y_{ss}(3)**2. - Ac*Y_{ss}(1)$$

$$G(3) = - 2.*Y_{ss}(1)*Y_{ss}(3)/Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac*(Y_{ss}(3)*Y_{ss}(2)+0.2*Vf/(Y_{ss}(2)/Rm))/Y_{ss}(2)$$

go to 4444

$$44 G(1) = + Y_{ss}(2)*Y_{ss}(3)**2. - Ac*Y_{ss}(1)$$

$$G(3) = - 2.*Y_{ss}(1)*Y_{ss}(3)/Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac*(Y_{ss}(3)*Y_{ss}(2)-Vf/(Y_{ss}(2)/Rm))/Y_{ss}(2)$$

go to 4444

$$55 G(1) = + Y_{ss}(2)*Y_{ss}(3)**2. - Ac*Y_{ss}(1)$$

$$G(3) = - 2.*Y_{ss}(1)*Y_{ss}(3)/Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac*(Y_{ss}(3)*Y_{ss}(2)+0.2*Vf/(Y_{ss}(2)/Rm))/Y_{ss}(2)$$

go to 4444

$$33 G(1) = + Y_{ss}(2)*Y_{ss}(3)**2. - Ac*Y_{ss}(1)$$

$$G(3) = - 2.*Y_{ss}(1)*Y_{ss}(3)/Y_{ss}(2)$$

$$* - Ac*(Y_{ss}(3)*Y_{ss}(2)-Vf*Y_{SS}(2)/Rm)/Y_{ss}(2)$$

4444 continue

c

```

PRYSK = G(1)
c  print 100, Demp,Eprp,Eprm,EJ,EM,EK0,EKF0
100 format(2x,7(1x,e10.3))
c
return
end

```

Програма розподілу по зонах

```

c  Majn Zony
common /mf/ Cz,U0,EK,W,Em,H
common /msi/ NPSI
c  external fdyf
c
D = 1.
Q0 = 1.
c
c  read (11,21) Q0,fi
c  print 12, Q0,fi
c  12 format ( 2x, ' h®§e®œ = ' , e10.3, ' fi = ' ,e10.3/ )
c
read (11,21) es,EL1,EL2,EL3,EL4,EL
*, E1,E2,E3,E4
*, Cz,U0,EK,W,Em,H

print 22, EL1,EL2,EL3,EL4,EL
21 format ( e10.3 )
22 format (( 2x, ' a®§İ®œi« §® ' ,5(1x,e10.3)/))
c
I1=int(100.*EL1/EL)
I2=int(100.*EL2/EL)

```

```

I3=int(100.*EL3/EL)
I4=int(100.*EL4/EL)
c
  print 722, E1,E2,E3,E4
721 format ( e10.3 )
722 format (( 2x, ' a@$. ǫĚдд. ',4(1x,e10.3)/))
c
  open (111,file='rez.dat')
c  open (11,file='int.dat')
  10 format(e10.3)
c
  NPSI = 14
c
c  †HЌБ 1
c
  dl=EL/100.
c

  do 4 i=1,I1
  X=(i-1)*dl+0.001
c
  AI = simp(0.00001,X,fdyf,eps)
  AIR=E1*Q0*AI * es
c
  print 12, X,AIR
  4 WRITE(111,12) X,AIR
  12 format (1x,e10.3,1x,e10.3)
  712 format(1x,e10.3,1x,e10.3)
c
  eem=2.25*D/(2.*0.11)

```



```

een=Cz*0.14/(3.14*0.11)
fi = een / eem
c
c  *HKB 2
c  yE$ зГп '2
c
Q1 = Q0 – Q0*E1*EL1
print 1000, Q1
1000 format(//10x, ' *B€  TЛБ ,,HЫI ЛБ€ =', f10.5//)
Q1p= Q1 – Q1*E1*(EL2–EL1)
C2 = Q1p/((EL2–EL1)/fi+(EL2–EL1)**2./2.)
c  print 1001, fi,C2
c 1001 format (10x,' fi,C2 = ',2(2x,e10.3))
c
do 41 i=I1,I2
X=(i–I1)*dl+0.001+EL1
c
AI0 = C2*(X–EL1)
X1 = X–EL1
AI = simp(0.00001,X1,fdyf,eps)
c  print 12, X1,AI
AI1 = Q1*E2*AI
c  print 12, X1,X,EK,W,Em
AI = simp(X1,X,fdyf,eps)
AI2 = Q0*E1*AI
AIR = (AI0 + AI1 + AI2) * es
c
c  print 12, AI0,AI1
print 12, X,AIR
41 WRITE(111,12) X,AIR

```

```

c
c  *ThKb 3
c
Q2=Q1-Q1*E2*(EL2-EL1)-C2*(EL2-EL1)**2./2.
pr1=C2*(EL2-EL1)
pr2=Q2*een/eem
print 1000, Q2
c  print 12,pr1,pr2
c
c  fi = n/m
c
do 42 i=I2,I3
X=(i-I2)*dl+0.001+EL2
c
x1 = X - EL2
Q=Q2*(eem**een/(eem+x1)**een)
AI0 = Q*een/(eem+x1)
c
X1 = X-EL2
X2 = X-EL1
AI = simp(0.00001,X1,fdyf,eps)
AI1 = Q2*E3*AI
AI = simp(X1,X2,fdyf,eps)
AI2 = Q1*E2*AI
AI = simp(X2,X,fdyf,eps)
AI3 = Q0*E1*AI
AIR = (AI0 + AI1 + AI2 + AI3) * es
c
c  print 12 ,ai0,ai1
print 12, X,AIR

```

```

42 WRITE(111,12) X,AIR
c
c   * 4
c
      EK3 = AI0
c   *
      Q3 = Q - Q2*E3*(EL3-EL2)
      print 1000, Q3
      C4 = Q3/(EL4-EL3)-0.5*EK3
c
      do 43 i=I3,I4
      X=(i-I3)*dl+0.001+EL3
c
      AI0 = EK3*(EL4-X)/(EL4-EL3)
c
      X1 = X-EL3
      X2 = X-EL2
      X3 = X-EL1
      AI = simp(0.00001,X1,fdyf,eps)
      AI1 = C4*AI
      AI = simp(X1,X2,fdyf,eps)
      AI2 = Q2*E3*AI
      AI = simp(X2,X3,fdyf,eps)
      AI3 = Q1*E2*AI
      AI = simp(X3,X,fdyf,eps)
      AI4 = Q0*E1*AI
      AIR = (AI0 + AI1 + AI2 + AI3 + AI4) * es
c
      print 12, X,AIR
43 WRITE(111,12) X,AIR

