

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра безпеки праці та охорони довкілля

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Наталія МАКСИМОВА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Природозахисні технології в урбо-індустріальному комплексі»
за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища

**на тему «Підвищення ефективності системи аспірації вузла
шихтоподачі доменного цеху»**

Керівник роботи

Наталія МАКСИМОВА

Консультант від бази практики

Вероніка РАЗІНА

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

Здобувач

Антон ПОДОБНИЙ

Підсумкова оцінка за атестацію

Голова ЕК

Катерина СУХОДОЛЬСЬКА

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Кафедра безпеки праці та охорони довкілля
Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр
Спеціальність: 183 Технології захисту навколишнього середовища
ОПП «Природозахисні технології в урбо-індустріальному комплексі»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри БПОД

Максим КАРАКАЙ

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Антон Дмитровича Подобного

(Прізвище Ім'я По батькові)

1. Тема роботи «Підвищення ефективності системи аспірації вузла шихтоподачі доменного цеху»

керівник роботи Максимова Н.М., канд. техн. наук, доцент
затверджені наказом ректора ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» від «23» лютого 2026 року №
41/23.02.2026

2. Строк подання здобувачем роботи 11.06.2026

3. Вихідні дані до роботи: технологічні інструкції доменного цеху,
технічна документація на рукавні фільтри ФРІР.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які
потрібно розробити): Вступ. Розділ 1. Аналіз існуючого стану проблеми
та характеристика джерел пилоутворення. Розділ 2. Визначення
основних параметрів системи аспірації і газоочисного обладнання вузла
шихтоподачі доменного цеху металургійного комбінату. Розділ 3.
Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу: Розрахункова схема
магістрального газовідводного тракту. Загальний вигляд та
конструктивна схема рукавного фільтра ФРІР-5000.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| 1. | Максимова Н.М., доцент | 24.02.2026 | 29.04.2026 |
| 2. | Максимова Н.М., доцент | 24.02.2026 | 29.05.2026 |
| 3. | Максимова Н.М., доцент | 24.02.2026 | 05.06.2026 |

7. Дата видачі завдання 24.02.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1. | Аналіз літературних джерел за темою кваліфікаційної роботи | 30.03.2026 | виконано |
| 2. | Розділ 1. Аналіз існуючого стану проблеми та характеристика джерел пилоутворення | 29.04.2026 | виконано |
| 3. | Розділ 2. Визначення основних параметрів системи аспірації і газоочисного обладнання вузла шихтоподачі доменного цеху металургійного комбінату | 29.05.2026 | виконано |
| 4. | Розділ 3. Охорона праці | 05.06.2026 | виконано |
| 5. | Оцінка підсумків кваліфікаційної роботи, висновки та пропозиції, список використаних джерел, додатки, оформлення роботи і презентаційного матеріалу та подання на оцінення | 10.06.2026 | виконано |

Здобувач вищої освіти

Антон ПОДОБНИЙ

Керівник роботи

Наталія МАКСИМОВА

АНОТАЦІЯ

Подобний Антон Дмитрович. Підвищення ефективності системи аспірації вузла шихтоподачі доменного цеху. 67 сторінок, 2 рисунки, 5 таблиць, 26 джерел. – Кваліфікаційна робота бакалавра за освітньою програмою «Природозахисні технології в урбо-індустріальному комплексі». ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єкт дослідження: вловлення, очищення та відведення пилогазових викидів у доменному виробництві.

Предмет дослідження: забезпечення ефективності роботи системи системи газоочищення бункерної естакади доменної печі.

Мета дослідження полягає в розробці та інженерному обґрунтуванні комплексу рішень щодо вдосконалення системи газоочищення бункерної естакади доменної печі із застосуванням рукавного фільтра та вдосконаленням алгоритмів екологічного моніторингу.

Основні результати:

У першому розділі виконано аналітичний огляд механізмів утворення високодисперсних пилогазових викидів на бункерній естакаді. Обґрунтовано доцільність впровадження сучасних тканинних рукавних фільтрів.

У другому розділі наведено опис технологічної схеми аспіраційної установки, конструктивних особливостей фільтра ФРІР-5000 та системи його імпульсної регенерації. Проведено комплексні інженерні розрахунки пилогазоочисної установки. Визначено необхідну площу фільтрації, розраховано масу вловленого продукту (близько 10 тонн на добу) та аеродинамічний опір фільтра і магістрального колектора.

Запропоновано алгоритм інтеграції трибоелектричних пиломірів в

автоматизовану систему контролю викидів (АСКВ) для запобігання аварійним ситуаціям. Обґрунтовано технологію окомкування (грануляції) вловленого залізовмісного пилу в барабанних зволожувачах, що забезпечує ліквідацію вторинного пиління та дозволяє повернути вторинну сировину в металургійний переділ.

У третьому розділі ідентифіковано шкідливі та небезпечні виробничі фактори на робочих місцях операторів. Розроблено інженерно-технічні та організаційні заходи з охорони праці при експлуатації потужного газоочисного, тягодуттєвого та пневматичного обладнання.

Результати дослідження орієнтовані на практичне використання на підприємствах чорної металургії для досягнення залишкової запиленості менше 20 мг/м³ та реалізації принципів економіки замкненого циклу (Circular Economy).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: аспірація, доменна піч, вузол шихтоподачі, рукавний фільтр, ФРІР-5000, залізовмісний пил, АСКВ, рециклінг, окомкування, CycloneEngine.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 7 |
| 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ДЖЕРЕЛ ПИЛОУТВОРЕННЯ | 9 |
| 1.1 Технологічна характеристика вузла шихтоподачі доменної печі як джерела викидів | 9 |
| 1.2 Фізико-хімічні властивості вловлюваного пилу | 10 |
| 1.3 Огляд існуючих методів очищення та обґрунтування застосування рукавних фільтрів | 11 |
| 1.4 Основні експлуатаційні характеристики високоєфективних фільтрувальних матеріалів | 12 |
| Висновки за розділом 1 | 18 |
| 2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АСПІРАЦІЇ І ГАЗООЧИСНОГО ОБЛАДНАННЯ ВУЗЛА ШИХТОПОДАЧІ ДОМЕННОГО ЦЕХУ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМБІНАТУ | 19 |
| 2.1 Система аспірації і газоочисного обладнання вузла шихтоподачі доменного цеху | 19 |
| 2.2 Методика інженерних розрахунків та їх цифровізація | 25 |
| 2.3 Основи безперервного моніторингу дисперсних середовищ методом індуктивної електризації | 31 |
| 2.4 Визначення базових технологічних параметрів рукавного фільтра ФРІР-5000 | 35 |
| 2.5 Розрахунок аеродинамічних параметрів газовідвідного тракту та оцінка навантажень | 39 |
| 2.6 Вдосконалення системи моніторингу та інструментального контролю залишкової запиленості | 42 |
| 2.7 Екологічний ефект від впровадження системи | |

| | |
|--|-----------|
| окомкування (рециклінгу) вловленого пилу | 45 |
| Висновки за розділом 2 | 47 |
| 3 ОХОРОНА ПРАЦІ | 48 |
| 3.1 Ідентифікація небезпек та оцінка професійних ризиків | 49 |
| 3.2 Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці | 50 |
| 3.3 Вимоги безпеки під час виконання робіт | 51 |
| 3.4 Заходи безпеки після завершення робіт | 52 |
| Висновки за розділом 3 | 52 |
| ВИСНОВКИ | 54 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 56 |
| ДОДАТОК А Сертифікат участі у міжнародному конкурсі студентських наукових робіт «Black Sea Science 2026» | 59 |
| ДОДАТОК Б Публікація здобувача за темою досліджень | 60 |
| ДОДАТОК В Декларація про розкриття факту делегування завдань генеративному ШІ | 67 |

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні вимоги до металургійного виробництва зумовлюють необхідність впровадження ефективних природозахисних технологій екологічної безпеки. Доменне виробництво, і зокрема процеси підготовки та транспортування сировини на вузлах шихтоподачі, супроводжується інтенсивним виділенням дрібнодисперсного залізовмісного пилу. Традиційні методи механічного та мокрого очищення газів вже не здатні забезпечити дотримання сучасних санітарно-гігієнічних та екологічних нормативів.

З огляду на це, технічне переоснащення систем аспірації з переходом на високоефективні рукавні фільтри є раціональним та необхідним кроком. Інтеграція систем інструментального контролю та методів утилізації вловленого пилу дозволяє зменшити антропогенне навантаження на довкілля та забезпечити раціональне використання ресурсів.

Об'єкт дослідження: вловлення, очищення та відведення пилогазових викидів у доменному виробництві.

Предмет дослідження: забезпечення ефективності роботи системи системи газоочищення бункерної естакади доменної печі.

Мета дослідження полягає в розробці та інженерному обґрунтуванні комплексу рішень щодо вдосконалення системи газоочищення бункерної естакади доменної печі із застосуванням рукавного фільтра та вдосконаленням алгоритмів екологічного моніторингу.

Для досягнення мети поставлено такі основні завдання:

1) аналіз існуючого стану джерел пилоутворення, дослідити фізико-хімічні властивості викидів на ділянці шихтоподачі та обґрунтувати вибір оптимального методу очищення і фільтрувальних

матеріалів;

2) розрахувати технологічні параметри рукавного фільтра, включаючи необхідну площу фільтрації, гідравлічний опір та масу вловленого продукту;

3) змоделювати аеродинаміку газовідвідного тракту та підтвердити ефективність тягодуттєвого обладнання;

4) опрацювання алгоритму для автоматизованої системи контролю залишкової запиленості;

5) обґрунтувати впровадження технології окомкування (грануляції) пилу для його безпечної та безвідходної утилізації;

6) проаналізувати умови праці та запропонувати дієві інженерні заходи з охорони праці при експлуатації потужних газоочисних установок.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені в кваліфікаційній роботі технічні рішення та алгоритми контролю безпосередньо орієнтовані на впровадження в умовах діючого металургійного підприємства. Застосування інженерного моделювання дозволяє оптимізувати експлуатацію тягодуттєвого обладнання, а запропонована схема рециклінгу через зволоження гарантує економічний ефект за рахунок збереження залізовмісної сировини та повного усунення ризиків вторинного пилоутворення на промисловому майданчику.

Результати дослідження були розглянуті на міжнародному конкурсі студентських наукових робіт «Black Sea Science 2026» та апробовані під час участі у II Всеукраїнській науково-технічній конференції «Новітні технології в освіті, науці та виробництві» (дод. А-Б).

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ДЖЕРЕЛ ПИЛОУТВОРЕННЯ

1.1 Технологічна характеристика вузла шихтоподачі доменної печі як джерела викидів

Вузол шихтоподачі доменної печі металургійного підприємства є складним технологічним комплексом, призначеним для прийому, тимчасового накопичення, сортування (відсіву дріб'язку) та дозованої видачі шихтових матеріалів на скіповий підіймач. Основною сировиною, що переробляється на даній ділянці, є залізорудний агломерат, окатиші, металургійний кокс та флюсові добавки.

Технологічний процес супроводжується численними перевантаженнями сипучих матеріалів: вивантаження з вагонів у бункери, видача з бункерів на віброживильники, транспортування конвеєрними стрічками, грохочення (відсів дрібної фракції коксу та агломерату) та завантаження у скіпи або на конвеєр колошника. Кожна точка пересипу, особливо при роботі з сухим і крихким агломератом, є джерелом інтенсивного неорганізованого виділення пилу.

Без ефективної системи аспірації дрібнодисперсний пил потрапляє в робочу зону бункерної естакади, погіршуючи санітарно-гігієнічні умови праці, осідає на обладнанні, спричиняючи його прискорений абразивний знос, та виноситься конвективними потоками за межі цеху, забруднюючи атмосферне повітря промислового майданчика та прилеглих територій.

1.2 Фізико-хімічні властивості вловлюваного пилу

Для правильного вибору та розрахунку пиловловлюючого обладнання критично важливим є глибоке розуміння фізико-механічних та хімічних властивостей пилу, що утворюється. Пил бункерної естакади доменного цеху є полідисперсною гетерогенною системою зі специфічними характеристиками:

- дисперсний склад. Пил відрізняється високою часткою дрібнодисперсних фракцій. Значна частина маси (понад 80%) припадає на частинки розміром менше 10 мкм (PM_{10}), а значна частка – менше 2,5 мкм ($PM_{2.5}$). Саме ці фракції є найбільш небезпечними для дихальної системи людини (фіброгенна дія) і найважче вловлюються традиційними механічними апаратами (наприклад, одиночними циклонами);
- хімічний склад. Основу пилу складають оксиди заліза (Fe_2O_3 , Fe_3O_4), вміст чистого заліза (Fe) досягає 55–58%. Також присутні діоксид кремнію (SiO_2), оксиди кальцію (CaO) та магнію (MgO), а також вуглець (від коксового пилу);
- абразивність. Через високий вміст залізорудних складових та кремнію, пил має високу абразивність, що вимагає використання зносостійких матеріалів для повітропроводів (товщина стінки не менше 4–5 мм) та спеціальних фільтрувальних тканин;
- гідрофільність та здатність до коагуляції. Пил добре змочується водою, проте при зволоженні схильний до утворення міцних відкладень (цементациї), що ускладнює його транспортування в мокрому вигляді, але робить є придатним (або технологічно зручним) для процесу грануляції.

1.3 Огляд існуючих методів очищення та обґрунтування застосування рукавних фільтрів

Історично на вузлах шихтоподачі доменних печей застосовувалися системи мокрої газоочистки (відцентрові скрубери, труби Вентурі) або батареїні циклони.

