



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 «Оцінка ефективності системи аспірації та газоочисної установки
ливарного виробництва з урахуванням екологічних вимог до викидів
забруднюючих речовин»**

Керівник роботи

Наталія МАКСИМОВА

Консультант від бази
практики

Максим ЛИЗОГУБ

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

Здобувач

Ганна МАНАХОВА

Підсумкова оцінка за атестацію

Голова ЕК

Катерина СУХОДОЛЬСЬКА

Запоріжжя 2026

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри БПОД

Максим КАРАКАЙ

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
Манахова Ганна Олегівна

1. Тема роботи «Оцінка ефективності системи аспірації та газоочисної установки ливарного виробництва з урахуванням екологічних вимог до викидів забруднюючих речовин»

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: дані про параметри роботи системи аспірації та газоочисної установки ФРКДІ-1100, результати інструментальних вимірювань концентрацій забруднюючих речовин у газопиловому потоці, технічна документація газоочисного обладнання, матеріали, зібрані під час переддипломної практики за ОПП «Природоохоронні технології в урбо-індустріальному комплексі».

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Розділ 1. Аналіз технологічного процесу ливарного виробництва та джерел утворення забруднюючих речовин. Розділ 2. Характеристика системи аспірації та газоочисної установки ФРКДІ-1100. Розділ 3. Оцінка ефективності очищення газопилових викидів та аналіз роботи газоочисного обладнання. Розділ 4. Аналіз відповідності показників викидів екологічним нормативам та розробка заходів з підвищення ефективності системи. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу: Схема системи аспірації та газоочищення сталєфасоноливарного цеху. Конструктивна схема рукавного фільтра ФРКДІ-1100. Технологічна схема руху газопилового потоку через систему аспірації та очищення. Графік зміни концентрації пилу до та після очищення. Діаграма ефективності роботи газоочисної установки. Схема запропонованих заходів модернізації системи аспірації та газоочищення.

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 технологічного процесу ливарного виробництва та джерел утворення забруднюючих речовин.	29.04.2026	виконано
3.	Розділ 2. Характеристика системи аспірації та газоочисної установки ФРКДІ-1100	20.05.2026	виконано
4.	Розділ 3. Оцінка ефективності очищення газопилових викидів та аналіз роботи газоочисного обладнання.	29.05.2026	виконано
5.	Розділ 4. Аналіз відповідності показників викидів екологічним нормативам та розробка заходів з підвищення ефективності системи. Висновки. Список використаних джерел.	03.06.2026	виконано
6.	Розділ 5 Заходи з вдосконалення системи аспірації та газоочищення. Висновки. Список використаних джерел.	06.06.2026	виконано
7.	Розділ 6 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	10.06.2026	виконано

Здобувач вищої освіти

Ганна МАНАХОВА

Керівник роботи

Наталія МАКСИМОВА

АНОТАЦІЯ

Манахова Ганна Олегівна. Оцінка ефективності системи аспірації та газоочисної установки ливарного виробництва з урахуванням екологічних вимог до викидів забруднюючих речовин. 126 сторінок, 21 таблиця, 1 рисунок, 48 джерел. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища ОПП «Природозахисні технології в урбо-індустріальному комплексі». ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», Запоріжжя, 2026.

Об'єкт дослідження: система аспірації та газоочищення сталевасоливарного цеху, що включає рукавний фільтр ФРКДІ-1100 та пов'язані технічні елементи.

Предмет дослідження: процеси формування, відведення, очищення і нормування газопилових викидів від електродугової сталеплавильної печі з урахуванням вимог природоохоронного законодавства України.

Мета роботи: комплексна оцінка ефективності функціонування системи аспірації та газоочисної установки ливарного виробництва, встановлення відповідності фактичних показників викидів нормативним вимогам і розроблення науково обґрунтованих заходів щодо підвищення екологічної та енергетичної ефективності системи.