```

```

c
c   *HKB 5
c
  do 44 i=I4,100
    X=(i-I4)*dl+0.001+EL4
    X1 = X-EL4
    X2 = X-EL3
    X3 = X-EL2
    X4 = X-EL1
c   AI = simp(0.00001,X1,fdyf,eps)
    AI1 = 0
    AI = simp(X1,X2,fdyf,eps)
    AI2 = C4*AI
    AI = simp(X2,X3,fdyf,eps)
    AI3 = Q2*E3*AI
    AI = simp(X3,X4,fdyf,eps)
    AI4 = Q1*E2*AI
    AI = simp(X4,X,fdyf,eps)
    AI5 = Q0*E1*AI
    AIR = (AI2 + AI3 + AI4 + AI5) * es
c
  print 12, X,AIR
44 WRITE(111,12) X,AIR
c
  STOP
  END

```

Додаток В

Програма для чисельного розв'язку диференційного рівняння руху матеріальної точки

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

$$q := 1000.3000$$

$$St(a, b) := a \cdot b \quad a := 0.09 \quad b := 0.165$$

$$\rho_0 := 1.023 \quad \rho_{quartz} := 2500$$

Таблиця В.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 зі змоченими жалюзі (рис. 4.2, 4.3)			
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

Продовж. табл. В.1

1	2	3	4
50	2500	7,7	41
	3000	7,3	39
пиловловлювач (апарат II, рис. 4.4)			
8	1000	11,5	65
	1500	10,3	62
	2000	9,7	58
	2500	9,5	56
	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
мокрый пиловловлювач зі спеціальною формою жалюзі (апарат III, рис. 4.5)			
8	1000	8,3	47
	1500	8,1	42
	2000	7,9	39
	2500	7,6	37
	3000	7,4	36
32	1000	8,4	43
	1500	8,1	39

Продовж. табл. В.1

1	2	3	4
32	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

Таблиця В.2

Визначення оптимальної величини радіусу жалюзі відокремлювача І типу

Розхід повітря, м ³ /год	Розмір пилу, 10 ⁻⁶ м	Ефективність уловлення пилу, % при радіусі жалюзі R, 10 ⁻³ м						
		20	22	24	26	28	30	32
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1000	8	91,7	93,6	94,8	93,1	92,6	91,8	90,2
	16	92,7	94,2	95,2	93,6	92,8	92,0	91,0
	32	94,1	95,1	96,0	95,4	93,7	92,8	91,5
	50	95,0	95,8	96,8	95,0	94,2	93,3	92,2
2000	8	93,2	94,8	95,8	94,1	93,2	92,4	91,1

Продовж. табл. В.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	16	93,7	95,2	96,2	95,1	93,5	92,9	92,4
	32	95,6	96,3	97,3	96,6	95,2	94,3	93,2
	50	96,2	97,0	98,0	96,2	95,4	94,6	93,8
3000	8	94,0	95,1	96,1	95,5	94,8	92,9	91,9
	16	94,7	96,3	97,3	96,7	94,5	93,2	93,8
	32	96,0	97,4	98,4	97,6	96,1	95,4	94,4
	50	98,3	99,1	99,1	99,0	96,2	95,5	94,1

Таблиця В.3

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 В.4

Дослідження пиловловлювача ЦН–11

Медіанний діаметр частинки, 10^{-6} м	Витрати повітря, $\text{м}^3/\text{год}$	Ефективність η , %	Розрахункова ефективність η_p , %
1	2	3	4
8	3000	95,7	95,9
	2500	95,3	94,8
	2000	95,1	95,0
	1500	94,9	93,9
	1000	94,3	93,1
16	3000	96,0	95,4
	2500	95,7	94,5
	2000	95,3	94,1
	1500	95,2	94,8
	1000	94,7	93,8
32	3000	96,4	95,6
	2500	96,3	95,3
	2000	96,2	94,8
	1500	95,5	94,8
	1000	95,1	94,6
50	3000	98,1	97,5
	2500	97,3	96,8
	2000	96,9	96,1
	1500	96,6	95,8
	1000	96,1	95,1

Таблиця В.5

Дослідження пиловловлювача зі спеціальною формою жалюзі (тип І)

Медіанний діаметр частинки, 10^{-6} м	Витрати повітря, $\text{м}^3/\text{год}$	Ефективність η , %	Розрахункова ефективність η_p , %
1	2	3	4
8	3000	95,9	85,1
	2500	95,8	81,3
	2000	95,6	80,7
	1500	95,2	78,8
	1000	94,7	77,9

Продовж. табл.В.5

1	2	3	4
16	3000	96,9	85,1
	2500	96,3	81,3
	2000	95,9	80,7
	1500	95,6	78,8
	1000	95,2	77,9
32	3000	97,7	97,4
	2500	97,1	80,1
	2000	96,9	96,7
	1500	96,1	94,5
	1000	96,0	94,4
50	3000	98,5	97,4
	2500	98,2	96,8
	2000	97,6	96,3
	1500	97,0	95,7
	1000	96,7	95,5

Таблиця В.6

Дослідження мокрого пиловловлювача (тип II)

Медіанний діаметр частинки, 10^{-6} м	Витрати повітря, $\text{м}^3/\text{год}$	Ефективність η , %	Розрахункова ефективність η_p , %
1	2	3	4
8	3000	96,3	87,1
	2500	96,5	84,5
	2000	95,9	81,7
	1500	95,6	82,8
	1000	95,1	80,5
16	3000	97,4	87,1
	2500	96,8	84,5
	2000	96,5	81,7
	1500	96,2	82,8
	1000	95,6	80,5
32	3000	97,9	97,4
	2500	97,4	95,8
	2000	97,3	95,7
	1500	96,6	93,5
	1000	96,4	93,4
50	3000	98,8	96,4
	2500	98,4	95,8

1	2	3	4
50	2000	97,7	94,3
	1500	97,3	94,7
	1000	96,9	93,5

Таблиця В.7

**Дослідження мокрого пиловловлювача зі спеціальною формою жалюзі
(тип III)**

Медіанний діаметр частинки, 10^{-6} м	Витрати повітря, м ³ /год	Ефективність η , %	Розрахункова ефективність η_p , %
1	2	3	4
8	3000	96,6	87,1
	2500	96,8	84,5
	2000	96,4	83,7
	1500	95,9	82,8
	1000	95,7	80,9
16	3000	97,8	87,1
	2500	94,7	84,5
	2000	97,1	81,7
	1500	96,7	82,8
	1000	96,0	80,5
32	3000	98,1	99,4
	2500	97,6	98,8
	2000	97,4	98,7
	1500	97,1	97,5
	1000	96,8	97,4
50	3000	99,1	99,4
	2500	98,4	98,8
	2000	98,1	98,7
	1500	97,5	97,9
	1000	97,2	97,5