Циклони мають недостатню ефективність вловлювання для дрібнодисперсних фракцій [1-2]. Їх загальний ККД рідко перевищує 80–85% для пилу естакади, що не дозволяє досягти нормативних показників викидів.

Мокрі апарати забезпечують краще очищення, але створюють проблему утилізації брудних шламів, потребують складного шламового господарства, систем оборотного водопостачання та страждають від інтенсивної корозії і заростання повітропроводів [3-5].

Відповідно до сучасних вимог екологічного законодавства та принципів найкращих доступних технологій та методів управління (НДТМ), для очищення викидів від неорганічного пилу одним з раціональних підходів є використання «сухих» методів на базі тканинних (рукавних) фільтрів.

Застосування фільтра типу ФРІР (фільтр рукавний з імпульсною регенерацією) дозволяє [6-9]:

- 1) забезпечити стабільну ефективність очищення на рівні 99,5–99,9% незалежно від дисперсного складу та початкової концентрації пилу;
- 2) гарантувати залишкову запиленість на виході менше 20 мг/м³, що повністю відповідає європейським екологічним нормативам;
- 3) отримувати вловлений продукт у сухому вигляді, що дозволяє організувати його пряме повернення у виробничий цикл (через грануляцію або безпосередньо на аглофабрику) без необхідності зневоднення шламів.

Отже, переоснащення системи газоочищення на більш ефективне пиловловлююче устаткування, наприклад передбачення установки рукавного фільтра ФРІР-5000, може розглядатись як удосконалення окремої ступіні аспіраційної системи, так і як основна установка очищення газу (ГОУ).

Таким чином, рукавний фільтр ФРІР-5000 можна розглядати як ефективне інженерне рішення для вирішення екологічних проблем бункерної естакади шихтоподачі доменного виробництва за умови відповідного технічного та екологічного обґрунтування.

1.4 Основні експлуатаційні характеристики високоефективних фільтрувальних матеріалів

Сучасні металургійні, хімічні та енергетичні підприємства функціонують в умовах суворих екологічних нормативів, де гранично допустимі концентрації (ГДК) викидів твердих частинок все частіше переглядаються в сторону підвищення вимог, а в деяких випадках вимагають уловлювання субмікронних частинок (PM2.5 та PM0.3) з ефективністю понад 99.99%.

Відповідно до наказу Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27 червня 2006 року № 309 масові концентрації суспендованих твердих частинок, недиференційованих за складом, не повинні перевищувати встановлених значень нормативів граничнодопустимих викидів в розмірі 50 мг/м^3 при величині масової витрати понад 500 г/год.

Середньодобова гранично допустима концентрація пилу неорганічного, що містить двоокис кремнію більше 70 % в атмосферному повітрі населених місць становить $0,05 \text{ мг/м}^3$ (за наказом Міністерства охорони здоров'я України від 10.05.2026 № 813).

Для досягнення таких показників сьогодні використовують складні

багатошарові композити. Особливе місце в цій технологічній еволюції займають два сучасні технологічні рішення: впровадження мікропористих мембран з експандованого політетрафтороетилену (еPTFE) [10] та розробка струмопровідних (антистатичних) голкопробивних нетканих матеріалів. Металургійна галузь є однією з основних сфер застосування цих матеріалів через складні умови експлуатації.

Політетрафтороетилен (PTFE), комерційно відомий як тефлон (Teflon™), є синтетичним фторполімером, хімічна основа якого складається з довгого вуглецевого ланцюга, повністю екранованого атомами фтору [10]. Зв'язок вуглець-фтор є надзвичайно міцним, що наділяє матеріал винятковими властивостями.

Термічна стабільність. Матеріал витримує безперервну робочу температуру від -200°C до $+260^{\circ}\text{C}$, з можливістю короточасного витримування пікових температурних сплесків до 280°C без термічної деградації чи плавлення. Це робить його найбільш термостійким матеріалом серед усіх полімерів у фільтрації.

PTFE абсолютно хімічно інертний до більшості агресивних середовищ у всьому діапазоні pH і не піддається гідролізу чи оксидації. Випробування підтверджують його стійкість навіть при контакті з 10% оцтовою кислотою при 100°C . Це критично у металургійних процесах, де діоксид сірки та волога руйнують традиційні полімери, такі як поліестер, через явище гідролізу.

PTFE є чудовим електричним ізолятором з діелектричною міцністю до 500 вольт на міл. Однак ця властивість стає значним фактором ризику накопичення статичної електрики при фільтрації горючого пилу.

У промисловості необхідно чітко розрізняти матеріали з PTFE-мембраною та матеріали зі звичайним PTFE-просоченням (табл. 1.1) [10].

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика фільтрувальних матеріалів: PTFE-мембрана (ePTFE) та PTFE-просочення [10]

| Характеристика | Фільтрувальний матеріал з PTFE-мембраною (ePTFE) | Матеріал з PTFE-просоченням |
|--------------------------------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 |
| Мікроструктура | Тонка мікропориста плівка, фізично ламінована виключно на зовнішню поверхню фільтра. | Рідка суспензія PTFE, якою просочується вся товща (глибина) матеріалу. |
| Механізм уловлювання | Поверхнева фільтрація (Surface filtration). | Глибинна фільтрація (Depth loading filtration). |
| Схильність до забивання (Blinding) | Низька. Частинки фізично не можуть проникнути всередину. | Середня/Висока. Дрібні частинки з часом глибоко вбудовуються у структуру. |
| Початкова ефективність | Пікова ефективність (>99.99%) миттєво після встановлення. | Потребує часу на формування шару пилу, супроводжується викидами під час запуску. |
| Ефективність для субмікронних часток | Висока в галузі (вловлює частинки до 2.5 мкм та 0.3 мкм). | Помірна (пропускає дрібні фракції до формування шару пилу). |

Механізм глибинної фільтрації передбачає, що частина пилу неминуче проникає в товщу фетру, що призводить до незворотного збільшення аеродинамічного опору з плином часу. Натомість мікропориста структура мембрани ePTFE утримує частинки виключно на поверхні. Завдяки відмінним самозмащувальним властивостям та гідрофобності PTFE, пил відшаровується цілими пластами під час регенерації, залишаючи поверхню чистою і гарантуючи стабільно низький тиск.

Металургійна галузь створює одні з найекстремальніших умов, де генерація пилу відбувається у доменних, електродугових сталеплавильних печах (ДСП) та аглофабриках.

Процес плавлення металобрухту супроводжується виділенням абразивного пилу (оксиди заліза, цинку, свинцю, кадмію) та динамічними температурними режимами зі сплесками поверх 200–300°C [10,17]. Традиційні високотемпературні фільтри швидко

деградують в таких умовах. Мембрани ePTFE (часто на підкладці зі скловолокна або полііміду) здатні працювати при температурах до 260°C, запобігаючи небезпечним викидам важких металів та забезпечуючи ГДК <2 мг/м³. Металургійний пил часто проявляє гігроскопічні властивості, утворюючи липку масу, що призводить до інтенсивної кольматації (забивання) звичайних фільтрів. Однак 100% гідрофобність PTFE-мембрани запобігає закріпленню вологи та липких частинок на поверхні.

Розробки на кшталт GORE® LOW DRAG оптимізують опір потоку повітря [10]. Споживана потужність вентилятора прямо пропорційна диференціальному тиску. ePTFE-мембрана утримує цей показник на стабільно низькому рівні (часто близько 0.5 дюйма водяного стовпа). Це забезпечує зниження витрат на електроенергію для вентиляторів та економію до 40% енергії компресорів, оскільки збільшуються інтервали між циклами продувки. Подовжений життєвий цикл мембранних рукавів (від 3 до 6 років) радикально знижує загальну вартість володіння, незважаючи на їх вищу початкову ціну.

Технологія PCI (Pulverized Coal Injection) оптимізує виробництво, замінюючи дорогий кокс подрібненим вугіллям, що вдувається у фурми доменної печі. Вугілля подрібнюється до фракції, де 70-80% частинок мають розмір менше 75 мікрометрів. Фільтрація цих частинок вимагає урахування високої температури, екстремальної дрібності пилу та високого ризику вибуху сухого вугільного пилу. Це вимагає злиття технологій: PTFE-мембран для уловлювання та стабілізації тиску, і антистатичних струмопровідних матеріалів для запобігання детонації [10].

Для виникнення вибуху необхідний "п'ятикутник вибуху", і пиловловлювачі за своєю природою безперервно забезпечують чотири з п'яти умов. Для запобігання аварійним ситуаціям необхідно усунути джерело запалювання, тобто розряд статичної електрики.

Тертя частинок вугілля об тканину призводить до трибоелектричного заряджання. Оскільки синтетичні волокна (поліестер, арамід, PTFE) є діелектриками з опором понад 10^{12} Ом, згенерований заряд не розсіюється і накопичується до напруги від 10 до 30 кіловольт. Водночас мінімальна енергія запалювання (MIE) для вугільного пилу становить лише від 1 до 30 міліджоулів. Іскровий розряд від накопиченого на рукаві потенціалу перевищує цю межу, що призводить до дефлаграції [12].

Розглянемо антистатичні неткані матеріали та стандарти DIN 54345. Для миттєвої дисипації зарядів у контур заземлення використовують антистатичні голкопробивні матеріали. Струмopровідні властивості досягаються двома методами: вплітанням від 2% до 6% надтонких струмопровідних ниток (нержавіюча сталь, вуглецеві волокна) або включенням струмопровідної армуючої сітки (scrim). Завдяки цьому поверхневий опір фільтра знижується до безпечного діапазону $10^5 - 10^8$ Ом (табл. 1.2) [11, 12].

Таблиця 1.2 – Характеристики струмопровідних матеріалів на основі поліестеру [11].

| Тип матеріалу (Основа: Поліестер) | Опір (Поздовжній напрямок), Ом | Опір (Поперечний напрямок), Ом |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Епітропні поліестерові волокна | 1.2×10^7 | 5.4×10^6 |
| Волокна з нержавіючої сталі | $< 1 \times 10^4$ | $< 1 \times 10^4$ |
| Вуглецево-наповнені ePTFE волокна | 3.1×10^7 | 1.4×10^6 |

Опір менше 10^8 Ом вважається безпечним. Волокна з нержавіючої сталі забезпечують найвищу провідність (менше 10^4 Ом), що ідеально для умов з найвищим ризиком детонації, тоді як вуглецеві волокна підтримують опір на рівні $10^6 - 10^7$ Ом. Розсіювання заряду також перешкоджає електромагнітному притяганню дрібного пилу,

покращуючи скидання забруднень (release-ефект) і запобігаючи забиванню пор [11, 12].

Високотехнологічний матеріал вимагає правильної механічної та електричної інтеграції. Мембрана ePTFE є надзвичайно тонкою та тендітною, вона чутлива до механічної абразії та втоми від згинання. Використання стандартних каркасів (на 10-12 поздовжніх прутків) призводить до того, що під час імпульсної продувки тканина глибоко прогинається, що швидко спричиняє мікророзриви мембрани під час удару об метал. Інженерний стандарт категорично вимагає використання каркасів із 20 поздовжніми прутками, при цьому зазор (pinch) не повинен перевищувати 1/8 дюйма [6-10].

Згідно зі стандартом NFPA 77 [12], антистатичні тканини працюють лише тоді, коли заряд може стекти з рукава на заземлений корпус. Немає потреби прокладати окремий дріт уздовж усього рукава. Достатньо вшити два металеві плетені шнури (мідні або сталеві) в манжету рукава на відстані 180 градусів один від одного. Вони забезпечують безперервний контакт із металевою трубною дошкою (tubesheet) та каркасом, миттєво відводячи статичку на заземлений корпус.

Застосування ePTFE-мембран підтвердило свою технічну ефективність у металургійній промисловості. Перехід до поверхневої фільтрації гарантує ефективність уловлювання >99.99% субмікронних часток, забезпечуючи стабільно низький аеродинамічний опір та легке відшаровування забруднювачів. Це мінімізує енергоспоживання і загальну вартість в довгостроковій перспективі.

У процесах з горючими порошками, таких як PCI, інтеграція струмопровідних волокон у нетканий матеріал перетворює ізолятор на дисипативний провідник. Це дозволяє безпечно відводити трибоелектричні заряди на заземлену конструкцію (відповідно до норм NFPA 77 та DIN 54345) [11, 12], повністю виключаючи небезпеку

детонації іскровими розрядами. Поєднання антистатичної основи та мікропористої PTFE-мембрани, за умови правильної архітектури каркасів, є вдалим поєднанням для забезпечення ефективного виробництва [12].

Висновки за розділом 1

На основі аналізу науково-технічної літератури та умов експлуатації бункерної естакади доменної печі визначено, що вузол шихтоподачі є потужним джерелом неорганізованих викидів високодисперсного залізовмісного пилу. Встановлено, що понад 80% маси пилу складає фракція PM2.5, яка володіє високою абразивністю та фіброгенною дією, що вимагає впровадження високоефективних аспіраційних споруд.

Виявлена доцільність заміни існуючих інерційних та мокрих апаратів, застарілої конструкції та суттєвого ступеню амортизації, на більш ефективні та легші в експлуатації тканинні рукавні фільтри з імпульсною регенерацією (типу ФРІР). Така заміна ГОУ сприятиме підвищенню ефективності системи аспірації вузла шихтоподачі доменного цеху та допоможе досягнути більш високих європейських вимог.