Основні результати:

У роботі проаналізовано технологічний процес сталевасоливарного цеху як джерело формування забруднюючих речовин. Охарактеризовано конструктивні особливості, технічні параметри і принцип роботи системи аспірації та газоочисної установки ФРКДІ-1100. Виконано розрахункову оцінку ефективності очищення і гідравлічних характеристик системи. Підтверджено

відповідність фактичних параметрів роботи установки проектним показникам. Проведено аналіз результатів інструментальних вимірювань концентрацій забруднюючих речовин і встановлено відповідність фактичних валових викидів нормативам гранично допустимих викидів з запасом від 19,6 до 41,5 % залежно від речовини. Виконано еколого-економічну оцінку системи газоочищення. Виявлено системні недоліки у роботі обладнання та розроблено заходи з його вдосконалення, зокрема встановлення частотного перетворювача на привід димососу з терміном окупності 3–4 місяці, заміна фільтрувальних рукавів на матеріали з ПТФЕ-ламінатом і впровадження безперервного газоаналітичного моніторингу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: система аспірації, газоочисна установка, рукавний фільтр, ливарне виробництво, електродугова піч, забруднюючі речовини, атмосферне повітря, гранично допустимі викиди, ефективність очищення, модернізація.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ВПЛИВУ НА АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ І ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ	12
1.1 Загальна характеристика і структура ливарного виробництва	12
1.2 Опис технологічного процесу сталєфасоноливарного цеху ...	14
1.3 Ідентифікація та характеристика джерел утворення забруднюючих речовин	17
1.4 Характеристика забруднюючих речовин та їх вплив на атмосферне повітря і здоров'я людини.....	20
Висновки до розділу 1	23
2 ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМИ АСПІРАЦІЇ ТА ГАЗООЧИСНОЇ УСТАНОВКИ	25
2.1 Загальна будова та склад системи аспірації сталєфасоноливарного цеху	25
2.2 Технічна характеристика газоочисної установки ФРКДІ-1100.	28
2.3 Принцип роботи рукавного фільтра та схема газоочищення ..	30
2.4 Система автоматизованого контролю і управління газоочисною установкою.....	32
2.5 Паспортні характеристики газоочисного обладнання відповідно до нормативних вимог	34
Висновки до розділу 2	36
3 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ СИСТЕМИ АСПІРАЦІЇ ТА ГАЗООЧИСНОЇ УСТАНОВКИ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА	37
3.1 Методика оцінки ефективності газоочисного обладнання	37
3.2 Розрахунок ефективності очищення рукавного фільтра ФРКДІ- 1100	40

3.3 Розрахунок масових концентрацій та обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря.....	41
3.4 Розрахунок фактичних валових викидів пилу та порівняння з гранично допустимими значеннями	43
3.5 Визначення ступеня аерогазодинамічного навантаження на систему аспірації	46
3.6 Розрахунок продуктивності і втрат тиску в аспіраційній системі	48
Висновки до розділу 3	51
4 ОЦІНКА ФАКТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ АСПІРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА ГАЗООЧИЩЕННЯ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА.	53
4.1 Технологічна схема аспіраційної системи та газоочищення ливарного виробництва ливарного виробництва	53
4.2 Результати інструментальних вимірювань концентрацій забруднюючих речовин	56
4.3 Аналіз відповідності параметрів роботи газоочисної установки проектним показникам.....	58
4.4 Порівняння фактичних показників викидів з нормативними вимогами природоохоронного законодавства України	61
4.5 Еколого-економічна оцінка ефективності системи газоочищення	64
Висновки до розділу 4	67
5 ЗАХОДИ З ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АСПІРАЦІЇ ТА ГАЗООЧИЩЕННЯ.....	69
5.1 Виявлені недоліки у роботі системи аспірації та газоочисної установки	69
5.2 Рекомендації щодо оптимізації режимів роботи рукавного фільтра ФРКДІ-1100	71
5.3 Пропозиції щодо модернізації газоочисного обладнання та підвищення екологічної ефективності	74