Значення гідравлічного опору при експериментальних дослідженнях

Розхід повітря, м ³ /год	Гідравлічний опір у порівнюваних апаратах, Па			
	ЦН - 11	I	II	III
1000	120	100	90	93
1500	140	117	105	109
2000	151	131	119	123
2500	158	139	129	133
3000	160	141	136	139

Додаток Д

Експериментальні дослідження пиловловлювачів

Таблиця Д.1

Порівняльні дослідження запропонованого апарата І типу та прототипу

Витрати повітря, м ³ /год.	Ефективність пиловловлювача, %		Гідравлічний опір, Па	
	Запропонованого апарата	Циклона ЦН-11	Запропонованого апарата	Циклона ЦН-11
1000	96,8	96,0	100	120
1500	97,3	96,8	120	140
2000	98,0	97,2	134	151
2500	98,7	97,9	140	158
3000	99,1	98,8	141	160

Таблиця Д.2

Порівняльні дослідження запропонованого апарата ІІ типу та прототипу

Витрати повітря, м ³ /год.	Ефективність пиловловлювача, %		Гідравлічний опір, Па	
	Запропонованого апарата	Циклона ЦН-11	Запропонованого апарата	Циклона ЦН-11
1000	96,9	96,0	90	120
1500	97,4	96,8	105	140
2000	98,3	97,2	119	151
2500	98,7	97,9	129	158
3000	99,1	98,8	135	160

Порівняльні дослідження запропонованого апарата III типу та прототипу

Витрати повітря, м ³ /год.	Ефективність пиловловлювача, %		Гідравлічний опір, Па	
	Запропонованого апарата	Циклона ЦН-11	Запропонованого апарата	Циклона ЦН-11
1000	96,8	96,0	95	120
1500	97,3	96,8	111	140
2000	98,0	97,2	126	151
2500	98,7	97,9	135	158
3000	99,1	98,8	140	160

Експериментальний пил – кварцевий пісок з медіанним діаметром $32 \cdot 10^{-6}$ м.

Додаток Е

**Акти впровадження в виробництво та навчальний процес результатів
дисертаційної роботи**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор

по научной работе



Заблодский Н.Н.

200 ___ г.

УТВЕРЖДАЮ:

директора

по реконструкции ОАО "АМК"



Мосолов В.И.

200 9 г.

ПРОТОКОЛ

о намерениях внедрения установки для очистки воздуха от пыли на участке
дробления коксовой мелочи и коксовых углей

г. Алчевск

Донбасский государственный технический университет, в дальнейшем ДонГТУ, в лице проректора по научной работе Заблодского Н.Н. и ОАО "Алчевский металлургический комбинат", в дальнейшем ОАО "АМК" в лице заместителя генерального директора по реконструкции Мосолова В.И. рассмотрели предложения ДонГТУ, касающиеся улучшения санитарно – гигиенических условий труда. Эти предложения способствуют уменьшению количества выбросов вредных веществ в атмосферу.

В данном предложении рассмотрены принципиально новые конструкции аппаратов для очистки воздуха от коксовой пыли, созданные в результате исследования математической модели процесса движения твердых частиц в осесимметричных потоках полей скоростей и распределения движений потоков внутри аппарата, которые задекларированы патентами Украины:

1. Патент на корисну модель № 29965 Мокрий пиловловлювач із спеціальною формою жалюзі / Батлук В. А., Проскуріна І.В., Мельников О.В., від 08.05. 2007. В01D45/00, опубл. 11.02.2008 бюл. № 3.

2. Патент на корисну модель № 22086. Мокрий пиловловлювач / Батлук В. А., Проскуріна І.В., від 30.11. 2006. В01D45/00, опубл. 10.04.2007 бюл. № 4.

3. Патент на корисну модель № 21264 Пиловловлювач зі змоченими жалюзі / Батлук В. А., Проскуріна І.В., від 21.07. 2006. В01D45/00, опубл. 15.03.2007 бюл. № 3.

Все предложенные аппараты были испытаны на стандартном экспериментальном стенде, в полном соответствии с «Единой методикой сравнительных испытаний пылеуловителей», в которой обусловлена методика про-

ведения эксперимента, методы подготовки пыли и методология обработки экспериментальных данных.

В результате экспериментов установлено, что перепад статического давления в сепарационной зоне пылеуловителя с жалюзийным отделителем в 4 – 12 раз меньше по сравнению с аналогичным циклоном с традиционной выхлопной трубой. Уменьшена металлоемкость конструкции. Установка жалюзийного отделителя способствовала повышению эффективности работы пылеуловителя в среднем на 5 – 7 % при снижении скорости движения потока воздуха во входном патрубке от 18 – 20 м/с до 11 – 16 м/с. Гидравлическое сопротивление аппарата при этом снижается по сравнению с прототипом в 1,7 – 2,4 раз. По результатам экспериментальных и математических исследований установлено, что лучшей конструкцией является «Мокрый пыловловлювач із спеціальною формою жалюзі» авт. Батлук В. А., Проскуріна І.В., Мельников О.В.. Патент на корисну модель № 29965 від 08.05. 2007. В01D45/00, опубл. 11.02.2008 бюл. № 3.

Рассмотрев предложенные материалы, стороны пришли к согласованному решению:


1. Стороны считают, что внедрение установки для очистки воздуха от пыли, включающую в себя предложенный пылеуловитель, может быть использована в промышленном производстве для улучшения санитарно – гигиенических условий труда.


2. Стороны считают целесообразным проведение совместных работ с внедрением установки для очистки воздуха от пыли, включающую в себя мокрый пылеуловитель со специальной формой жалюзи (Патент на корисну модель № 29965 В01Д45/00 від 08.05.07; Опубл. 11.02.2008. Бюл.№ 3).

Начальник агломерационного цеха

ОАО "АМК"

Начальник отдела охраны окружающей среды ОАО "АМК"


_____ Пьянков С.В.


_____ Попов Ю.А.

УТВЕРЖДАЮ:



АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Результаты диссертационной работы Проскуриной Ирины Валерьевны на тему "Система санітарно – організаційних заходів для зменшення техногенного навантаження на довкілля коксових виробництв" а именно:

– математические модели процесса движения твердых частиц в закрученных криволинейных потоках;

– программные обеспечения определения полей скоростей и давлений внутри пылеуловителя,

были использованы на ОАО "Алчевский металлургический комбинат" при совершенствовании процессов очистки воздуха от пыли на участке дробления коксовой мелочи и коксовых углей.

Использование результатов позволило ОАО "Алчевский металлургический комбинат" более качественно подготовить техническое задание для решения вопроса создания санитарно – гигиенических условий труда и уменьшения количества выбросов пыли в атмосферу при процессах дробления коксовой мелочи и коксовых углей.