Визначено, що для надійного уловлювання дрібнодисперсних фракцій в умовах металургійного виробництва більш оптимальним є застосування поверхневої фільтрації на основі багат шарових композитів з мікропористою мембраною з експандованого політетрафтороетилену (ePTFE) та інтегрованим антистатичним каркасом з вуглецевих ниток, що мінімізує кольматацію пор та ліквідує ризику трибоелектричного іскроутворення.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ АСПІРАЦІЇ І ГАЗООЧИСНОГО ОБЛАДНАННЯ ВУЗЛА ШИХТОПОДАЧІ ДОМЕННОГО ЦЕХУ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМБІНАТУ

2.1 Система аспірації і газоочисного обладнання вузла шихтоподачі доменного цеху

Розглянемо систему аспірації і газоочисного обладнання вузла шихтоподачі доменного цеху на прикладі одного із найбільш технічно оснащених металургійних підприємств України та Європи з повним циклом – ПАТ «Запоріжсталь». До виробничої структури комбінату входять основні цехи, що забезпечують послідовний ланцюжок переділів: агломераційний, доменний, сталеплавильний (мартенівський зі шлаковим двором) та прокатні цехи (цех гарячої прокатки, цех холодної прокатки, а також центральна електростанція та допоміжні підрозділи). Основною спеціалізацією підприємства є випуск високоякісного гарячекатаного та холоднокатаного листа, сталеві стрічки, чорної жерсті та сортового прокату.

Будучи великим промисловим вузлом урбо-індустріального комплексу, комбінат чинить суттєве техногенне навантаження на компоненти навколишнього природного середовища, зокрема на атмосферне повітря. У зв'язку з цим стратегічна програма розвитку металургійного комбінату з повним циклом, та управління охорони навколишнього середовища (УОНС) підприємства зокрема, орієнтована на поетапне впровадження найкращих доступних технологій та методів управління (НДТМ) [17].

Основний пріоритет віддається переходу від застарілих мокрих способів очищення газів та неефективних інерційних апаратів до сучасних високоефективних систем сухого пиловловлення, здатних забезпечити залишкову запиленість відхідних газів на рівні

європейських нормативів – менше 20 мг/нм³ [17].

Як конкретний об'єкт дослідження в цій кваліфікаційній роботі обрано технологічну інфраструктуру доменного цеху, а саме – аспіраційну систему бункерної естакади, скіпової ями та приймальної воронки засипного апарата доменної печі (ДП).

Доменний цех становить один із найбільш матеріаломістких та екологічно навантажених секторів металургійного виробництва [13]. Процес виплавки чавуну в доменній печі шахтного типу є безперервним і потребує постійної подачі колосальних обсягів підготовлених сировинних матеріалів (шихти), до складу якої входять залізорудний агломерат, окатиші, кокс та флюсуючі добавки [13].

Центральним елементом логістичного та підготовчого ланцюжка цеху є бункерна естакада [13]. Це протяжна інженерна споруда, що виконує функції приймання, проміжного зберігання та видачі компонентів шихти. Конструктивно бункерна естакада ДП включає систему підвісних бункерів значної місткості, під якими розташовані вузли дозування, грохочення (відсіву дрібних фракцій) та транспортування.

З екологічної точки зору процес шихтоподачі характеризується утворенням потужних неорганізованих потоків дрібнодисперсного пилу. Інтенсивне пиловиділення відбувається на таких основних технологічних етапах [13]:

- 1) вивантаження та транспортування сировини: під час падіння агломерату та коксу із залізничних вагонів або магістральних конвеєрів у приймальні бункери естакади;

- 2) грохочення та дозування: у процесі механічного розсівання агломерату та коксу на вібраційних грохотах для відокремлення товарних фракцій від дріб'язку, а також при роботі шнекових та віброживильників вагових воронок;

- 3) завантаження скіпів: у районі скіпової ями, де відбувається

пересипання сформованих порцій шихти з вагових воронок безпосередньо в транспортувальні скіпи похилого мосту;

4) колошникове завантаження: у верхній частині доменної печі під час передачі матеріалів зі скіпів у приймальну воронку засипного апарата.

Висока концентрація пилу в повітрі робочої зони бункерної естакади та колошника не лише погіршує умови праці експлуатаційного персоналу, а й призводить до передчасного абразивного зносу конструкційних елементів обладнання, а при викиданні назовні – може призвести до забруднення повітряного басейну житлової зони населеного пункту, де розміщено комбінат [16].

Розглянемо доцільність застосування централізованої пилогазоочисної установки для вловлювання пилогазових викидів, що базується на використанні сухого рукавного фільтра з імпульсною регенерацією типу ФРІР-5000 [6–9, 13]. Детальний аналіз конструктивних параметрів цього апарата, аеродинаміки газовідвідного тракту та систем автоматизованого контролю є основою для розроблення інженерних рішень з оптимізації та підвищення екологічної надійності всього вузла шихтоподачі.

Для забезпечення нормативних санітарно-гігієнічних умов праці та запобігання наднормативним викидам забруднюючих речовин в атмосферу, технологічним проєктом доменного цеху (ДП) передбачено експлуатацію централізованої пилогазоочисної установки (ГОУ). Дана система призначена для аспірації (відсмоктування) запиленого повітря від місцевих укриттів технологічного обладнання вузла шихтоподачі: бункерів агломерату та коксу, конвеєрних ліній, віброгрохотів, скіпової ями та приймальної воронки засипного апарата [13].

Газовідвідний тракт являє собою розгалужену мережу повітропроводів різного перерізу, які об'єднують локальні відсоси у загальний колектор [18]. Спонукачем тяги в системі виступають два

відцентрові димососи типу ДН-26. Їх встановлено паралельно на стороні нагнітання після пиловловлюючого апарата, що є класичним і найбільш раціональним інженерним рішенням [18]. Таке компонування («на чистому газі») дозволяє транспортувати через робоче колесо димососа вже очищене повітря, тим самим захищаючи лопатки ротора від інтенсивного абразивного зносу дрібнодисперсним залізовмісним пилом.

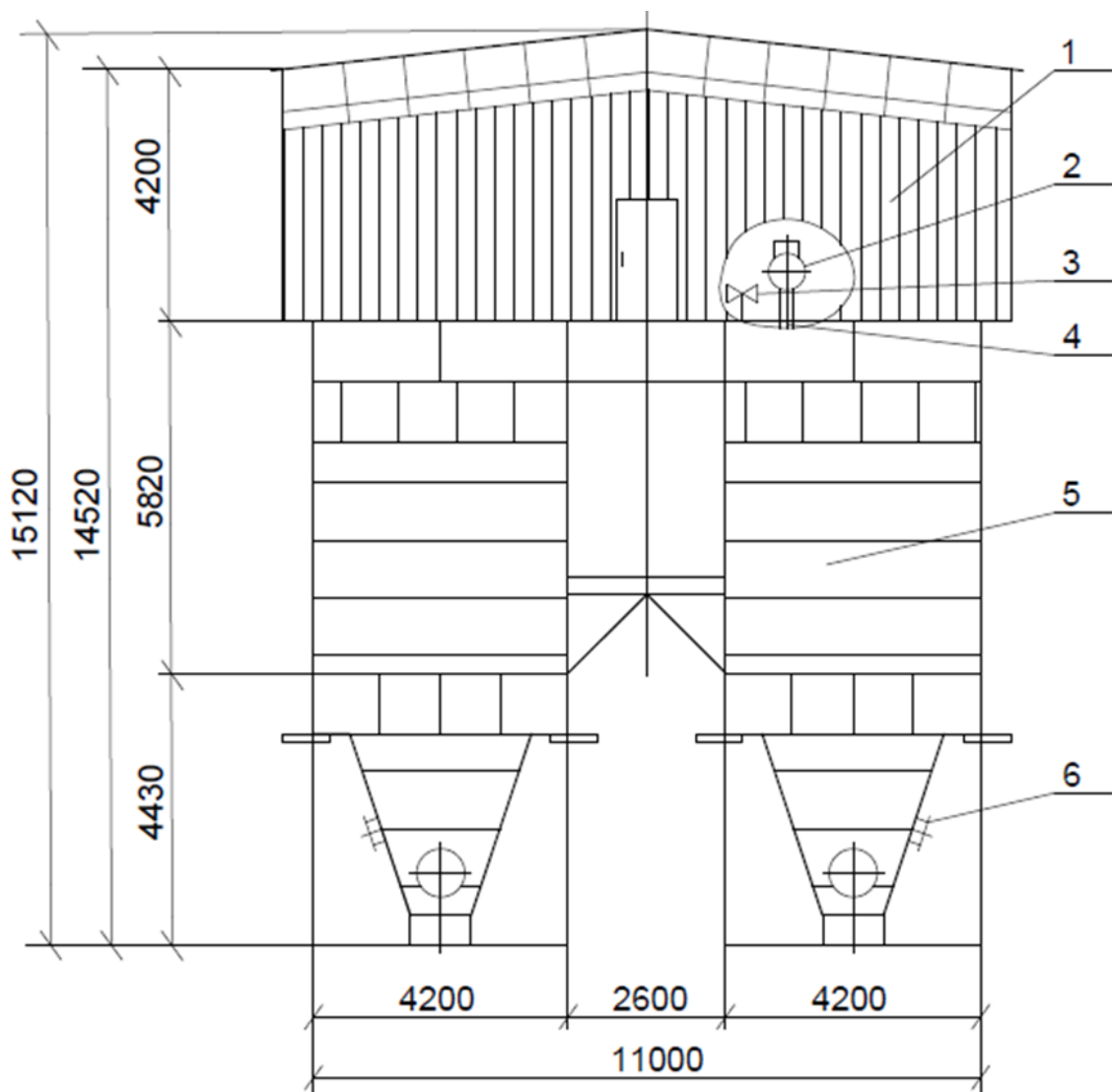


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд та конструктивна схема рукавного фільтра ФРІР-5000: 1 – шатер фільтра; 2 – ресивер стисненого повітря; 3 – відсічний клапан; 4 – камера чистого газу; 5 – корпус фільтра ; 6 – люк.

Відповідно до наведеної конструктивної схеми (рис. 2.1), апарат ФРІР-5000 являє собою модульну металоконструкцію, кожен елемент якої виконує специфічну технологічну функцію в процесі пиловловлення [13].

Для захисту виконавчих механізмів системи регенерації, соленоїдних вузлів та імпульсних труб від агресивного впливу навколишнього середовища, опадів та температурних коливань у верхній частині апарата змонтовано шатер фільтра (поз. 1), який являє собою полегшене захисне технологічне укриття з профільованого металу [13].

Головним вузлом акумуляції енергії для системи очищення тканинних елементів є ресивер стисненого повітря (поз. 2). Він виконує функцію судини під робочим тиском 0,4–0,6 МПа і забезпечує миттєву подачу необхідного об'єму стисненого повітря для ефективного струшування пилового шару з поверхонь рукавів [13].

Безпосереднє керування подачею пневматичних імпульсів здійснює швидкодіючий відсічний клапан (поз. 3). За сигналом мікропроцесорного контролера автоматизованої системи керування клапан миттєво відкривається, спрямовуючи короткий аеродинамічний удар через сопла у внутрішній простір фільтрувальних рукавів, що викликає відшарування накопиченого пилу [6–9, 13].

Газовий потік, який пройшов крізь пористу структуру рукавів із ламінованою ePTFE-мембраною і повністю звільнився від дрібнодисперсних частинок, збирається у камері чистого газу (поз. 4). Цей ізольований відсік розташований у верхній зоні апарата, звідки очищене повітря через вихідний колектор за допомогою димососів відводиться до димової труби [6–9].

Основним робочим простором та конструктивною основою всього апарата виступає корпус фільтра (поз. 5), який виконує роль камери запиленого газу. У цьому герметичному зварному об'ємі, виготовленому

з товстолистової сталі для стійкості до розрідження та абразивного зносу, вертикально підвішені самі фільтрувальні рукави і відбувається первинний розподіл пилового навантаження [1, 2, 6].

Проведення планово-попереджувальних ремонтів, візуального контролю стану рукавної дошки, а також заміна фільтрувальних елементів та очищення внутрішніх порожнин здійснюється через спеціальний герметичний люк (поз. 6), що забезпечує швидкий та безпечний доступ обслуговуючого персоналу до внутрішніх вузлів установки під час зупинок обладнання [9].

Конструктивно ФРІР-5000 являє собою великогабаритну прямокутну металоконструкцію, внутрішній простір якої розділено горизонтальними перегородками (рукавними дошками) на дві основні зони:

1) камера «брудного» (запиленого) газу – нижня частина корпусу, куди через вхідний колектор подається аспіраційне повітря. У цій зоні розміщуються фільтрувальні елементи (рукави) [13];

2) камера «чистого» газу – верхня частина корпусу, куди надходить повітря після проходження крізь пористу структуру фільтрувального матеріалу. Звідси очищений газ направляється до димососів і далі у вихідну димову трубу [13].

У нижній частині корпусу фільтра розташовані підвісні накопичувальні бункери пірамідальної форми (з кутом нахилу стінок не менше 60-70° для запобігання зависанню матеріалу) [13]. Вони слугують для збору пилу, що осипається з рукавів під час їх регенерації. Бункери обладнані шлюзовими живильниками та шнековими конвеєрами для герметичного вивантаження вловленого продукту.

Згідно з експлуатаційною документацією, проєктні та фактичні технологічні параметри рукавного фільтра ФРІР-5000 наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики рукавного фільтра ФРІР-5000

| Найменування параметра | Одиниці виміру | Проектне значення |
|---|---------------------|-----------------------|
| Номінальна продуктивність по очищуваному газу | м ³ /год | 450 000 |
| Загальна площа поверхні фільтрування | м ² | 5 000 |
| Максимальна температура очищуваного газу | °С | до 120 (робоча до 60) |
| Запиленість газу на вході у фільтр | г/нм ³ | 0,75 – 5,0 |
| Залишкова запиленість газу на виході | мг/нм ³ | не більше 20 |
| Аеродинамічний (гідрравлічний) опір апарата | Па | 2000 – 2500 |
| Робочий тиск стисненого повітря для регенерації | МПа | 0,4 – 0,6 |

Таким чином, рукавний фільтр ФРІР-5000 здатний виконувати функцію ефективного екологічного бар'єра [10, 13]. Забезпечення його стабільної роботи (підтримання опору в заданих межах та збереження цілісності фільтруючих рукавів) є критично важливою умовою для забезпечення належного режиму роботи обладнання вузла шихтоподачі доменного цеху.