5.4 Оцінка очікуваного екологічного ефекту від впровадження запропонованих заходів	77
Висновки до розділу 5	79
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ...	81
6.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів у ливарному цеху	79
6.2 Заходи із забезпечення безпечних умов праці при обслуговуванні газоочисного обладнання	83
6.3 Пожежна безпека на об'єкті.....	86
6.4 Дії персоналу в надзвичайних ситуаціях	88
Висновки до розділу 6	90
ВИСНОВКИ	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96
ДОДАТОК А Публікації здобувача	104
ДОДАТОК Б Декларація про розкриття факту делегування завдань генеративному ШІ	125

ВСТУП

Охорона атмосферного повітря від промислових викидів є одним із найважливіших завдань екологічної політики України в умовах інтеграції до Європейського Союзу та поступового наближення вітчизняного природоохоронного законодавства до вимог європейських директив, зокрема Директиви 2010/75/EU про промислові викиди. Металургійна і машинобудівна промисловість, до якої відноситься ливарне виробництво, традиційно є одним з найбільш значних джерел забруднення атмосферного повітря через широкий спектр газопилових викидів, що утворюються в процесі плавлення металу, виготовлення ливарних форм, заливання і охолодження виливків. Забезпечення ефективної роботи систем аспірації та газоочищення на таких підприємствах набуває не лише екологічного, але й соціального та економічного значення, оскільки безпосередньо визначає якість атмосферного повітря в промислових містах і умови праці виробничого персоналу.

Ливарне виробництво характеризується надзвичайно різноманітним складом шкідливих викидів: дрібнодисперсний металургійний пил із вмістом оксидів заліза, марганцю і кремнію, монооксид вуглецю, оксиди азоту і сірки, фенол, формальдегід, бензапірен та леткі органічні сполуки. Без застосування ефективних газоочисних систем концентрації цих речовин у викидах багатократно перевищували б встановлені нормативи гранично допустимих викидів і спричиняли б суттєве техногенне навантаження на навколишнє середовище і здоров'я населення. Саме тому системи аспірації та газоочищення є ключовим природоохоронним елементом будь-якого сучасного ливарного підприємства, а оцінка їх ефективності — невід'ємною складовою екологічного моніторингу і управління.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи визначається кількома взаємопов'язаними обставинами. По-перше, значна частина газоочисного обладнання на вітчизняних ливарних підприємствах була введена в експлуатацію ще у радянський період і нині перевищує нормативний розрахунковий ресурс, що ставить під питання надійність і ефективність його роботи в умовах сучасних вимог. По-друге, природоохоронне законодавство України останніми роками зазнало суттєвих змін — зокрема, прийнятий Закон №2393-IX від 09.07.2022, яким внесено зміни до Закону України «Про охорону атмосферного повітря», і наказ Міндовкілля №448 від 27.06.2023, що встановив нові вимоги до оформлення документів із нормування викидів, — що вимагає від підприємств переоцінки відповідності існуючих систем газоочищення оновленим нормативним вимогам [15; 16; 21]. По-третє, в умовах зростання тарифів на електроенергію питання енергетичної ефективності систем аспірації набуває суттєвого економічного значення: нераціональне завантаження тягодуттьового обладнання призводить до значних непродуктивних витрат і потребує технічної оптимізації.

Об'єктом дослідження є система аспірації та газоочищення сталевасоливарного цеху, що включає рукавний фільтр ФРКДІ-1100 та пов'язані технічні елементи.

Предметом дослідження є процеси формування, відведення, очищення і нормування газопилових викидів від електродугової сталеплавильної печі з урахуванням вимог природоохоронного законодавства України.