Начальник агломерационного цеха
ОАО "АМК"


Пьянков С.В.

УТВЕРЖДАЮ:

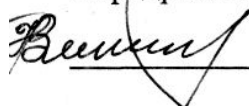


АКТ ПЕРЕДАЧИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Етим актом подтверждаем, что Донбасский государственный технический университет передал на безвозмездной основе, а ОАО "Алчевский металлургический комбинат" получил техническую документацию на мокрый пылеуловитель со специальной формой жалюзи (Патент на корисну модель № 29965 В01Д45/00 від 08.05.07; Опубл. 11.02.2008. Бюл. № 3), которые разработаны по результатам диссертационной работы Проскуриной Ирины Валерьевны на тему "Система санітарно – організаційних заходів для зменшення техногенного навантаження на довкілля коксових виробництв".

Заведующий

кафедрой ММК и ПМ

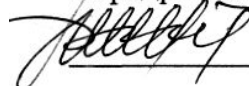
 Ульяницкий В.Н.

Начальник агломерационного цеха ОАО "АМК"

 Пьянков С.В.

Ассистент

кафедры ММК и ПМ

 Проскурина И.В.

Начальник отдела охраны окружающей среды ОАО "АМК"

 Попов Ю.А.

УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по учебной работе ДонГТУ
 д.т.н., проф. В.Н. Окаелов



Справка

о внедрении материалов диссертационной работы Проскуриной Ирины Валерьевны «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище від пилових викидів металургійної промисловості» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 21.06.01 «Экологическая безопасность» в учебный процесс Донбасского государственного технического университета

Дана в подтверждение использования основных результатов исследований, приведенных в диссертационной работе ассистента Проскуриной И.В. «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище від пилових викидів металургійної промисловості». Результаты внедрены в учебный процесс на факультете механики ДонГТУ для студентов специальности 7.090209 «Гидравлические и пневматические машины» при чтении разделов «Очистка жидкостей и газов» по дисциплине «Эксплуатация гидравлического оборудования» и в разделе «Кондиционирование рабочих сред» по курсу «Объемный гидропривод».

Зав. кафедрой «Прикладной гидромеханики»,
 д.т.н., проф., заслуженный работник
 образования Украины



Финкельштейн З.Л.

УТВЕРЖДАЮ
 Директор СП «ШХ «Молодогвардейское»
 ОАО «Краснодонуголь»
 А.А. Бортников
 2010 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на тему "СИСТЕМА САНИТАРНО – ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ЗАХОДІВ ДЛЯ ЗМЕНЬШЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ КОКСОВИХ ВИРОБНИЦТВ".

Мы, нижеподписавшиеся представители СП «Шахта «Молодогвардейская» ОАО «Краснодонуголь» составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Проскуриной Ирины Валерьевны на тему "СИСТЕМА САНИТАРНО – ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ЗАХОДІВ ДЛЯ ЗМЕНЬШЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ КОКСОВИХ ВИРОБНИЦТВ" на соискание ученой степени кандидата технических наук использованы на пунктах перегруза горной массы из 29 восточной Орловской лавы пл. К₂^В гор. 617 м, лавы № 43 пл. I₃^В гор. 617 м на транспортные штреки.

На основании результатов диссертационной работы разработаны и внедрены следующие устройства и технологические рекомендации:

- разработка мероприятий по запыленности рабочих мест;
- разработка и конструирование принципиально новых аппаратов для очистки воздуха от пыли;
- определение эффективности и гидравлического сопротивления созданной и существующих установок пылеулавливания.

Внедренное устройство и ряд технологических мероприятий в совокупности позволили увеличить эффективность улавливания пыли на 2 – 3%, при этом гидравлическое сопротивление уменьшилось в среднем на 50 – 100 Па, что позволило снизить концентрацию пыли до норм ПДК. Габаритные размеры аппарата, а также его металлоемкость уменьшились приблизительно в 1,2 раза. Суммарный экономический эффект в результате использования системы и мероприятий в течение трех лет составили 205 тыс. (двести пять тысяч) гривен.

Гл. инженер
 Зам. директора по экономике
 Начальник участка ВТБ

Ю.Ю. Крыжановский
 А.В. Чистолинов
 А.А. Колесник

Витяг

з протоколу пленарного засідання Х міжнародної науково-технічної технічної конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика»

м. Львів

14 – 15 жовтня 2009 р.

ПРИСУТНІ: 75 учасників конференції, в тому числі, докторів наук, професорів: Луговський О.Ф. (м. Київ), Батлук В.А. (м. Львів), Бочаров В.П. (м. Київ), Вальчик Й. (Польща), Гросс Й (Чеська Республіка), Міклеш М. (Словацька Республіка), Кірек М.Д. (м. Львів), Зайончковський Г.Й. (м. Київ), Панченко А.І. (м. Мілітополь), Фінкельштейн З.Л. (м. Алчевськ), Малеев В.Б. (м. Донецьк), Кононенко А.П. (м. Донецьк), Струтинський В.Б. (м. Київ), Губарев О.П. (м. Київ), Шевченко В.С. (Республіка Білорусь), Мальований М.С. (м. Львів), Гогіташвілі Г.Г. (м. Львів), Баранов А.М. (м. Харків), Біблюк М.І. (м. Львів), Іскович-Лотоцький Р.Д. (м. Вінниця)

СЛУХАЛИ: доповідь по дисертації, представленій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Проскуріної Ірини Валеріївни «Система санітарно-організаційних заходів для зменшення техногенного навантаження на довкілля коксових виробництв».

УХВАЛИЛИ: За змістом, вирішеними задачами, науковою новизною, практичною значимістю дисертація Проскуріної Ірини Валеріївни «Система санітарно-організаційних заходів для зменшення техногенного навантаження на довкілля коксових виробництв» повністю відповідає вимогам п.12 «Порядку присвоєння наукових ступенів і присвоєння вчених звань ВАК України», що висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор Проскуріна Ірина Валеріївна заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук.

Президент Асоціації спеціалістів
промислової гідравліки і
пневматики, д. т. н., професор

Г.Й. Зайончковський

Виконавчий директор, к. т. н.

В.М. Бадах



ВИТЯГ

з протоколу пленарного засідання

ХІ міжнародної науково-технічної конференції «Промислова гідравліка і пневматика» м. Мелітополь, від 16 вересня 2010 р.