2.2 Методика інженерних розрахунків та їх цифровізація

Розрахункова кількість повітря L (м³/год), яку необхідно безперервно відсмоктувати від технологічного укриття для створення

стійкого розрідження та запобігання вибиванню пилу в повітря робочої зони, розраховується виходячи з умов динамічного балансу потоків усередині обладнання [15]:

$$L = L_{\text{тех}} + L_{\text{надл}} \quad (2.1)$$

- де $L_{\text{тех}}$ – об'єм повітря, що інжектується (захоплюється) потоком матеріалу або витісняється ним під час завантаження бункерів, м³/год;
- $L_{\text{надл}}$ – додатковий об'єм повітря, який всмоктується через конструктивні нещільності та робочі отвори укриття під дією розрідження, що створюється димососом, м³/год.

Для бункерної естакади та вузлів пересипки сипучих матеріалів кількість інжектваного повітря визначається геометричними параметрами падаючого потоку матеріалу, його витратою та висотою падіння [15]:

$$L_{\text{тех}} = 3600 \cdot F_{\Pi} \cdot v_{\Pi} \quad (2.2)$$

- де F_{Π} – площа поперечного перерізу потоку сипучого матеріалу, м²;
- v_{Π} – швидкість руху матеріалу або захопленого ним супутнього повітряного потоку в точці входу укриття, м/с.

Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту проводиться за методом втрат тиску на тертя та місцеві опори. Метою розрахунку є визначення оптимальних діаметрів повітропроводів та сумарного

наявного напору, який повинні забезпечувати димососи ДН-26.

Діаметр повітропроводу круглого перерізу D (м) на розрахунковій ділянці обчислюється на основі відомої витрати повітря Q та рекомендованої швидкості руху газів v [15]:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{3600 \cdot \pi \cdot v}} \quad (2.3)$$

Швидкість руху повітря v у газоходах аспірації для транспортування важкого металургійного залізвмісного пилу (агломерат, кокс) обирається в межах 15–22 м/с [15]. Підтримання швидкості не нижче критичної є обов'язковою інженерною вимогою для запобігання седиментації (осадженню) частинок та утворенню завалів у трубопроводах.

Втрати тиску на ділянці повітропроводу ΔP (Па) складаються з лінійних втрат на тертя по довжині та втрат у місцевих опорах [15, 18]:

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_M = \left(\lambda \cdot \frac{l}{D} + \sum \xi \right) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2.4)$$

- де
- λ – коефіцієнт тертя по довжині повітропроводу;
 - l – довжина повітропроводу;
 - $\sum \xi$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів (відводи, трійники, хрестовини, звуження);
 - ρ – густина очищеного повітря за робочих умов, кг/м³;
 - v – середня швидкість потоку на ділянці, м/с.

Основним критерієм екологічної та технологічної ефективності тканинних апаратів є питома газове навантаження (швидкість фільтрації) q_f (м³/м²·хв) [15]. Розрахунок необхідної робочої площі

фільтрувальної поверхні F (м²) здійснюється за формулою [15]:

$$F = \frac{Q_p}{60 \cdot q_f \cdot k_1 \cdot k_2} \quad (2.5)$$

- де Q_p – робоча витрата запиленого газу, що надходить в апарат, м³/год;
- k_1 – коефіцієнт, що враховує частку рукавів, які одночасно відключаються та перебувають у режимі інтенсивної імпульсної регенерації (для ФРІР-5000 $k_1 \approx 0,90-0,95$);
- k_2 – коефіцієнт, що враховує динаміку зміни об'єму газу за рахунок неминучих підсосів атмосферного повітря через нещільності корпусу апарата та вивантажувальних пристроїв бункерів.

Загальний гідравлічний опір сформованого шару пилу на рукавах опирається на закон Дарсі для фільтрації через пористе середовище [15]:

$$\Delta P_\phi = R_0 \cdot \mu \cdot v_\phi + r \cdot \mu \cdot t \cdot v_\phi \quad (2.6)$$

- де R_0 – опір чистого фільтрувального матеріалу (поліефірного полотна);
- μ – динамічна в'язкість очищуваного газу, Па·с;
- v_ϕ – швидкість фільтрації газу крізь тканину, м/с;
- r – питомий опір сформованого рухомого шару пилу;
- t – маса відкладеного дисперсного пилу на одиницю площі рукава, кг/м²

Сучасний етап розвитку екологічного інжинірингу вимагає від

фахівців не лише глибокого розуміння природоохоронних технологій, але й навичок цифровізації (діджиталізації) розрахункових процесів. Математичне моделювання дозволяє багаторазово прискорити проектування газоочисного устаткування та уникнути помилок при виборі параметрів [18].

Для специфічних умов бункерної естакади ДП, де 86% пилу має розмір менше 1,3 мкм, застосування інерційних апаратів (циклонів) як єдиного або кінцевого ступеня очищення є технологічно недоцільним [1–2, 10]. Для досягнення європейського нормативу залишкової запиленості (менше 20 мг/м³) є доцільним використання сухого рукавного фільтра з імпульсною регенерацією (ФРІР-5000) [17].

Однак у загальній структурі металургійного виробництва (наприклад, на агломераційних фабриках, вузлах дроблення та сортування сировини) пилове навантаження на аспіраційні системи може сягати десятків грамів на кубічний метр. У таких випадках подача надзвичайно запиленого потоку безпосередньо на рукавний фільтр призводить до миттєвого «забивання» пор тканини, різкого зростання аеродинамічного опору та швидкого зносу фільтрувальних елементів.

Для вирішення цієї проблеми в промисловій екології застосовують двоступеневі схеми очищення, де першим ступенем (попереднім фільтром) виступають високопродуктивні циклони [1–3]. Вони беруть на себе основний удар крупнодисперсного та абразивного пилу, знижуючи навантаження на другий ступінь (рукавний фільтр) до прийнятних значень [6–9].

З метою автоматизації розрахунків інерційних пиловловлювачів та супутніх аеродинамічних параметрів газовідвідних мереж, у межах виконання даної кваліфікаційної роботи було розроблено та апробовано власне спеціалізоване веб-орієнтоване програмне забезпечення – CycloneEngine (див. додаток А).

Математичне ядро комплексу CycloneEngine базується на

фундаментальних рівняннях гідроаеромеханіки і дозволяє вирішувати наступний комплекс інженерних завдань[18]:

1) автоматизований розрахунок геометрії циклонів: визначення оптимальних габаритів апарата залежно від заданої витрати запиленого повітря та необхідної швидкості потоку у вхідному патрубку [1–3];

2) прогнозування ефективності (ККД): розрахунок фракційної та загальної ефективності вловлювання пилу на основі введених користувачем даних про дисперсний склад та густину частинок [1–3];

3) аеродинамічний розрахунок: визначення втрат тиску (гідрравлічного опору) в апараті, що є критично важливим для правильного підбору тягодуттєвого обладнання (димососів) [15, 18].

За допомогою розробленого спеціалізованого програмного комплексу CycloneEngine розраховано параметри попереднього ступеня очищення та втрати тиску на ділянці довжиною 45 метрів з урахуванням усіх місцевих опорів (трійника, відводів під 90° та конфузора), а також підтверджено аеродинамічну спроможність наявних тягодуттєвих машин (димососів ДН-26).

Інтеграція логіки роботи CycloneEngine у загальний процес екологічного проєктування дозволяє оперативно оцінити доцільність встановлення циклонів як попереднього ступеня очищення перед рукавними фільтрами. Крім того, базові алгоритми розрахунку швидкостей потоку та втрат тиску, закладені в програмний код CycloneEngine, є універсальними і були частково адаптовані для ручної перевірки аеродинаміки мережі існуючої установки ФРІР-5000 [18].

Таким чином, розробка та використання інструментарію CycloneEngine демонструє комплексний підхід до вирішення екологічних проблем металургії, поєднуючи класичні інженерні розрахунки із сучасними ІТ-технологіями.

2.3 Основи безперервного моніторингу дисперсних середовищ методом індуктивної електризації

Сучасні індустриальні екосистеми (теплоенергетика, металургія, цементна та хімічна промисловість) функціонують в умовах надзвичайно жорстких екологічних нормативів. Контроль за викидами твердих дисперсних частинок трансформувався в системи безперервного моніторингу (CEMS), що є критично важливими для екологічного комплаєнсу, управління пневмотранспортом та предиктивного обслуговування газоочисного обладнання [14].

Історично першим еталонним методом вимірювання був гравіметричний аналіз, заснований на фізичному відборі (аспірації) зразка газу через фільтр та його зважуванні [20]. Хоча він має найвищу точність, цей метод є екстрактивним, повільним та не здатний надавати дані про раптові аварійні викиди (наприклад, розрив рукавного фільтра) в режимі реального часу. Це зумовило тимчасове домінування оптичних систем *in-situ* (нефелометрія та трансмісометрія). Однак багаторічна експлуатація виявила їхню фундаментальну вразливість – критичну залежність від чистоти лінз. Навіть досконалі системи захисту не рятують оптику від забруднення, що призводить до неконтрольованого дрейфу показників [20].

Революційним зрушенням стало впровадження трибоелектричної технології та її еволюційного продовження – індуктивної електризації. Ці прилади перетворюють механічну взаємодію рухомих частинок із суцільнометалевим зондом на прецизійний електричний сигнал. Відсутність рухомих частин, нечутливість до забруднення зонда та здатність фіксувати наднизькі концентрації (до 0,01 мг/м³) зробили цю технологію новим золотим стандартом [14].

Трибоелектричний ефект (контактна електризація) – це складний феномен перенесення електричного заряду між об'єктами під час їх

фізичного контакту чи тертя. Його рушійною силою є різниця в електронній структурі та термодинамічних потенціалах взаємодіючих матеріалів (дисперсних частинок та сталевго зонда) [12].

Квантове тунелювання переважно домінуючий механізм перенесення заряду. Електронний трансфер, зумовлений різницею робіт виходу електронів. Робота виходу – це енергія, необхідна для переміщення електрона з рівня Фермі всередині твердого тіла у вакуум. Коли частинка наближається до зонда на міжатомну відстань, квантові ефекти ініціюють тунелювання електронів крізь потенціальний бар'єр. Електрони переміщуються від матеріалу з меншою роботою виходу (вищим рівнем Фермі) до матеріалу з більшою, поки їх хімічні потенціали не зрівняються. Цей процес моделюється як кулонівська взаємодія на межі розділу фаз, яка після відскоку частинки залишає результуючий макроскопічний заряд.

Термодинамічна незворотність та механічне тертя під час зіткнення у високошвидкісному потоці (4-30 м/с) є незворотним термодинамічним процесом. Кінетична енергія частинки розсіюється через пластичні деформації, збудження фононів (теплових коливань) та збудження електронної підсистеми. Саме ця дисипація енергії дозволяє трибоелектричному ефекту генерувати стійку електрорушійну силу та безперервний мікрострум, долаючи енергетичні бар'єри.

Мікропроцесорні алгоритми сучасних пілометрів базуються на математичному моделюванні процесів на атомарному рівні. Обмін зарядом Δq визначається різницею поверхневих трибоелектричних потенціалів Δf . Цей процес самообмежується кулонівським відштовхуванням, коли частинка накопичує достатній заряд.

Для атомістичного моделювання використовують динамічні рівняння, що враховують незв'язані взаємодії, які розраховуються як сума енергії Ван-дер-Ваальса, класичної електростатики та потенціалу зануреного атома (EAM) для металевих систем [18]. Енергія Ван-дер-

Ваальса описується через потенціал Леннарда-Джонса, де глибина потенціальної ями ϵLJ унікальна для кожного елемента (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Аналіз методів вимірювання заряду: контактний vs індуктивний [18]

| Хімічний елемент | Глибина потенціальної ями ϵLJ (ккал/моль) | Ефективний атомний заряд (електронні одиниці) |
|------------------|---|---|
| Кремній (Si) | 0.4690 | 0 |
| Алюміній (Al) | 0.5050 | +0.32 |
| Кисень (O) | 0.1553 | -0.8476 |
| Хлор (Cl) | 0.3825 | -1.00 |

Такі квантово-хімічні відмінності пояснюють, чому датчики генерують різний сигнал для однакової маси пилу різного складу (наприклад, силікатного та вугільного), що зумовлює потребу в індивідуальному калібруванні [14].

Перші трибоелектричні пиломіри аналізували виключно постійну складову (DC) мікроструму, генерованого під час фізичних зіткнень частинок зі сталевим зондом, ізольованим шаром PTFE або PEEK. Мільйони зіткнень формували струм, прямо пропорційний масі пилу.

Проте метод DC мав критичні недоліки.

Сенсорний дрейф через забруднення. Вологий або адгезійний пил формує на зонді бар'єр, який блокує перенесення електронів, катастрофічно занижуючи показники і вимагаючи регулярного ручного очищення.

Залежність від швидкості потоку. Зміна швидкості газу впливає на кінетичну енергію зіткнення і, відповідно, на згенерований заряд.

Обмежена зона вимірювання. Зонд фіксує лише ті частинки, що фізично вдаряються об його лобову проекцію.