Метою роботи є комплексна оцінка ефективності функціонування системи аспірації та газоочисної установки ливарного виробництва, встановлення відповідності фактичних показників викидів нормативним вимогам і розроблення науково обґрунтованих заходів щодо підвищення екологічної та енергетичної ефективності

системи.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі **завдання**:

- 1) дослідити технологічний процес сталевих фасонувальних цеху як джерело формування забруднюючих речовин;
- 2) охарактеризувати конструктивні особливості, технічні параметри і принцип роботи системи аспірації та газоочисної установки ФРКДІ-1100;
- 3) виконати розрахункову оцінку ефективності очищення і гідравлічних характеристик системи;
- 4) провести аналіз результатів інструментальних вимірювань концентрацій забруднюючих речовин і порівняти їх з нормативними вимогами природоохоронного законодавства України;
- 5) виконати еколого-економічну оцінку системи газоочищення;
- 6) виявити недоліки у роботі системи і розробити заходи з її вдосконалення;
- 7) здійснити аналіз охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях у ливарному цеху.

Наукова новизна роботи полягає у проведенні комплексного кількісного дослідження ефективності системи аспірації та газоочищення ливарного виробництва конкретного підприємства на основі паспортних даних, результатів атестованих вимірювань і власних розрахунків, а також в обґрунтуванні конкретних технічних рішень із модернізації системи з оцінкою їх екологічного та економічного ефекту, включаючи розрахунок термінів окупності запропонованих заходів.

Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що розроблені рекомендації щодо встановлення частотного перетворювача на привід димососу ДН-17, заміни фільтрувальних рукавів на матеріали з ПТФЕ-ламінатом і впровадження безперервного

газоаналітичного моніторингу можуть бути безпосередньо застосовані на підприємстві без проведення додаткових досліджень. Результати роботи також становлять методичний інтерес для фахівців у сфері промислової екології та охорони атмосферного повітря на інших ливарних підприємствах України, що мають аналогічне застаріле газоочисне обладнання і схожі проблеми з оцінкою його реальної ефективності.

Методи дослідження, застосовані у роботі: аналіз нормативно-правової та технічної документації; гравіметричний метод вимірювання концентрацій пилу відповідно до ДСТУ 8812:2018; електрохімічний метод визначення концентрацій газоподібних забруднювачів; аналітичні методи розрахунку ефективності газоочищення, масових витрат і валових викидів забруднюючих речовин; техніко-економічний аналіз витрат і ефектів від природоохоронних заходів; порівняльний аналіз фактичних показників з нормативними значеннями.

Інформаційну базу дослідження складають: паспорт установки очистки газу ФРКДІ-1100 і акт перевірки відповідності фактичних параметрів роботи проектним показникам; технічна документація підприємства; нормативно-правові акти у сфері охорони атмосферного повітря; ДСТУ 8812:2018; наукові праці вітчизняних дослідників у галузі промислової екології та техніки газоочищення; навчальні посібники і монографії з відповідної тематики.

Результати дослідження були апробовані під час участі у студентській науково-технічній конференції «Start in Science» та VI Міжнародній науково-практичній конференції «Scientific development in a changing world» (дод. А).

1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ВПЛИВУ НА АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ І ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

1.1 Загальна характеристика і структура ливарного виробництва

Ливарне виробництво є спеціалізованим машинобудівним підприємством, що входить, як правило, до складу гірничо-металургійного комплексів – одного з найбільших вертикально інтегрованих виробників сталі та залізорудної продукції в Україні. Підприємство здійснює виробництво запасних частин і обладнання для потреб гірничодобувної, металургійної, енергетичної та машинобудівної галузей промисловості. Географічна диверсифікація виробничих потужностей забезпечує стабільність постачання продукції замовникам і дозволяє оперативно реагувати на зміни виробничих потреб. [3]

Виробнича структура підприємств розташована у різних промислових центрах України, зокрема у містах Запоріжжя, Кривий Ріг та Кам'янське. Саме ці промислові осередки традиційно є центрами металургійного та машинобудівного виробництва країни, що визначає логіку розміщення підрозділів підприємства безпосередньо поряд з основними споживачами продукції. Кожна філія спеціалізується на певних видах продукції та послуг, однак усі вони дотримуються єдиних стандартів якості та технологічних регламентів, затверджених материнською компанією. [3, 22]

Основним напрямом діяльності ливарного підприємства є виготовлення виливків із чавуну і сталі різних марок. Виробнича програма охоплює широкий асортимент продукції: від стандартних

деталей машин і механізмів до унікальних крупних виливків масою до декількох тонн. Серед типової продукції – ролики, втулки, корпусні деталі, шестерні, кришки редукторів, деталі кранового обладнання, зубчасті вінці, а також комплектуючі для гірничошахтного і збагачувального устаткування. Широка номенклатура виробів зумовлює застосування різноманітних технологічних процесів і матеріалів, що впливає на характер і склад промислових викидів [3].