ПРИСУТНІ: 82 особи, в тому числі 13 докторів наук: Панченко А.І. (м. Мелітополь), Зайончковський Г.Й. (м. Київ), Андренко П.М. (м. Харків), Батлук В.А. (м. Львів), Бойко М.Г. (м. Донецьк), Бочаров В.П. (м. Київ), Луговський О.Ф. (м. Київ), Лур'є З.Я. (м. Харків), Євтушенко А.О. (м. Суми), Сьомін Д.О. (м. Луганськ), Струтинський В.Б. (м. Київ), Шевченко В.С. (м. Мінськ, Республіка Білорусь), Фінкельштейн З.Л. (м. Алчевськ).

СЛУХАЛИ: дисертаційну роботу Проскуріної Ірини Валеріївни на тему: «Система санітарно-організаційних заходів для зменшення техногенного навантаження на довкілля коксових виробництв», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

УХВАЛИЛИ: за змістом вирішених задач, науковою новизною, практичною цінністю, закінчена дисертаційна робота Проскуріної І.В. повністю відповідає вимогам П.12 «Порядок присвоєння наукового ступеню і присвоєння вчених звань ВАК України», що висуваються до кандидатських дисертацій, може бути представлена до захисту, а її автор Проскуріна І.В. заслуговує присудження наукового ступеню кандидата технічних наук.

Президент Асоціації
спеціалістів промислової
гідравліки і пневматики,
д.т.н. проф.



Г.Й. Зайончковський

ВИТЯГ

з першого пленарного засідання XVI міжнародної науково-технічної
конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці»
від 18 травня 2011 року

ПРИСУТНІ: 36 докторів наук і 67 кандидатів наук.

СЛУХАЛИ: доповідь асистента кафедри прикладної гідромеханіки ДонДТУ Проскуріної Ірини Валеріївни на тему: «Зниження техногенного навантаження на довкілля від пилових викидів металургійної промисловості», представленої на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук.

УХВАЛИЛИ:

1. Рекомендувати дисертаційну роботу асистента кафедри прикладної гідромеханіки ДонДТУ Проскуріної Ірини Валеріївни на тему: «Зниження техногенного навантаження на довкілля від пилових викидів металургійної промисловості» до захисту у спеціалізованій вченій раді 21.06.01 – Екологічна безпека.

2. Привести назву дисертаційної роботи у відповідність з паспортом спеціальності 21.06.01 – Екологічна безпека і сформулювати її у наступній редакції «Зниження техногенного навантаження на довкілля від пилових викидів агломераційного виробництва металургійної промисловості».

Голова оргкомітету конференції,
заслужений діяч науки і техніки,

д.т.н., проф.

Проректор з наукової роботи ВНТУ

д.т.н., проф.,



Яхно О.М.

Павлов С.В.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <http://base.safework.ru/iloenc?doc&nd=857200740&nh>. Основные виды производств и их процессы: опасности и борьба с ними. Paul Demers, Hugh Davies, Timo Kauppinen, Kay Teschke Страница в печатном издании: 157 Раздел X. Отрасли промышленности.
2. Бретшнайдер Б. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль / Б. Бретшнайдер , И. Курфюст ; под ред. А.Ф. Туболкина. – Л.: Химия, 1989. – 288 с.
3. Батлук В.А. Основы экологии и охрана окружающей природной среды / Батлук В.А. – Львов: Афиша, 2001. – 333с. – (Учебное пособие).
4. Защита атмосферы от промышленных загрязнений / под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда. – М.: Металлургия, 1988. – 760 с.
5. Охрана окружающей среды / [Белов С.В., Барбинов Ф.А., Козьяков и др.] ; под ред. С.В. Белова. – [2 - е изд. перераб. и доп.] – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.
6. Смачивание пыли и контроль запыленности воздуха в шахтах / [Кудряшов В.В., Воронин Л.Д., Шуринов М.К. и др.]; под ред. Кудряшова В.В. – М.: Наука, 1979. – 199 с.
7. Вредные вещества в промышленности: изд. в 6 т. [спр. для химиков, инженеров и врачей] /под ред.Лазарева Н.В. Т.3, - Л.: Химия, 1976. – 632с.
8. Батлук В.А. Наукові основи створення високоефективного пиловловлюючого обладнання: дис. ... доктора техн. наук: 05.05.02./ Батлук Вікторія Арсен'євна – Л., 2001. – 370 с.
9. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха/ Пирумов А.И. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
10. Пирумов А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации/ Пирумов А.И. под ред. Н.Я. Фабриканта. – М.: Госстройиздат, 1961. – 121 с.
11. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха в системах вентиляции и кондиционирования: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08. – М., 1975. – 35 с.

12. Колпаков А.В. Физика аэродисперсных систем / Колпаков А.В. – Одесса: Вища шк., 1980. – вып. 20 – С.18 - 27.
13. Очистка промышленных газов от пыли / [Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К.] – М.: Химия, 1981. – 390 с.
14. Страус В.П. Промышленная очистка газов / Страус В.П. – М.: Мир: Химия, 1981. – 616 с.
15. Пирятинская С.Ф. Методы поиска новых технических решений / Пирятинская С.Ф., Иванов Г.И., Киселев Л.М. – К.: УкрНИИТИ, 1988. – Вып. 4. – 236 с.
16. Жолондковский О.И. Внимание, воздух! / Жолондковский О.И. – М.: Моск. Рабочий, 1985. – 159 с.
17. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов : [под ред. Л.:В. Чекалова.] – Ярославль: Русь, 2004. – 424 с.
18. Ter Linden A. Investigation in to cyclone Dust Collectors. Proc.Inst. Mech. Eng., 1949. pp160 - 233.
19. Кифаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии / В.В Кифаров , И.Н. Дорохов – М.: Наука, 1976. – 500 с.
20. Сидоренко В.М Основы научных исследований / В.М. Сидоренко , И.М Грушко – Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1977. – 200 с.
21. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / Коузов П.А. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.
22. Коузов П.А. Анализ дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / Коузов П.А. – [3-е изд. перераб.] – Л.: Химия, 1974. – 205 с.
23. Кузнецов И.Е. Оборудование санитарной очистки газов / Кузнецов И.Е., Шмат К.И., Кузнецов С.И. – К.: Техніка, 1989. – 304 с.
24. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, Решидов И.К. – М.: Химия, 1981. – 392 с.