Для подолання цих перешкод була розроблена технологія

індуктивної електризації (IET), яка аналізує змінну складову (AC) електростатичного поля. Метод спирається на те, що пил набуває статичного заряду ще до наближення до датчика [14].

Коли заряджена частинка пролітає повз зонд, її електростатичне поле індукує змінний "дзеркальний заряд" на його поверхні. Наближення частинки притягує електрони в один бік зонда, а віддалення – у зворотний, створюючи мікрострум AC без прямого контакту [14].

Метод AC надає репрезентативну картину розподілу пилу, оскільки аналізує велику зону навколо зонда. Сучасні прилади преміум-класу застосовують цифрові алгоритми Фур'є-перетворення для виділення чистого сигналу (табл. 2.3) [18].

Таблиця 2.3 – Порівняльна характеристика методів електризації частинок: контактна трибоелектрика (DC) та індуктивна електризація (AC)

| Параметр порівняння | Контактна трибоелектрика (DC) | Індуктивна електризація (AC) |
|---------------------|--|--|
| Фізичний механізм | Прямий обмін електронами (робота виходу) | Наведення дзеркального заряду електростатичним полем |
| Зона вимірювання | Лобова проекція зонда (10-20 мм) | Радіальна зона до 30-45 см навколо зонда |
| Вплив забруднення | Критичний (ізоляція викликає дрейф) | Мінімальний (поле проходить крізь шар пилу) |
| Чутливість | Низька (потребує великої маси) | Надвисока (від 0.01 мг/м ³) |

Глибокий аналіз фізико-хімічних механізмів, математичних моделей та апаратних рішень свідчить про те, що перехід промислового екологічного моніторингу на технології індуктивної електризації є безальтернативним еволюційним кроком. Фундаментальні обмеження класичної оптики (залежність від чистоти лінз) та застарілого методу постійного струму (DC) роблять їх ненадійними в умовах сучасних суворих екологічних нормативів. Натомість, електродинамічні пиломіри змінного струму (AC) використовують фундаментальні закони

квантового перенесення заряду та макроскопічної електростатичної індукції, забезпечуючи феноменальну чутливість, стійкість до забруднень та надійність в агресивних умовах промислової експлуатації [14].

2.4 Визначення базових технологічних параметрів рукавного фільтра ФРІР-5000

Основою для забезпечення нормативної екологічної обстановки на вузлі шихтоподачі ДП є безперебійна та ефективна робота рукавного фільтра ФРІР-5000. Для перевірки проектних показників та оцінки реального експлуатаційного навантаження на апарат виконано базовий технологічний розрахунок його параметрів згідно з методикою, наведеною в підрозділі 2.2 [15].

Вихідні дані для розрахунку (за матеріалами технологічної інструкції):

- максимальна продуктивність аспіраційної системи (витрата запиленого повітря): $Q = 450\,000 \text{ м}^3/\text{год.}$;

- запиленість газу на вході у фільтр (максимальна): $C_{вух} = 940 \text{ мг/м}^3$;

- нормативна залишкова запиленість на виході: $C_{вих} = 20 \text{ мг/м}^3$.

Розрахунок робочої площі фільтрування та компонування рукавів здійснюється за формулою (2.5) [15].

Для поліефірних голкопробивних матеріалів в умовах доменного виробництва приймається $q_f = 1,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{хв}$) [15].

З урахуванням коефіцієнтів регенерації ($k_1 = 0,95$) та підсосів повітря ($k_2 = 1,05$), розрахункова площа становить:

$$F = \frac{450000}{60 \cdot 1,5 \cdot 0,95 \cdot 1,05} = 5012,5 \text{ м}^2.$$

Отримане значення підтверджує раціональність вибору апарата ФРІР-5000 із номінальною робочою площею 5000 м².

Апарат має секційну будову для забезпечення можливості покрокової регенерації. Теоретична кількість фільтрувальних рукавів в одній секції, розрахована через площу поверхні одного циліндричного елемента, становила 179,19 штук. З метою забезпечення симетрії кріплень на рукавній дошці та рівномірності розподілу аеродинамічних навантажень під час подачі імпульсу стисненого повітря, до остаточного розрахунку приймається 180 рукавів на одну робочу секцію.

Фактичний коефіцієнт корисної дії (ККД) рукавного фільтра за масою вловленого пилу розраховується як відношення різниці вхідної та вихідної концентрацій до вхідної [15]:

$$\eta = \frac{C_{\text{ВХ}} - C_{\text{ВИХ}}}{C_{\text{ВХ}}} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

- де η – ефективність процесу, %;
- $C_{\text{ВХ}}$ – концентрація речовини на вході (до очищення, фільтрації, апарата тощо);
- $C_{\text{ВИХ}}$ – концентрація речовини на виході (після очищення).

$$\eta = \frac{940 - 20}{940} \cdot 100\% = 97,87\%$$

Даний показник свідчить про високу технологічну надійність обраної НДТМ [17].

Для оцінки ефективності системи рециклінгу та розрахунку навантаження на систему вивантаження (шнеки та шлюзові живильники) необхідно визначити кількість пилу, що безперервно вловлюється апаратом.

Маса пилу G (в кілограмах), що осідає в бункерах фільтра за одну робочу добу (24 години), обчислюється за формулою [15]:

$$G = Q \cdot (C_{\text{вх}} - C_{\text{вих}}) \cdot 24 \cdot 10^{-6}, \quad (2.8)$$

$$G = 450000 \cdot (940 - 20) \cdot 24 \cdot 10^{-6} = 9936 \text{ кг/добу.}$$

Отримані результати демонструють, що система аспірації вузла шихтоподачі дозволяє щоденно локалізувати майже 10 тонн залізовмісного пилу. Цей обсяг вимагає суворого дотримання регламенту імпульсної регенерації для запобігання переповненню бункерів та блокуванню нижніх частин фільтрувальних рукавів.

Згідно з методикою розрахунку тканинних фільтрів (за Ю.О. Гічовим) [15], загальний гідравлічний опір апарата в процесі експлуатації не є сталою величиною. Він складається з постійного опору чистої тканини та змінного опору шару пилу, що безперервно зростає до моменту регенерації.

Загальний перепад тиску ΔP_{ϕ} (Па) визначається за рівнянням Дарсі [15]:

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_T + \Delta P_{\text{ш}} - R_T \cdot \mu \cdot v_{\phi} + R_{\text{ш}} \cdot \mu \cdot m \cdot v_{\phi} \quad (2.9)$$

- де ΔP_T – втрати тиску при проходженні газу через чистий поліефірний матеріал, Па;
- $\Delta P_{\text{ш}}$ – втрати тиску в шарі вловленого пилу, Па;
- R_T – питомий аеродинамічний опір чистої тканини, м^{-1} ;
- $R_{\text{ш}}$ – питомий опір шару пилу (для дрібного залізовмісного пилу естакади приймається $R_{\text{ш}} \approx 2 \cdot 10^{10}$ м/кг;
- μ – динамічна в'язкість очищеного повітря при робочій

температурі 40-60 °С (приймається $\mu = 19,5 \cdot 10^{-6}$ Па·с);

- v_{ϕ} – фактична швидкість фільтрації, м/с ($v_{\phi} = 0,025$ м/с);
 m – поверхнева густина пилу на тканині (пилоємність), кг/м².

При досягненні критичної маси пилу на рукавах, опір фільтра зростає до свого максимального проєктного значення (для ФРІР-5000 це $\Delta P_{max} = 2500$ Па) [13]. Саме цей показник фіксується датчиками САУ АУ для автоматичного запуску циклу імпульсної продувки.

Важливим експлуатаційним параметром є час T (хв), за який опір фільтра досягає максимального значення 2500 Па. Це визначає частоту спрацьовування електромагнітних клапанів стисненого повітря.

Згідно з теоретичними основами пиловловлення, поверхнева густина пилу m , що накопичується за час T , дорівнює [15]:

$$m = C_{\text{вх}} \cdot v_{\phi} \cdot T \quad (2.10)$$

де $C_{\text{вх}}$ - концентрація пилу на вході, кг/м³ (0,00094 кг/м³).

Підставляючи це значення у формулу загального опору та нехтуючи опором чистої тканини ($\Delta P_m \ll \Delta P_w$), отримуємо вираз для розрахунку часу циклу:

$$T = \frac{\Delta P_{max}}{\dot{R}_w \cdot \mu \cdot C_{\text{вх}} \cdot v_{\phi}^2} \quad (2.11)$$

$$T = \frac{2500}{2 \cdot 10^{10} \cdot 19,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,00094 \cdot (0,025)^2} \approx 10900 \text{ секунд} \approx 3 \text{ години}$$

Проведений математичний аналіз показує, що при максимальному пиловому навантаженні ($0,94 \text{ г/нм}^3$) і швидкості фільтрації $0,025 \text{ м/с}$, критичний опір у 2500 Па досягається приблизно за 3 години безперервної роботи секції. Це обґрунтовує необхідність використання автоматичної системи управління (САУ АУ), яка постійно сканує перепад тиску та циклічно відключає секції на імпульсну продувку, не допускаючи «захлинання» фільтра [13, 15].

2.5 Розрахунок аеродинамічних параметрів газовідвідного тракту та оцінка навантажень

Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту є ключовим етапом перевірки експлуатаційної надійності аспіраційної установки [15, 18]. Метою розрахунку є визначення втрат тиску в повітропроводах при транспортуванні запиленого повітря та перевірка відповідності параметрів встановлених димососів ДН-26 сумарному гідравлічному опору системи.

Розрахунок проведено для характерної ділянки магістрального колектора аспіраційної системи вузла шихтоподачі ДП за максимального технологічного навантаження.

Вихідні дані для розрахунку магістралі:

- сумарна витрата повітря на ділянці: $Q = 450\,000 \text{ м}^3/\text{год} = 125 \text{ м}^3/\text{с}$;
- рекомендована швидкість руху газу для запобігання седиментації важкого залізовмісного пилу: $v = 18 \text{ м/с}$ [15];
- густина очищеного повітря за робочих умов ($T \approx 50^\circ\text{C}$): $\rho = 1,1 \text{ кг/м}^3$ [15];

Розрахунковий діаметр магістрального колектора D_m (м) визначається за формулою [15]:

$$D_M = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} \quad (2.12)$$

Підставляємо значення:

$$D_M = \sqrt{\frac{4 \cdot 125}{3,14 \cdot 18}} = \sqrt{\frac{500}{56,52}} = \sqrt{8,846} \approx 2,97 \text{ м.}$$

Відповідно до стандартизованого ряду повітропроводів та проєктних рішень на металургійному комбінаті, приймаємо номінальний діаметр магістрального колектора $D = 3000 \text{ мм} = 3,0 \text{ м}$.

Лінійні втрати тиску на тертя ΔP_T (Па) для ділянки магістрального колектора довжиною $l = 45 \text{ м}$ обчислюються за формулою [15, 18] :

$$\Delta P_T = \lambda \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2.13)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя для сталевих промислових газоходів (приймається $\lambda = 0,02$).

Підставляємо вихідні дані:

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot \frac{45}{3} \cdot \frac{1,1 \cdot 18^2}{2} = 0,3 \cdot 178,2 = 53,46 \text{ Па.}$$

Тобто лінійні втрати тиску на тертя становлять: $\Delta P_T \approx 53,46 \text{ Па}$ [15]. Розрахункова ділянка магістралі включає ряд конструктивних елементів, які позначені з відповідними місцевими опорами на рис. 2.2 (згідно зі схемою трасування):

- 1) два відводи під кутом 90° ($\xi^1 = 0,3 \cdot 2 = 0,6$);
- 2) один трійник на злиття потоків аспіраційних відгалужень ($\xi^2 =$

=0,4);

3) один конфузорний перехід перед вхідним патрубком рукавного фільтра ($\xi^3 = 0,15$).