Виробнича база підприємства включає сталєфасоноливарний цех, чавуноливарний цех, дільниці механічної обробки, термічного оброблення, контролю якості, а також допоміжні виробництва – інструментальне, ремонтно-механічне, енергетичне. Сталєфасоноливарний цех є одним з ключових виробничих підрозділів і відповідає за виплавку і розливання сталей різних марок із подальшим виготовленням фасонного литва. Цех оснащений електродуговими і індукційними плавильними печами різної ємності, формувальними машинами, стрижневим відділенням і обрубно-очисним відділенням. [3, 36]

Система управління якістю підприємств, наприклад, сертифікована за стандартом ISO 9001, що підтверджує відповідність виробничих процесів міжнародним вимогам у сфері менеджменту якості. Поряд із системою якості на підприємстві впроваджено і функціонує система екологічного менеджменту, спрямована на зниження техногенного навантаження на навколишнє природне середовище. Відповідно до вимог чинного природоохоронного законодавства підприємство розробляє і виконує заходи щодо скорочення обсягів викидів забруднюючих речовин, провадить інвентаризацію джерел викидів, здійснює моніторинг параметрів атмосферних викидів і щорічно звітує перед природоохоронними органами [16, 25].

Як правило, загальна чисельність персоналу підприємства

перевищує 1 000 осіб. З огляду на специфіку ливарного виробництва, значна частина працівників зайнята у підрозділах, де існують потенційні ризики впливу шкідливих виробничих факторів – підвищеного вмісту пилу і газів у повітрі робочої зони, теплового і шумового навантаження. Реалізація заходів з охорони праці та промислової санітарії є обов'язковою складовою виробничої діяльності, а контроль умов праці здійснюється службами охорони праці та промислової санітарії.

З точки зору екологічної безпеки, підприємство з ливарним виробництвом є суб'єктом господарювання, що здійснює викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел. Для кожного організованого джерела викидів підприємство має встановлені нормативи гранично допустимих викидів (ГДВ), дотримання яких контролюється у процесі виробничої діяльності. [14; 16] Наприклад, газоочисна установка (ГОУ) ФРКДІ-1100 , встановлена на сталєфасоноливарному цеху, є ключовим природоохоронним об'єктом, що забезпечує очищення газопилових викидів від електродугової сталеплавильної печі (нумерація ГОУ та електродугової сталеплавильної печі умовні) [25; 36].

1.2 Опис технологічного процесу сталєфасоноливарного цеху

Технологічний цикл сталєфасоноливарного цеху є складним багатоетапним виробничим процесом, що включає підготовку шихти, плавлення металу, приготування формувальних і стрижневих сумішей, виготовлення форм, заливання металу, охолодження і вибивання виливків, а також їх очищення, контроль якості й відправлення замовникам. Кожен із перелічених етапів характеризується специфічними умовами перебігу технологічних операцій і відповідним

набором джерел утворення шкідливих речовин [3].

Підготовка шихтових матеріалів здійснюється у складських зонах і на ділянці шихтового двору. Металева шихта включає сталевий брухт різних марок, феросплави, розкислювачі та легуючі добавки. Відповідно до виду виплавлюваної сталі технолог складає шихтовий рецепт, що встановлює кількісний і якісний склад завантажувальних матеріалів. Підготовлені компоненти шихти подаються до плавильного агрегату за допомогою завантажувальних кранів і магнітних захватів, що забезпечує механізований характер завантаження і знижує ризик травматизму персоналу [3].