25. Иевлев Н.А. Эксплуатация пневмотранспортных установок / Иевлев Н.А. – М.: Лесн. пром - ть, 1973. – 112 с.
26. Физико – химические свойства элементов /под ред. Г.В.Самсонова. – Киев: Наукова думка.– 1965. – 807с.
27. Левин Л.М. Исследования по физике крупнодисперсных аэрозолей / Левин Л.М – М.: АН СССР, 1961. – 265 с.
28. А.с. 464319 СССР, МКИ В01 d 45/12. Центробежный сепаратор / 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; заяв. 08.12.72; опубл. 09.10.75, Бюл. №3. – 2 с.
29. Сажин Б.С. Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Обзорная информация / Б.С. Сажин , Л.И Гудин. – 1982. – №1(38), – С.47.
30. Ogawa A., Sugiyama K., Nagasaki K. Separation mechanism for fine solid particles in the uniflow type of the cyclone dust collector. Paper presented at Filtech Conference, Horsham, West Sussex, UK, 1993. – PP. 627-640.
31. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве / Старк С.Б. – М.: Металлургия, 1990. – 296 с.
32. Средства защиты в машиностроении: Расчёт и проектирование / [Белов С.В., Козьяков А.Ф. , Партолин О.Ф. и др.]; под ред. С.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1989. – 386 с.
33. Кучерук В.В. Очистка вентиляционного воздуха от пыли / Кучерук В.В. – М.: Машгиз, 1963. – 144 с.
34. Гордон Г.М. Пылеулавливание и очистка газов / Г.М Гордон , И.Л.Пейсахов – М.: Металлургия, 1968. – 396 с.
35. Алиев Г.М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок / Алиев Г.М. – М: Металлургия, 1983. – 296 с.
36. Дубинін А.І., Майструк В.В. Перспективні напрямки вдосконалення конструкції циклонів// Вісник ДУ "Львівська політехніка": Хімія, технологія речовин та їх застосування. – Львів: ДУ "Львівська політехніка". – 1996, № 3. – 117 с.

37. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / Берлянд М.Е. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 360 с.
38. Алиев Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов / Алиев Г.М. – М.: Metallurgia, 1986. – 544 с.
39. А.с. 638382 СССР, МКИ В01С 3/06. Гидроциклон / И.И.Кравченко (СССР). - № 2483313/23 - 26; заяв. 11.05.77; опубл. 05.06.79, Бюл.№ 13. – 1 с.
40. А.с. 598651 СССР, МКИ В04С 3/06. Гидроциклон / В.А.Вайдуков, Н.И.Глаголев (СССР). – № 2433636 / 23 – 26; заяв. 27.12.76; опубл. 5.10.77, Бюл. № 15. – 2 с.
41. А.с. 1041161 СССР, МКИ В04С 7/00. Циклон / А.П.Кулик, Б.П.Гончарук (СССР). – № 3400160 / 23 – 26; заяв. 25.02.82; опубл. 15.09.83, Бюл. № 34. - 2 с.
42. А.с. 1096003 СССР, МКИ В04С 5/02. Циклонный элемент / А.К.Панов, Т.Ф.Ильина, Н.А. Артамонов (СССР). – № 3476933 / 23 – 26 ; заяв. 23.07.82; опубл. 7.07.84, Бюл. № 21. – 2 с.
43. Cyclone dust collector. – Chem. Eng. 1977, February 14, P. 65 - 72.
44. Гервасьев А.М. Пылеуловители / Гервасьев А.М – М.: СИОТ, 1954. – 425 с.
45. А.с. 464319 СССР, МКИ В01 d 45/12. Центробежный сепаратор / 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; заяв. 08.12.72; опубл. 09.10.75, Бюл. № 43. – 2 с.
46. Куц В.П. Особенности газодинамики и эффективность прямоочных каплепылеуловителей компрессорных станций. – Суммы: ОАО Сумское машиностроительное НПО им. М.В. Фрунзе. – 2003. – 194 с.
47. А.с. 546378 СССР, МКИ В04С 5/14. Циклон / Б.Я. Грицай, Е.А.Капустин, Б.Г.Халеф, С.Ф.Сидоренко, В.Т. Лаврусь, В.И. Мыльников (СССР). – № 2128923/26; заяв. 28.04.75; опубл. 10.05.76, Бюл. № 12. – 1 с.
48. А.с. 443686 (2) СССР, МКИ В04С 5/11. Циклон / В.М.Бочкарев, В.А.Синеужбовик, К.И. Филипова (СССР). – № 1803983/23 –26 ; заяв. 29.06.72 ;

опубл. 03.07.74, Бюл. № 35. – 2 с.

49. Сулименко В., Козлицкий С., Штиман И. Повышение эффективности работы циклона. Metallurgический комбинат Криворожсталь // Metallurg. – 1986, № 8. – С. 47-51.

50. Дубинін А.І. Циклон з проміжним відведенням осадженого пилу / А.І. Дубинін, В.В. Майструк. – Хімічна промисловість України. – 1999, №2. – с. 40-43.

51. Киселева З.Л. Новые пылеулавливающие установки / З.Л. Киселева, Э.И. Бердникова. – К.: УкрНИИНТИ, 1985. – 42 с.

52. Barth W. Berechnung und Auslegung von Zyklonenabscheidern auf Neurer Grund Untersuchungen / Brennstoff – Wärme – Kraft. Bd.8, №1, 1956. – S.1 – 10.

53. Бусарев Е.А. Исследование гидравлического сопротивления аппаратов вихревого типа для комплексной очистки газов / Бусарев Е.А., Алексеев В.В., Поникаров И.И. – Химия и компьютерное моделирование. Вултеровские сообщения. – 2004. – т.5. – №2.

54. Пирятинская С.Ф. Методы поиска новых технических решений / Пирятинская С.Ф., Иванов Г.И., Киселев Л.М. – Сер. Изобретательство и патентное дело: Обз. информ. – К.: УкрНИИНТИ. – 1988, вып. 4. – 236 с.

55. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / [В.А. Ананьев, Л.Н. Балужева, А.Д. Гальперин и др.] – М.: Евроклимат, изд. Арина, 2000. – 416 с.

56. Журавлев В.П. Энергосберегающие установки отплення, вентиляции и кондинционирования / В.П.Журавлев, В.И.Беспалов. – Ростов н/Д: изд.инж. – сторит. ин-та, 1989. – С.32-39.

57. Исследование и разработка способов и средств борьбы с дисперными системами, загрязняющими окружающую среду / [Журавлев В.П., Беспалов В.И., Василевский С.В. и др.] – Караганда: изд-во КарГУ, 1987. – С.46-52.

58. Власов А.Ф. Удаление пыли и стружки от режущих инструментов / Власов А.Ф. – М.: Машиностроение, 1982. – 183 с.

59. Евстифеев В.Н. Трубопроводный транспорт пластических и сыпучих материалов в строительстве / Евстифеев В.Н. – М.: Стройиздат, 1989. – 248 с.

60. Коузов П.А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности / Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. – Л.: Химия, 1982. – 256 с.

61. Ушаков С.Г. Энерционная сепарация пыли / С.Г. Ушаков, Н.И. Зверев. – М., «Энергия» 1974. – 168 с.