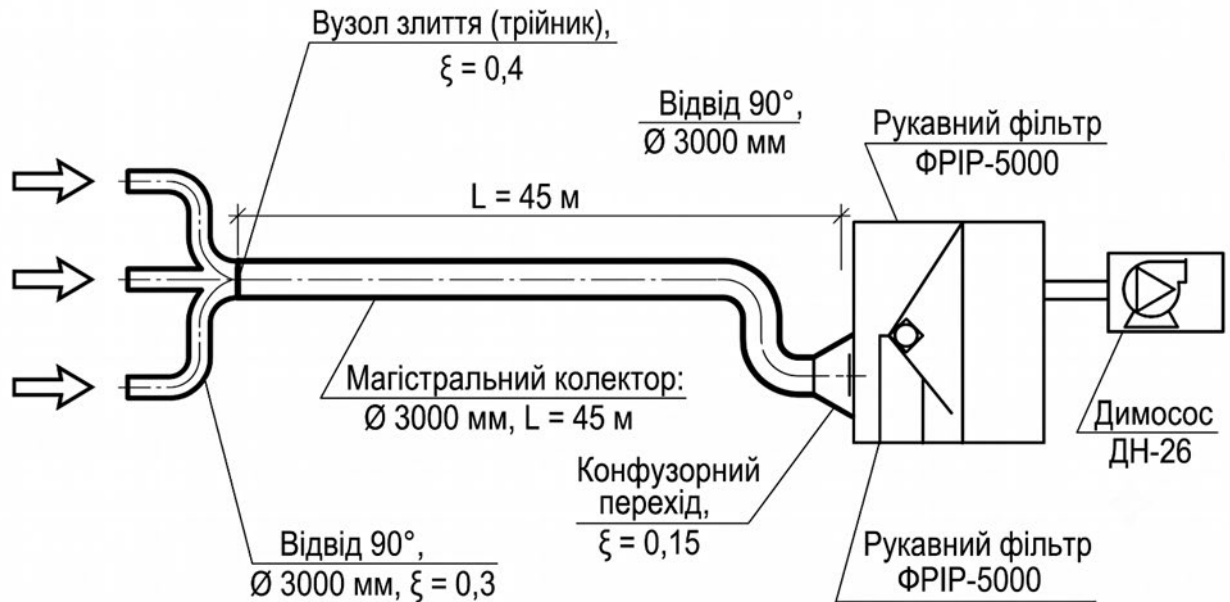


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема магістрального газовідводного тракту

Сумарний коефіцієнт місцевих опорів становить:

$$\sum \xi = 0,6 + 0,4 + 0,15 = 1,15$$

Втрати тиску в місцевих опорах ΔP_M (Па) визначаються за формулою [15]:

$$\Delta P_M = \sum \xi \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2.14)$$

$$\Delta P_M = 1,15 \cdot \frac{11 \cdot 18^2}{2} = 1,15 \cdot 178,2 = 204,93 \text{ Па}$$

Сумарні втрати тиску в усьому газовідвідному тракті $\Delta P_{\text{сум}}$ (Па) складаються з лінійних втрат, втрат у місцевих опорах та максимального аеродинамічного опору забрудненого рукавного фільтра ФРІР-5000 перед початком регенерації ($\Delta P_{\text{ф}} = 2500$ Па) [15, 18]:

$$\Delta P_{\text{сум}} = \Delta P_{\text{Т}} + \Delta P_{\text{М}} + \Delta P_{\text{ф}} = 53,46 + 204,93 + 2500 = 2758,39 \text{ Па}$$

Необхідний повний напір H (Па), який повинен розвивати тягодуттвовий апарат з урахуванням 10% інженерного запасу надійності, становить:

$$H = 1,1 \cdot \Delta P_{\text{сум}} = 1,1 \cdot 2758,39 = 3034,23 \text{ Па.}$$

Проведені розрахунки показують, що максимально необхідний напір для подолання опору системи аспірації вузла шихтоподачі становить 3 034,23 Па. Згідно з технічними паспортами, встановлені на об'єкті відцентрові димососи ДН-26 забезпечують номінальний напір до 3600 Па за заданої продуктивності. Таким чином, наявна потужність тягодуттвового обладнання є повністю достатньою, що гарантує стабільне утримання необхідного розрідження в локальних укриттях бункерної естакади навіть за максимального пилового навантаження та передпікового забруднення тканинних рукавів.

2.6 Вдосконалення системи моніторингу та інструментального контролю залишкової запиленості

Однією з ключових вимог сучасних екологічних стандартів та європейських директив щодо НДТМ є перехід від періодичного лабораторного контролю викидів до безперервного автоматизованого

інструментального моніторингу [17]. Для вузла шихтоподачі ДП, де обсяги очищеного повітря сягають 450 тис. м³/год, надійність роботи газоочисної установки є критичним фактором екологічної безпеки [17].

Основним вразливим елементом будь-якого рукавного фільтра, включно з ФРІР-5000, є фільтрувальне поліефірне полотно [6–9, 13]. Під дією абразивного залізовмісного пилу, частих пневматичних ударів під час імпульсної регенерації та температурних коливань можливий локальний розрив рукава або порушення герметичності його кріплення в рукавній дошці. У такому випадку запилений газ починає надходити безпосередньо в камеру «чистого» газу і викидатися в атмосферу, багаторазово перевищуючи норматив у 20 мг/м³ [17].

Для миттєвого виявлення таких позаштатних ситуацій та інтеграції газоочистки в єдину Автоматизовану систему контролю викидів (АСКВ) ПАТ «Запоріжсталь», проектом вдосконалення передбачено використання стаціонарного пиломіра типу ПИК П-Т (або його сучасних трибоелектричних аналогів) [14].

Вимірювальний зонд пиломіра встановлюється на прямолінійній ділянці вихідної димової труби (після димососів ДН-26), де потік газу є найбільш стабілізованим. Принцип дії таких приладів базується на трибоелектричному ефекті – вимірюванні мікрострумів, що виникають при терті твердих дисперсних частинок пилу об металевий стрижень (сенсор) датчика, поміщений у газовий потік [12]. Величина згенерованого електричного заряду є прямо пропорційною масовій концентрації пилу в потоці [14].

Перевагою трибоелектричних пиломірів є їхня надзвичайна чутливість саме до дрібнодисперсного пилу (від 0,1 мкм), що ідеально відповідає фізико-хімічним характеристикам викидів бункерної естакади [10, 14].

Дані від пиломіра у вигляді уніфікованого аналогового сигналу (4-20 мА) безперервно передаються на програмований логічний контролер

(ПЛК) системи САУ АУ. Розроблений алгоритм моніторингу передбачає розподіл концентрацій на три сигнальні зони:

- 1) зона нормальної експлуатації (зелена): від 0 до 10 мг/нм³. Фільтр працює в штатному режимі, цілісність рукавів не порушена;
- 2) зона попередження (жовта): від 11 до 20 мг/нм³. Залишковий вміст пилу наближається до гранично допустимого нормативу. ПЛК видає попереджувальний сигнал оператору на мнемосхему. Це може свідчити про поступове «старіння» фільтрувального матеріалу або недостатню ефективність циклу імпульсної регенерації (наприклад, падіння тиску в ресиверах стисненого повітря);
- 3) аварійна зона (червона): понад 20 мг/нм³. Система фіксує перевищення нормативу, що є прямим індикатором розриву рукава. САУ АУ генерує звукову та світлову сигналізацію, а також ініціює алгоритм пошуку пошкодженої секції.

Впровадження пилoměра у зв'язці з САУ АУ дозволяє реалізувати функцію «розумної діагностики» [14]. Оскільки фільтр ФРІР-5000 розділений на ізольовані секції, контролер по черзі аналізує піки концентрації пилу, синхронізуючи їх із графіком продувки кожної секції. Якщо стрибок концентрації на виході чітко збігається з моментом подачі імпульсу стисненого повітря в певну секцію, система автоматично ідентифікує її як аварійну.

У цьому випадку САУ АУ автоматично закриває пневматичні відсічні клапани (шибери) на вході та виході пошкодженої секції, повністю виводячи її з процесу газоочищення. Аспіраційна система продовжує працювати на решті секцій, забезпечуючи безперебійну роботу вузла шихтоподачі та виключаючи наднормативні викиди в атмосферу до моменту заміни рукава ремонтним персоналом [14, 17].

2.7 Екологічний ефект від впровадження системи окомкування (рециклінгу) вловленого пилу

Забезпечення стабільної роботи пилогазоочисної установки вузла шихтоподачі ДП на базі рукавного фільтра ФРІР-5000 вирішує першочергове екологічне завдання – зниження концентрації твердих суспендованих частинок у викидах до нормативного рівня (менше 20 мг/м³) [17]. Однак, згідно з принципами Найкращих доступних технологій та методів управління (НДТМ), процес очищення газів не може вважатися завершеним, якщо вловлений продукт перетворюється на відходи, що потребують захоронення, або стає джерелом вторинного забруднення [17].

Як було розраховано у підрозділі 2.5, система аспірації щодоби локалізує близько 10 тонн дрібнодисперсного пилу. Враховуючи його фізичні властивості (86% часток мають розмір менше 1,3 мкм) [10], сухе вивантаження такого матеріалу у відкриті залізничні вагони або на автотранспорт неминуче призведе до інтенсивного вторинного пилоутворення під дією вітрового навантаження.

Для усунення ризиків вторинного забруднення атмосферного повітря промислового майданчика, технологічною схемою передбачено обов'язковий етап кондиціювання (окомкування) вловленого пилу перед його транспортуванням.

Пил, що осідає в бункерах рукавного фільтра після імпульсної регенерації, за допомогою системи шлюзових живильників та герметичних шнекових конвеєрів безперервно подається до барабанного зволожувача (окомкувача). У робочій камері апарата сухий пил інтенсивно перемішується з технічною водою, яка подається через систему форсунок.

Завдяки обертанню барабана та фізико-хімічним властивостям пилу (висока гідрофільність та здатність до агрегації), відбувається

процес грануляції – утворення вологих міцних окатишів (гранул) діаметром 5–15 мм із середньою вологістю 10–12% [19]. У такому стані матеріал повністю втрачає здатність до пиління і може безпечно відвантажуватися у відкриті напіввагони для подальшого транспортування.

Впровадження системи рециклінгу має не лише екологічний, але й виражений ресурсозберігаючий та економічний ефект. За результатами хімічного аналізу, пил бункерної естакади доменного цеху містить близько 58,1% заліза (Fe), що робить його надзвичайно цінною вторинною сировиною [19].

Повернення 10 тонн згранульованого пилу на добу у виробничий цикл (як добавки до шихти на агломераційній фабриці) дозволяє реалізувати наступні переваги:

1) збереження природних ресурсів: щоденно економиться близько 5,8 тонн чистого заліза, що знижує потребу у видобутку та транспортуванні первинної залізної руди [19];

2) зниження екологічного податку: завдяки повній утилізації пилу всередині підприємства, він не переходить у категорію відходів, що звільняє комбінат від сплати значних сум екологічного податку за розміщення промислових відходів на шлаконакопичувачах;

3) замикання матеріального балансу: підприємство на практиці реалізує модель економіки замкнутого циклу (Circular Economy), яка є базовим вектором європейської екологічної політики у металургійній галузі [19].

Таким чином, утилізація вловленого залізовмісного пилу безпосередньо на комбінаті підтверджує ефективність обраних інженерних рішень. Це дозволяє перетворити екологічну проблему на економічну перевагу, знижуючи загальну собівартість кінцевої продукції та забезпечуючи сталий розвиток підприємства в умовах жорстких екологічних обмежень.

Висновки за розділом 2

Комплексний аналіз та проведені інженерні розрахунки підтверджують, що експлуатація рукавного фільтра ФРІР-5000 у поєднанні із системою автоматизованого моніторингу (АСКВ) та вузлом окомкування пилу забезпечує високий рівень екологічної безпеки на бункерній естакаді ДП [14, 17]. Використання розробленого програмного забезпечення CycloneEngine дозволяє оперативно моделювати аеродинамічні параметри системи та оптимізувати роботу тягодуттєвого обладнання, гарантуючи надійне уловлювання та безперебійний рециклінг залізовмісної сировини.

Проведено комплекс технологічних розрахунків газоочисної установки, на основі яких визначено оптимальні конструктивні параметри апарата ФРІР-5000. Встановлено, що для забезпечення нормативного очищення запиленого повітря об'ємом 450 000 м³/год необхідна площа фільтрації становить 5000 м², а очікувана маса вловленого продукту досягає 9 936 кг на добу при проєктному ККД установки 97,87%.

Виконано розрахунок геометричних розмірів газовідвідного тракту, за результатами якого обґрунтовано вибір номінального діаметра магістрального колектора на рівні 3000 мм, що забезпечує стабільну швидкість потоку 18 м/с та запобігає гравітаційному осадженню пилу в повітропроводах.

Обґрунтовано доцільність двоступеневої схеми пиловловлювання для захисту тканинних фільтрів від великих абразивних частинок коксу та агломерату. За допомогою розробленого спеціалізованого програмного забезпечення CycloneEngine змодельовано параметри першого (попереднього) ступеня очищення та розраховано сумарний гідравлічний опір системи на ділянці довжиною 45 метрів, що дозволило

підтвердити аеродинамічну спроможність наявних тягодуттєвих машин (димососів ДН-26).

Обґрунтовано та запропоновано структуру автоматизованої системи контролю викидів (АСКВ) на базі електродинамічного методу безконтактної індукції дисперсних середовищ. Інтеграція прецизійних пилососів змінного струму дозволяє здійснювати безперервний предиктивний моніторинг залишкової запиленості (на рівні $<10 \text{ мг/м}^3$) без ризику хибних показань через забруднення вимірювального зонда залізовмісним пилом.

З метою реалізації принципів економіки замкненого циклу та ліквідації вторинного пилоутворення запропоновано технологічну схему безвідходної утилізації вловленого матеріалу шляхом його кондиціювання та грануляції в барабанних зволожувачах. Це дозволяє безпечно повертати близько 10 тонн цінної сировини на добу в металургійний переділ аглофабрики.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Ідентифікація небезпек та оцінка професійних ризиків

Під час експлуатації та технічного обслуговування системи очищення газів (рукавного фільтра) на працівників можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Проведена ідентифікація основних джерел небезпеки та оцінка рівня ризику дозволяє визначити необхідні заходи щодо їх мінімізації [22, 26].

Вузол шихтоподачі доменного цеху є джерелом інтенсивного виділення пилу, який утворюється при транспортуванні, пересипанні та дозуванні шихтових матеріалів (агломерат, окатки, кокс) [21].

Це створює підвищену небезпеку для персоналу та потребує впровадження ефективних систем аспірації та заходів охорони праці [22, 26].

Таблиця 3.1 – Ідентифікація небезпек та заходи контролю

| Джерело небезпеки | Потенційна шкода | Рівень ризику | Заходи запобігання |
|---|--|---------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Пил шихтових матеріалів | Професійні захворювання (пневмокониоз, бронхіти), зниження видимості | Високий | Використання респіраторів FFP3, герметизація вузлів пересипки, ефективна аспірація |
| Стиснене повітря (системи регенерації фільтрів) | Травми, шум, пошкодження обладнання, вибух ресивера | Високий | Контроль тиску, запобіжні клапани, система LOTO |

Продовження таблиці 3.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------|--|-----------|--|
| Пилові викиди | Захворювання органів дихання (силікоз, астма), утворення вибухонебезпечних сумішей | Високий | Використання респіраторів (FFP3), герметизація системи, застосування вибухозахищеного обладнання |
| Робота на висоті | Падіння з висоти при обслуговуванні обладнання | Високий | Використання страхувальних систем, справні майданчики та огороження |
| Замкнуті простори | Отруєння, задуха, ризик падіння всередину обладнання | Критичний | Оформлення наряду-допуску, газоаналіз, вентиляція, наявність спостерігача |
| Рухомі механічні частини | Травми рук, защемлення | Середній | Використання захисних кожухів, блокування механізмів, навчання персоналу |

3.2 Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці

Для зниження рівня професійних ризиків повинні впроваджуватися організаційні та технічні заходи безпеки.