Основним плавильним агрегатом сталепрокатного цеху є електродугова сталеплавильна піч. Принцип плавлення у дуговій печі заснований на перетворенні електричної енергії у теплову під дією електричних дуг між графітізованими електродами і металошихтою. Процес плавки охоплює декілька послідовних стадій: заправлення пода печі, завантаження шихти, плавлення шихти з формуванням рідкої ванни, окислювальний період для видалення шкідливих домішок (фосфору, сірки, вуглецю), відновлювальний або рафінувальний період для отримання заданого хімічного складу і температури металу, а також завершальне розкислення сталі і зливання в ківш. Температура рідкої сталі на кінець плавки становить від 1550 °C до 1620 °C залежно від марки виплавлюваної сталі [3].

Паралельно з плавильними операціями у цеху здійснюється підготовка формувальних і стрижневих сумішей. Формувальна суміш виготовляється на основі кварцового піску, бентоніту та води у змішувачах-бігунах безперервного або циклічного типу. Стрижнева суміш готується з кварцового піску із додаванням органічних або неорганічних зв'язувальних матеріалів. Готова суміш транспортується до формувального відділення конвеєрними системами або підвісними ківшами. Виготовлення форм здійснюється на автоматизованих або

напіваавтоматизованих формувальних машинах, а стрижні виготовляються у стрижневих ящиках вручну або на стрижневих машинах [3].

Зібрані та пофарбовані антипригарними фарбами форми подаються на заливну дільницю. Заливання металу у форми здійснюється з розливних ковшів, наповнених рідкою сталлю від плавильної печі. Температура заливання металу залежить від марки сталі і перерізу вилівка та зазвичай становить від 1500 °C до 1570 °C. Після заливання форми охолоджуються протягом певного часу, що визначається масою вилівка і конфігурацією відливання. Вибивання виливків із форм здійснюється на вибивних решітках з пневматичним або механічним приводом [3].

Після вибивання вилівки надходять до обрубно-очисного відділення, де піддаються видаленню ливникової системи, прибутків і заток, обрубуванню задирок і нерівностей, а також дробоструминному або дробометному очищенню поверхні. Фінішна механічна обробка виливків здійснюється у механообробному цеху або безпосередньо на механообробних дільницях ливарного цеху. Термічне оброблення виливків виконується у термічних печах для отримання заданих механічних властивостей металу. Контроль якості виливків передбачає візуальний огляд, виміри розмірів, перевірку хімічного складу і механічних властивостей, а в необхідних випадках – ультразвукову або рентгенівську дефектоскопію [3].

Весь виробничий процес організований за принципом технологічного потоку, коли напівфабрикати і вилівки послідовно переміщуються між дільницями за допомогою мостових кранів, підвісних конвеєрів і наземних транспортних засобів. Стабільність і якість виробничого процесу забезпечуються системою технологічних регламентів, операційних карт і стандартів підприємства, розроблених відповідно до вимог системи менеджменту якості ISO 9001 [3; 16].

1.3 Ідентифікація та характеристика джерел утворення забруднюючих речовин

Ливарне виробництво належить до галузей промисловості, що характеризуються значним різноманіттям джерел утворення шкідливих речовин. Формування забруднюючих речовин відбувається на всіх основних стадіях технологічного процесу і обумовлене високотемпературними реакціями, механічним пилоутворенням під час обробки сипучих матеріалів, а також термічним розкладанням органічних зв'язувальних компонентів. Ідентифікація усіх джерел викидів і визначення їх вкладу в загальне забруднення атмосферного повітря є необхідною умовою для організації ефективного екологічного контролю і розробки природоохоронних заходів [25].

Найбільш потужним організованим джерелом пилогазових викидів у сталепрокатному цеху є електродугова сталеплавильна піч. Під час плавлення металошихти в умовах надвисоких температур (1600 °C і вище) відбуваються інтенсивні фізико-хімічні процеси, що супроводжуються утворенням значних обсягів газопилового потоку. Газопиловий потік формується внаслідок випаровування і наступної конденсації парів металу та його оксидів, вигорання вуглецевих включень шихти, окислення сірки і марганцю, а також внаслідок термічного розкладання різноманітних домішок шихтових матеріалів [8]. Масова концентрація пилу в газопиловому потоці, що утворюється під час роботи ДСП, відповідно до паспортних даних і результатів вимірювань, становить близько 1428 мг/м³ [36].