62. Янковский С.С. Основные пути совершенствования аппаратов инерционной очистки газов / С.С. Янковский, Л.Я. Градус. – М.: Машиностроение, 1989. – 46 с.

63. Иевлев Н.А. Эксплуатация пневмотранспортных установок / Иевлев Н.А. – М.: Лесн. пром – сть, 1973. – 112 с.

64. Гордон Г.М. Единая методика сравнительных испытаний пылеуловителей / Гордон Г.М., Зайцев М.М., Коузов П.А. – Л.: Наука, 1967. – 120 с.

65. Бабицкий Л.Ф. Основы научных исследований / Бабицкий Л.Ф., Булгаков В.М., Войтюк Д.Г. – К.: Изд. – во НАУ, 1999. – 205 с.

66. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – К.: Техніка, 1975. – 168с.

67. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / Винарский М.С., Лурье М.В. – К.: Техніка, 1995. – 154 с.

68. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Веденяпин Г.В. – М.: Колос, 1973. – 199 с.

69. Сидоренко В.М. Основы научных исследований / В.М. Сидоренко, И.М. Грушко. – Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1977.– 200с.

70. Инструкция по проведению анализа дисперсного состава пыли седиментационными методами в жидкой среде. – Л.: Мир, 1965. – 50 с.

71. Градус Л.Я. Руководство по дисперсному анализу методом микроскопии / Градус Л.Я. – М.: Химия, 1979. – 245 с.
72. Двухфазные моно – и полидисперсные течения газа с частицами: [збр. наук. раб. / под ред. Л.Э.Стернина]. - Г.: Машиностроение. – 170 с.
73. Стернин Л.Э. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами. / под ред. Стернина Л.Э. - Г.: Машиностроение, 1985. – 170с.
74. Шиляев М.И. Гидродинамическая теория ротационных сепараторов / Шиляев М.И. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1983. – 233 с.
75. Ландау Л.Д. Механіка суцільних середовищ / Л.Д. Ландау , Е.М. Ліфшиц. – М.: ГИТТЛ, 1954.
76. Юн А.А. Расчет и моделирование турбулентных течений с теплообменом, смешанием, химическими реакциями и двухфазных течений в программном комплексе Fastes – 3D / А.А.Юн, Б.А.Крылов. – Учебное пособие. – М.: Изд – во МАИ, 2007. – 116 с.
77. Горбис З. Р. Физическая модель и математическое описание процесса движения мелких частиц в турбулентном потоке газозвеси / З. Р. Горбис, Ф. Е. Спокойный . – ТВТ,1977. – 15, № 2. – С. 399 – 408.
78. Горбис З. Р. Влияние основная силовых факторов на поперечную скорость мелках частиц, движущихся в турбулентном потоке газа / Горбис З. Р., Спокойный Ф. Е., Загайнова Р. В. – ИФЖ. 1976. – 30, № 4. – С. 657 – 664.
79. Кроу В.С. Численные модели течений газа с небольшим содержанием частиц / Кроу В.С. Теорет. основы инж. расчетов, 1982. – 104, № 3. – С. 114 – 122.
80. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй / Абрамович Г. Н. – М.: Наука, 1984. – 717 с.
81. Турбулентность / [Брэдшоу П., Себеси Т., Фернгольц Г.Г. и др] – М.: Машиностроение, 1980. – 344 с.
82. Бусройд. Р. Течение газа со взвешенными частицами / Бусройд. Р. – М.: Мир, 1975. – 378 с.
83. Власов Е.В. Исследование волновой структуры течений в начальном

участке струи при различных уровнях начальной турбулентности / Власов Е.В., Гиневский А.С., Каравосов Р.К. – Ученые записки ЦАГИ, 1978. – Т. 9, №1. – С. 251 – 255.

84. Монин А. С. Статистическая гидромеханика / А. С. Монин , А. М. Яглом. – М.: Наука, 1967. – Ч. 1 – 2.

85. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Нигматулин Р. И. – М.: Наука, 1978. – 336 с.

86. Соу С. Гидродинамика многофазных систем / Соу С. – М.: Мир, 1971. – 536 с.

87. Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах / Стернин Л. Е. – М.: Машиностроение, 1974. – 212с.

88. Фортъе А. Механика суспензии / Фортъе А. – М.: Мир, 1971. – 264 с.

89. Фукс Н. А. Механика аэрозолей / Фукс Н. А. – М: Изд – во АН СССР, 1955. – 352 с.

90. Хинце И.О. Турбулентность / Хинце И.О. – М.: Физматгиз, 1963. – 680 с.

91. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Абрамович Г.Н. – Г.:Физматгиз, 1960.

92. Бруяцкий Э.В. Турбулентные стратифицированные течения / Бруяцкий Э.В. – Киев: Научная мысль, 1986. – 295 с.

93. Бредшоу М. Турбулентность / Бредшоу М. – Г.: Машиностроение, 1980. – 343 с.

94. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов / Гиневский А.С. – Г.: Машиностроение, 1969. – 400 с.

95. Таллин Анэср. Турбулентные двухфазные течения / Таллин Анэср. – 1976

96. Шрайбер А.А., Гавин А.Б., Наумов В.А. Турбулентные течения газовзвеси / Шрайбер А.А., Гавин А.Б., Наумов В.А. – Киев: Научная мысль, 1987. – 240 с.

97. Шец Дж. Турбулентные течения. Процессы вдува с перемешиванием /

Шец Дж. – Г.: Мир, 1984. – 247 с.

98. Baranovsky S.I., Shetz J.f. Effect of injection angle on liquid injection in supersonic flow.- AIAA 79-0383,1979

99. Сажин Б.С. Моделирование движения газа в аппаратах со встречными закрученными потоками / Сажин Б.С. ТОХТ, 1985. – Т.19, №5, – С. 687 – 690.

100. Якуба А.Р. Структура потоков прямоочных вихревых аппаратов / А.Р. Якуба , С.А. Кузько. – «Гидравлические машины и аппараты», – Киев: ИСНУ, 1994. – С. 291 – 299.

101. Якуба А.Р. Анализ и оценка сил, действующих на частицы в сепараторах с закрученными потоками / А.Р. Якуба , А.Н. Калашников. – Весник Сумского Государственного университета,1998. – №2(10)–С. 41 – 45.

102. Харлоу Ф.Х. Чисельний метод частинок в комірках для задач гідродинаміки. Обчислювальні методи в гідродинаміці / Харлоу Ф.Х. – М.: Мир, 1967.

103. Гольдшик М.А. Вихревые потоки / Гольдшик М.А. – Новосибирск:Наука, 1981. – 366 с.

104. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Лойцянский Л.Г. – М.: Изд – во „Наука”, гл. ред. [физ.–мат. лит-ра], 1978. – 736 с

105. А.А.Халатов, А.А.Авраменко, И.В.Шевчук. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: в 4 - х т / А.А.Халатов, А.А.Авраменко, И.В.Шевчук. – Киев: Ин – т техн. теплофизики НАН Украины – Т.3: Закрученные потоки. – 1996 – 289 с.

106. Виноградов Б. С. Прикладная газовая динамика / Виноградов Б. С. – М.: Университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, 1965. – 348 с.

107. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Руководство пользователя. М.: ООО Тесис. 2002. – 262 с.

108. Фрост У. Турбулентность. Принципы и применения /под редакцией У.Фроста, Т.Моулдена. - М.: Мир. 1975. 535 с.

109. Ужов В.Н. Подготовка промышленных газов к очистке / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг – М.: Химия, 1975. – 216 с.

110. Краснов Н.Ф. Прикладная аэродинамика/ под.ред. Краснова Н.Ф. – Карману. Высш.шк., 1974.
111. Аэродинамика закрученной струи / [Р.Б. Ахмедов, Т.Б. Балагула, Ф.К. Рашидов, А.Ю. Сакаев]; под. ред.. Р.Б. Ахмедова. – М., «Энергия», 1977. – 240 с.
112. Гупта А. Закрученные потоки / Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. – М.: Мир, 1987. – 403 с.
113. Якуба Р.А. Структура потоков прямоочных вихревых аппаратов / Р.А. Якуба, С.А. Кузько. - Гидравлические машины и аппараты. – Киев.: ИСНУ, 1994. – С. 291 – 299.
114. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / Повх И.Л. – Л.: Стройиздат, 1974. – 479 с.
115. Кучерук В.В. Очистка вентиляционного воздуха от пыли / Кучерук В.В. – М.: Машгиз, 1963. – 144 с.
116. Куц В.П. Повышение эффективности пылеулавливания в центробежно-инерционных пылеуловителях с жалюзийным отводом воздуха : дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Куц В.П. – Львов, 1986. – 221 с.
117. Пат. № 29965 Україна, B01D45/00 Мокрий пиловловлювач із спеціальною формою жалюзі / Батлук В. А., Проскуріна І.В., Мельников О.В., від 08.05. 2007. B01D45/00, опубл. 11.02.2008 бюл. № 3.
118. Пат. № 22086 Україна, B01D45/00 Мокрий пиловловлювач / Батлук В. А, Проскуріна І.В., від 30.11. 2006. B01D45/00, опубл. 10.04.2007 бюл. № 4.
119. Пат. № 21264 Україна, B01D45/00 Пиловловлювач зі змоченими жалюзі / Батлук В. А., Проскуріна І.В., від 21.07. 2006. B01D45/00, опубл. 15.03.2007 бюл. № 3.
120. Fredriksson C. Exploratory Experimental and Theoretical Studies of Cyclone Gasification of Wood Powder. Doctoral thesis / Lulea university of technology. Sweden. 1999. – P. 169.
121. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Румшицкий Л.З. – М.: Наука, 1971. – 192с.

122. Шмойлова Р.А. Теория статистики / под ред. Шмойловой Р.А. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 460с.
123. 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.
124. Джонс Эдвард, Саттон Дерек. Библия пользователя Office 97 / Пер. с англ.- К.: Диалектика, 1997.-848с.
125. Монин Л.С. Статистическая гидромеханика / Л.С. Монин , А.М. Яглом . – Т.1. – С.Пет., Гидр., 1992. – 694 с.
126. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов / Под ред. Л.В. Чекалова. – Ярославль: Русь, 2004. – 424 с.
127. Ершов А.И. Новые конструкции сепараторов для очистки промышленных газов. Обзорная информация / Ершов А.И., Плехов И.М., Бершевец А.И. – Минск: БелНИИТИ,1973. – 35 стр.
128. Батлук В.А. Система обеспыливания в коксохимическом производстве / В.А. Батлук, Г.Г. Шальский, И.В. Проскурина // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2005. №20. – С. 218 – 229.
129. Батлук В.А. Дослідження пристрою для безпилової видачі коксу/ В.А. Батлук, І.В. Проскуріна / Промислова гідравліка і пневматика. – 2006. – №4(14). – С. 41 – 44.
130. Шальский Г.Г. Процесс обеспыливания на перегрузочных пунктах ленточных конвейеров / Г.Г. Шальский, И.В. Проскурина, Т.Б Ведмедева // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2007. №23. – С. 77 – 84.
131. Батлук В.А. Принципово нові напрямки підвищення чистоти повітря для пневматичних агрегатів / В.А. Батлук, О.В Мельніков, Н.В Ступницька, Р.А Яцюк, І.В. Проскуріна // Вісник Східноукраїнського національного

університету імені Володимира Даля. – 2007. – № 3(109). – Частина 2. – С. 29 – 33.

132. Батлук В.А. Покращення екологічної обстановки у коксохімічному виробництві / В.А. Батлук, І.В.Проскуріна // Промислова гідравліка і пневматика. – 2008. – № 4(22). – С. 9 – 12.

133. Батлук В.А. Водные ресурсы и пути решения проблемы чистой воды / В.А. Батлук, В.Г. Макарчук, Э.В. Романцов, И.В. Проскурина // Українська академія друкарства “Наукові записки”. – 2008. – № 1(13). – С. 231 – 238.

134. Проскуріна І.В. Принципове нове в методах очистки повітря від пилу в процесах видобування коксу з камер коксових батарей / І.В. Проскуріна // Східно – європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 4/9(40). – С. 12 – 15.

135. Проскуріна І.В. Моделювання руху пило повітряного потоку у полі відцентрово-інерційних сил / І.В. Проскуріна // Промислова гідравліка і пневматика. – 2009. – № 2(24). – С. 29 – 34.

136. Батлук В.А. Математична модель процесу очищення запиленого потоку у відцентрово – інерційних пиловловлювачах / В.А. Батлук, І.В. Проскуріна, А.В. Ляшеник // Промислова гідравліка і пневматика. – 2010. – № 1(27). – С. 31 – 36.

137. Проскуріна І.В. Економічна ефективність для установок пиловловлюючого обладнання / І.В. Проскуріна // Східно – європейський журнал передових технологій. – 2010. – №5/6(47). – С. 43 – 46.

138. Батлук В.А. Математична модель руху двофазного потоку в пристроях очищення запиленого потоку в технологіях машинобудування / В.А. Батлук, І.В.Проскуріна, В.В. Батлук // Вісник НТУУ “КПІ”. Машинобудування. – К.: НТУУ “КПІ”, 2010 – С. 87 – 93