Для забезпечення безпечної експлуатації системи аспірації необхідно:

- забезпечити герметизацію джерел пилоутворення [22];
- застосовувати рукавні фільтри з автоматичною системою регенерації;
- встановлювати вибухорозрядні панелі [12];
- забезпечувати заземлення обладнання для зняття статичного заряду [12];

- контролювати параметри роботи системи (тиск, витрати повітря) відповідно до норм [23].

До організаційних заходів належать:

- проведення інструктажів з охорони праці [26];
- допуск до робіт підвищеної небезпеки за нарядом;
- навчання персоналу правилам безпечної експлуатації;
- контроль за використанням засобів індивідуального захисту [22].

Процедура LOTO (Lockout/Tagout) [22]. Перед виконанням ремонтних робіт:

- відключається електроживлення;
- перекривається подача стисненого повітря [23];
- виконується скидання залишкового тиску;
- встановлюються замки та попереджувальні таблички.

3.3 Вимоги безпеки під час виконання робіт

Під час обслуговування аспіраційних систем необхідно:

Перед початком робіт:

- перевірити відключення обладнання;
- переконатися у відсутності тиску в ресиверах [23];
- перевірити стан доступу (сходи, майданчики) [25].

Під час виконання робіт:

- використовувати ЗІЗ (респіратори, окуляри, каски, протишумові вкладиші) [22, 24];
- застосовувати страхувальні системи при роботі на висоті [22, 25];
- контролювати концентрацію пилу [21].

При роботі у замкнутих просторах:

- проводити газоаналіз;
- забезпечити вентиляцію;
- організувати постійний нагляд [22].

3.4 Заходи безпеки після завершення робіт

Після закінчення робіт необхідно:

- перевірити відсутність сторонніх предметів у системі;
- забезпечити герметичність усіх вузлів;
- зняти блокування LOTO;
- виконати пробний запуск обладнання.

Забезпечення безпеки під час експлуатації систем очищення газів базується на комплексному підході, що включає ідентифікацію небезпек, оцінку ризиків та впровадження ефективних заходів контролю [21, 22, 26]. Дотримання вимог охорони праці дозволяє мінімізувати виробничі ризики та забезпечити безпечні умови праці персоналу.

Висновки за розділом 3

Ідентифіковано основні шкідливі та небезпечні виробничі фактори при експлуатації вдосконаленого (або реконструйованого) аспіраційного комплексу (високий тиск у ресиверах регенерації, шум тягодуттьових машин, робота на висоті).

Отже, основними небезпеками експлуатації аспіраційної системи є високодисперсний пил, пневмообладнання під тиском [23], акустичне навантаження [24] та виконання робіт на висоті [25]. Для їх мінімізації необхідні технічні заходи: повна герметизація вузлів пилоутворення, встановлення вибухорозрядних панелей і надійне заземлення апаратів. Під час технічного обслуговування критично важливим є суворе

дотримання організаційних регламентів [26], зокрема застосування системи захисного блокування LOTO, що ефективно запобігає несанкціонованій подачі енергоносіїв. Комплексне впровадження цих рішень разом із використанням нарядів-допусків, регулярним газоаналізом та належними засобами індивідуального захисту дозволяє звести професійні ризики до нормативного (або прийнятного) мінімуму та забезпечити належні умови праці персоналу.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача з підвищення ефективності системи аспірації вузла шихтоподачі доменного цеху. На основі проведених аналітичних досліджень сформульовано наступні основні висновки.

1. Встановлено, що процеси завантаження, грохочення та транспортування металургійної сировини є потужними джерелами неорганізованих викидів високодисперсного пилу. Визначено, що понад 80% маси викидів складає небезпечна фракція PM2.5, яка через високу абразивність та фіброгенною дію вимагає надійної (або ефективної) локалізації та переходу на сучасні методи сухого очищення газів.

2. Для забезпечення стабільної роботи обладнання в умовах доменного виробництва обґрунтовано доцільність впровадження сучасних багатошарових композитів з мікропористою мембраною з експандованого політетрафтороетилену (ePTFE) на антистатичній основі, що переносить фільтрацію на поверхню рукава, запобігає кольматації пор та усуває ризики вибухонебезпечного трибоелектричного іскроутворення від коксового пилу.

3. Виконано комплексні інженерно-технологічні розрахунки параметрів ГОУ для максимального об'єму очищеного повітря 450 000 м³/год. Для забезпечення нормативної чистоти викидів необхідна площа фільтрації становить 5000 м² (апарат ФРІР-5000), а добова маса вловленого продукту досягає 9936 кг при проєктній ефективності пиловловлення 97,87%.

4. Обґрунтовано оптимальний діаметр магістрального колектора на рівні 3000 мм для підтримання швидкості потоку 18 м/с, що виключає замулювання та гравітаційне осадження пилу в трубах.

5. Розроблено архітектуру автоматизованої системи контролю

викидів (АСКВ) на базі передового електродинамічного методу безконтактної індукції. Доведено, що реєстрація змінної складової (АС) наведеного мікроструму в діапазоні одиниць піко ампер дозволяє прецизійно моніторити залишкову запиленість потоку на рівні $<10 \text{ мг/м}^3$ та миттєво фіксувати аварійні прориви рукавів без ризику хибних показань через налипання залізовмісного пилу на вимірювального зонд.

6. Для усунення вторинного пиління під час вивантаження та транспортування сухого осаду в схему інтегровано вузол кондиціювання та окомкування (грануляції) вловленого матеріалу в барабанних зволожувачах. Це дає змогу безпечно повертати близько 10 тонн цінної залізовмісної сировини на добу назад у металургійний переділ аглофабрики, приносячи підприємству значний екологічний та економічний ефект.

7. Зазначені заходи з охорони праці та промислової безпеки при експлуатації оновленого аспіраційного комплексу. На основі ідентифікації шкідливих та небезпечних виробничих факторів, зокрема шум димососів, робота під високим тиском 0,6 МПа в ресиверах системи регенерації, обслуговування обладнання на висоті, проаналізовані практичні рішення, регламенти та інструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Whitelock D., Buser M. Multiple Series Cyclones for Fine Dust. 2005. URL: https://www.researchgate.net/publication/260285265_Multiple_Series_Cyclones_for_Fine_Dust (дата звернення: 15.06.2026).
2. Faulkner W., Buser M., Whitelock D., Shaw B. Effects of Cyclone Diameter on Performance of 1D3D Cyclones: Cutpoint and Slope // Transactions of the ASABE. 2008. Vol. 51. P. 287–292. DOI: 10.13031/2013.24222.
3. Cheng T., Wei J., Yu H. [et al.]. Improving the removal of fine particles in cyclone using heterogeneous vapor condensation enhanced by atomization // Advanced Powder Technology. 2024. Vol. 35, Iss. 11. 104684. DOI: 10.1016/j.appt.2024.104684.
4. Pérez Sánchez A., Pérez Sánchez E. J., Segura Silva R. Design of a packed-bed absorption column considering four packing types and applying MATLAB // Nexo Revista Científica. 2016. Vol. 29, No. 2. P. 83–104. DOI: 10.5377/nexo.v29i2.4577.
5. Jaworek A., Balachandran W., Krupa A. [et al.]. Wet electroscrubbers for state of the art gas cleaning // Environmental Science & Technology. 2006. Vol. 40, No. 20. P. 6197–6207. DOI: 10.1021/es0605927.
6. Kim E., Byun Y., Bak H.-S., Koh D. Experimental Study on the Operating Parameters of a Pulse-Jet Filter Bag Cleaning System // Sustainability. 2022. Vol. 14. 7276. DOI: 10.3390/su14127276.
7. Cirqueira S., Tanabe E., Aguiar M. Experimental investigation of particle deposition in filter media during filtration cycles with regeneration by pulse jet cleaning // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 127. DOI: 10.1016/j.psep.2019.05.013.
8. Cankaya N., Özcan M. Performance optimization and

improvement of dust laden air by dynamic control method for jet pulsed filters // *Advanced Powder Technology*. 2019. Vol. 30. DOI: 10.1016/j.appt.2019.04.014.

9. Liu X., Shen H. Effect of Venturi Structures on the Cleaning Performance of a Pulse Jet Baghouse // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. 3687. DOI: 10.3390/app9183687.

10. Бондаренко В. П. Інноваційні фільтрувальні матеріали на основі ePTFE-мембран у системах пиловловлення: фізико-хімічні властивості та експлуатаційна надійність. *Хімічна промисловість*. 2021. № 3. С. 22–29.

11. DIN 54345-1:1992-02. Testing of textiles; electrostatic behaviour; determination of electrical resistance quantities. Berlin : Deutsches Institut für Normung, 1992. 6 p.

12. NFPA 77. Recommended Practice on Static Electricity. Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2024. 88 p.

13. Старцев А. В. Сучасні тканинні рукавні фільтри з імпульсною регенерацією в системах аспірації доменних цехів. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2022. № 4. С. 45–52.

14. Технології безперервного моніторингу викидів (CEMS): застосування електродинамічних пиломірів на металургійних підприємствах / О. М. Коваленко [та ін.] // *Екологічна безпека промислових регіонів*. 2023. Т. 12, № 2. С. 88–95.

15. Гічов Ю. О. Очищення технологічних газів у металургії : навч. посібник. Дніпро : НМетАУ, 2018. 256 с.

16. Северин Л. І. Охорона праці та навколишнього середовища в металургії : підручник. Київ : Основа, 2020. 312 с.

17. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) / European IPPC Bureau. Seville, 2012. 625 p.

18. Сахно І. Г., Бруй Г. В. Математичне моделювання аеродинаміки систем аспірації з використанням програмних комплексів. *Вісник металургійної науки. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 40. С. 112–118.
19. Шевченко О. В. Економіка замкненого циклу в чорній металургії: технології окомкування та утилізації залізовмісних шламів і пилу. *Збагачення корисних копалин*. 2024. Вип. 81(122). С. 55–62.
20. ДСТУ EN 13284-1:2018. Викиди стаціонарних джерел. Визначення масової концентрації пилу. Частина 1. Гравіметричний метод. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 30 с.
21. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони: наказ МОЗ України від 09.07.2024 № 1192.
22. Правила охорони праці в металургійній промисловості : НПАОП 27.0-1.01-08 / затв. наказом Держгірпромнагляду від 22.12.2008 № 289. Київ, 2009. 84 с.
23. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском : НПАОП 0.00-1.81-18 / затв. наказом Мінсоцполітики від 05.03.2018 № 333. Київ : Основа, 2018. 84 с.
24. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку / затв. постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999 № 37. Київ : МОЗ України, 1999. 18 с.
25. Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті : НПАОП 0.00-1.15-07 / затв. наказом Держгірпромнагляду від 27.03.2007 № 62. Київ : Основа, 2007. 92 с.
26. Охорона праці та промислова безпека в металургії : підручник / В. І. Голинь [та ін.]. Київ : Знання, 2020. 342 с.

ДОДАТОК А

Сертифікат участі у міжнародному конкурсі студентських наукових робіт «Black Sea Science 2026»



FIELD OF «ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION»
 IN THE INTERNATIONAL COMPETITION OF STUDENT SCIENTIFIC WORKS
 «BLACK SEA SCIENCE 2026»



organized by
 Odesa National University of Technology
 Odesa, Ukraine

Certificate of participation

*Improving the efficiency of the aspiration system of the blast furnace
 charge feed node using computer-aided cyclone calculation*

authored by

Anton Podobnyi

under the supervision of

Yurii Cheberiachko, Anatolii Roman

Head of the Organizing Committee
 Rector of Odesa National
 University of Technology
Larysa IVANCHENKOVA

President of Odesa National
 University of Technology
Bogdan IEGOROV

Vice-Rector for Scientific Work
 and International Relations of
 Odesa National University of
 Technology
Olga OLSHEVSKA

Head of the Jury in the field of
 "Ecology and Environmental
 Protection"
Olena KOVALENKO

BSS-2026.5.37

ДОДАТОК Б

Публікація здобувача за темою досліджень

Подобний А. Д., Максимова Н.М. Оцінка системи автоматизованого моніторингу рукавного фільтра ФРІР-5000 в умовах доменного виробництва/ Новітні технології в освіті, науці та виробництві: збірник матеріалів II Всеукраїнської науково-технічної конференції, 28-29 квітня 2026 р. – Дрогобич: ДВНЗ «ДонНТУ», 2026. С. 27-29.



Продовження дод. Б

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
кафедра прикладної механіки



**НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОСВІТІ,
НАУЦІ ТА ВИРОБНИЦТВІ**

Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції
(м. Дрогобич, 28-29 квітня 2026 року)

Дрогобич
ДВНЗ «ДонНТУ»
2026

Продовження дод. Б

Рекомендовано Вченою радою Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України.

Новітні технології в освіті, науці та виробництві: збірник матеріалів II Всеукраїнської науково-технічної конференції, 28-29 квітня 2026 р. – Дрогобич: ДВНЗ «ДонНТУ», 2026.– 104 с.

У збірнику опубліковано матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції, в яких розглянуті питання актуальних проблем механізації і автоматизації енергоємних виробництв, розробки корисних копалин та охорони праці, соціально-економічного та наукового розвитку регіонів України.

Збірник розрахований на наукових співробітників, викладачів, інженерно-технічних працівників, а також аспірантів і студентів вищих навчальних закладів України та світу.

ПОЧЕСНІ ЧЛЕНИ ОРГАНІЗАЦІЙНОГО КОМПІТЕТУ

Титюк Валерій Костянтинівич – професор кафедри електромеханіки, Криворізький національний університет, д-р техн. наук, професор, м. Кривий Ріг, Україна.

Давиденко Людмила Валеріївна – професор кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет, д-р техн. наук, професор, м. Луцьк, Україна.

Шевчук Степан Прокопович – завідувач кафедри електромеханічного обладнання енергоємних виробництв Інституту енергозбереження та енергоменеджменту, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут», д-р техн. наук, професор, м. Київ, Україна.

Шашенко Олександр Миколайович – професор кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», д-р техн. наук, професор, м. Дніпро, Україна.

Сахно Іван Георгійович – професор кафедри гірничої справи, Технічний університет «МЕТИВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», д-р техн. наук, професор, м. Київ, Україна.

Швель Ігор Іванович – в.о. директора навчально-наукового інституту інженерії та технологій ДВНЗ «ДонНТУ», канд. техн. наук, доцент, м. Дрогобич, Україна.

Петелін Едуард Анатолійович – директор навчально-наукового інституту комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації ДВНЗ «ДонНТУ», канд. техн. наук, доцент, м. Дрогобич, Україна.

Мерзлякін Артем Володимирович – директор навчально-наукового інституту гірництва та геоінженерії ДВНЗ «ДонНТУ», канд. техн. наук, доцент, м. Дрогобич, Україна.

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМПІТЕТ

Голова оргкомітету: зав. кафедри прикладної механіки, к.т.н., доцент **Вірич Світлана Олександрівна**.

Заступник голови оргкомітету: доцент кафедри прикладної механіки, к.т.н., доцент **Каливниченко Валерій Вікторович**.

Члени оргкомітету:

Гого Володимир Бейлович – професор кафедри прикладної механіки, д.т.н., професор;

Калафатова Людмила Павлівна – професор кафедри прикладної механіки, д.т.н., професор;

Мірошниченко Олександр Володимирович – доцент кафедри прикладної механіки, к.т.н., доцент;

Повзун Олексій Іванович – доцент кафедри прикладної механіки, к.т.н., доцент;

Оверко Михайло Валентинівич – доцент кафедри прикладної механіки, к.т.н.

Секретар конференції:

Бабенко Марина Олегівна – старший викладач кафедри прикладної механіки, к.п.н.

Редакційна колегія повідомляє, що автори публікацій несуть відповідальність за достовірність поданої інформації, зміст матеріалів, їх мовно-стилістичне оформлення.

© Автори статей, 2026

Продовження дод. Б

ВІТАЛЬНЕ СЛОВО

Шановні учасники та гості конференції!

II Всеукраїнська науково-технічна конференція «Новітні технології в освіті, науці та виробництві» присвячена надзвичайно актуальним темам, які зачіпляють економічну, технічну і соціальну структуру суспільства нашої країни. Ці тенденції тісно пов'язані зі зростанням ролі науки, освіти і культури в соціально-економічному розвитку України та регіонів, зміцненні національної безпеки. В даний час військового положення інститут освіти, як і інші інститути, зазнає глибокі системні трансформації. У цих умовах конструктивна взаємодія і поглиблення співпраці вчених не тільки нашої країни, а і всього експертного співтовариства світу є невід'ємною частиною комплексного вирішення гострих технічних, економічних і соціальних проблем. На всіх етапах розвитку вищої школи університетська освіта відображала передові традиції в розвитку технічної та соціально-економічної освіти. Саме університети формували технічну думку в розвитку науки і виробництва, чинили сильний вплив на соціальне самопочуття населення. Сподіваємося, що учасники заходу зможуть плідно попрацювати і обговорити найважливіші аспекти розвитку технічної освіти в системі вищої школи, сучасні технології в виробництві та шляхи економічного розвитку як регіону, так і України в цілому.

З повагою

голова оргкомітету,

Світлана ВІРИЧ

Продовження дод. Б

**Секція 2. АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВ.
ПОВ'ЯЗАНИХ З ЕНЕРГЕТИКОЮ, МЕХАНІЗАЦІЄЮ І АВТОМАТИЗАЦІЄЮ**

УДК 681.518:628.511

Подобний А. Д., бакалавр, **Максимова Н.М.**, канд. техн. наук, доц.
ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя, Україна

**ОЦІНКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ
РУКАВНОГО ФІЛЬТРА ФРІР-5000 В УМОВАХ ДОМЕННОГО
ВИРОБНИЦТВА**

Анотація: У роботі розглянуто проблематику автоматизації та моніторингу робочих параметрів рукавних фільтрів у системах аспірації доменних печей. Обґрунтовано необхідність модернізації контрольно-вимірювальних приладів для підвищення екологічної безпеки та оптимізації енерговитрат.

Ключові слова: рукавний фільтр, аспіраційна система, КВПіА, автоматизація, моніторинг, екологічна безпека, регенерація.

Забезпечення нормативних показників викидів пилу в металургійному виробництві вимагає не лише встановлення сучасного газоочисного обладнання, а й впровадження надійних систем автоматизованого управління (АСУ) та контрольно-вимірювальних приладів (КВПіА). Досвід експлуатації потужних аспіраційних установок, зокрема рукавних фільтрів типу ФРІР-5000, якими обладнані бункерні естакади доменних печей, свідчить, що ефективність уловлювання пилу критично залежить від своєчасного моніторингу аеродинамічних та температурних параметрів [1].

Основним завданням системи моніторингу є контроль за станом фільтрувальних рукавів та роботою тягодуттєвого обладнання (димососів). Недостатній рівень автоматизації призводить до таких експлуатаційних проблем, як "осліплення" фільтрувальної тканини, перевитрата стисненого повітря на регенерацію або аварійні зупинки через перегрів підшипників димососів [1].

Для оптимізації роботи ФРІР-5000 пропонується вдосконалення системи КВПіА за наступними ключовими напрямками, які відображено на розробленій функціональній схемі (рисунк 1).

Динамічний контроль перепаду тиску (ΔP). Традиційна регенерація імпульсами стисненого повітря часто налаштовується за жорстким часовим таймером. Для переходу на динамічне управління алгоритм регенерації має базуватися на контролі поточного аеродинамічного опору, який описується залежністю [2]:

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 + K \cdot C \cdot v_f^2 \cdot t \quad (1)$$

де ΔP – початковий опір чистої фільтрувальної тканини, Па;

K – питомий опір шару вловленого пилу;

C – вхідна концентрація пилу в аспіраційному повітрі, кг/м³;

Продовження дод. Б

vf – швидкість фільтрації, м/с;

t – час накопичення пилу між імпульсами регенерації, с.

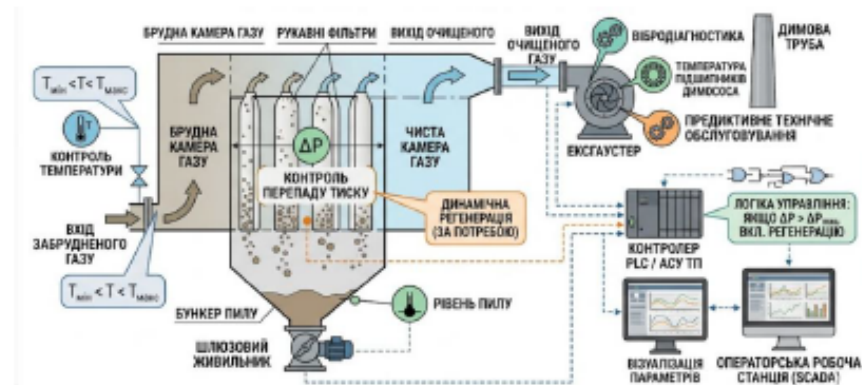


Рисунок 1 – Модернізована функціональна схема автоматизованого моніторингу та управління рукавного фільтра ФРІР-5000

Впровадження високоточних датчиків диференційного тиску дозволяє ПЛК запускати очищення «за потребою» при досягненні критичної уставки ΔP_{max} , що знижує знос тканини.

Температурний моніторинг. Газовий потік має підтримуватися у визначеному температурному коридорі для запобігання конденсації вологи. Автоматичне регулювання підтримує режим згідно з умовою [2]:

$$T_{min} = T_{dew} + \Delta T \quad (2)$$

де T_{min} – мінімально допустима температура запиленого газу на вході, °C;

T_{dew} – розрахункова температура точки роси для складу газу, °C;

ΔT – гарантійний температурний запас, що становить 15–20°C.

Встановлення швидкодіючих термопар у колекторах забезпечує захист від цементації пилу на рукавах.

Вібродіагностика тягодуттєвого обладнання. Інтеграція датчиків вібрації та температури підшипників димососа (ексгаустера) у загальну SCADA-систему дозволяє реалізувати предиктивний підхід до технічного обслуговування (predictive maintenance).

Для забезпечення надійності збору та обробки інформації, архітектура системи автоматизованого моніторингу побудована за класичною тривірневою моделлю АСУ ТП (рисунок 2). Нижній (польовий) рівень представлений комплексом первинних перетворювачів та виконавчих механізмів: датчиками диференційного тиску, термоперетворювачами, вібродатчиками та сигналізаторами рівня пилу в бункерах. Сигнали передаються кабельними лініями до шафи управління. Середній рівень (рівень управління) базується на

Продовження дод. Б

використанні програмованого логічного контролера (ПЛК). Контролер виконує циклічне опитування датчиків, математичну обробку даних та генерує керуючі імпульси на електромагнітні клапани регенерації. Верхній (диспетчерський) рівень реалізовано на базі SCADA-системи. Обмін даними здійснюється через промислову мережу Ethernet. На цьому рівні у реальному часі автоматично розраховується загальна екологічна ефективність газоочисної установки за формулою [2]:

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}\right) \cdot 100\% \quad (3)$$

де C_{in} – концентрація пилу до очищення (на вході в ФРІР-5000), мг/м³;
 C_{out} – залишкова концентрація пилу після очищення, мг/м³.

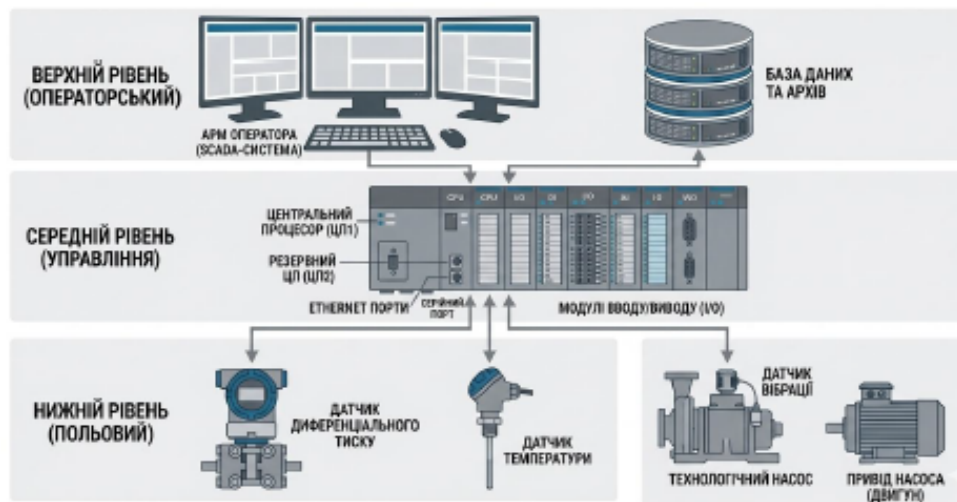


Рисунок 2 – Структурна схема багаторівневої системи автоматизованого моніторингу рукавного фільтра

Висновок. Впровадження сучасних засобів КВПіА та перехід від статичних до динамічних алгоритмів управління рукавним фільтром ФРІР-5000 (на базі тривірневої архітектури та розрахованих математичних моделей) дозволяє мінімізувати вплив людського фактора. Це гарантує стабільне очищення аспіраційного повітря до залишкової концентрації пилу менше 20 мг/м³, продовжує термін служби фільтрувальних елементів та значно підвищує надійність роботи екологічного обладнання доменного цеху.

Список використаної літератури

1. Технологічна інструкція по експлуатації і обслуговуванню аспіраційної системи, бункерної естакади, скіпової ями і приймальної воронки засипного апарату доменної печі №-2 ВАТ «Запоріжсталь».
2. Гічов Ю.О. Очищення газів. Частина II: Конспект лекцій. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. 46 с.

ДОДАТОК В
Декларація про розкриття факту делегування завдань
генеративному ШІ

Автор заявляє про використання генеративного ШІ у процесі дослідження та підготовки рукопису. Відповідно до таксономії GAIDeT (2025), наведені нижче завдання були делеговані інструментам генеративного ШІ за повного людського нагляду:

- *Генерування ідей*
- *Пошук і систематизація літератури*
- *Переклад*
- *Реформатування*

Використаний інструмент генеративного ШІ: ChatGPT-5.

Повну відповідальність за фінальний рукопис несуть автори.

Інструменти генеративного ШІ не зазначаються як автори та не несуть відповідальності за кінцеві результати.

Декларацію подав(ла): Антон Подобний

Додаткова примітка: Я використав ChatGPT-5 для допомоги у синтезі літератури, її перекладі та реформатування тексту.