Стрижнева і формувальна дільниці є джерелами механічного пилоутворення при завантаженні, транспортуванні і переробці кварцового піску, бентоніту та інших сипучих матеріалів. Концентрація кварцового пилу в повітрі робочої зони таких дільниць може

перевищувати граничнодопустимі концентрації у 2–3 рази при недостатньо ефективній роботі місцевої витяжної вентиляції. Кварцовий пил особливо небезпечний через вміст вільного діоксиду кремнію (SiO_2), що є причиною розвитку силікозу – важкого професійного захворювання легень [3; 32; 48].

При приготуванні стрижневих сумішей з органічними зв'язувальними матеріалами (фуранові, фенолформальдегідні смоли) виділяються леткі органічні сполуки (ЛОС), зокрема фурфуріловий спирт, формальдегід, фенол, толуол та інші токсичні компоненти. Інтенсивність виділення цих речовин зростає при нагріванні суміші в процесі твердіння зв'язувального і при наступному контакті стрижнів із рідким металом у момент заливання [31].

Процес сушіння форм і стрижнів у сушильних камерах є джерелом утворення продуктів термічного розкладання органічних компонентів. Під дією температур 150–350 °C відбувається дегідратація зв'язувального, вигорання органічних залишків і виділення фенолу, формальдегіду, оксиду вуглецю та інших летких речовин. Обсяг і склад викидів залежать від виду використовуваного зв'язувального, його кількості у суміші і режиму термічної обробки [3; 31].

Заливна ділянка є комплексним джерелом забруднення атмосферного повітря. У момент контакту розплавленого металу температурою 1500–1570 °C із формувальною і стрижневою сумішшю відбуваються інтенсивні теплові і хімічні процеси: швидке випаровування вологи, вигорання органічних речовин, термічний піроліз зв'язувального, окислення вуглецю шихти і заформованих стрижнів. Внаслідок цих процесів виділяються пара, оксид вуглецю, діоксид вуглецю, оксиди азоту, сірчистий ангідрид, продукти неповного згоряння органічних сполук, бензол, толуол, бензапірен та фенол [3; 31; 32].

Вибивна дільниця також є значним джерелом пилоутворення. При руйнуванні форм на вибивних решітках виникає значний пиловий факел, що складається з частинок відпрацьованої формувальної суміші, залишків пригару і дрібних частинок металу. Пил вибивної дільниці характеризується полідисперсним складом – від крупних частинок розміром більше 100 мкм до дрібнодисперсних часток менше 10 мкм, здатних проникати у глибокі відділи дихальних шляхів людини [3; 31; 32].

Обрубно-очисна дільниця є джерелом пилу, утвореного при механічній обробці виливків, зокрема при видаленні ливникової системи і прибутків газовим різанням або відрізними верстатами, при дробоструминному очищенні поверхні і при обробці шліфувальними машинами. Дрібнодисперсний металевий і абразивний пил, що виділяється на цій дільниці, при недостатній ефективності аспірації поширюється у приміщенні цеху і може виходити в атмосферне повітря через аераційні ліхтарі і прорізи будівлі (табл. 1.1) [3;36].

Таблиця 1.1 – Характеристика основних джерел утворення забруднюючих речовин у сталевасоноливарному цеху

№ з/п	Найменування дільниці/джерела	Вид утворюваних забруднювачів	Характер джерела	Наявність газоочистки
1	Електродугова піч	Пил металургійний, CO, NO _x , SO ₂	Організоване	ФРКДІ-1100
2	Формувальна дільниця	Пил кварцовий, бентонітовий	Організоване / неорганізоване	Місцева вентиляція
3	Стрижнева дільниця	Пил, фенол, формальдегід, ЛОС	Організоване	Місцева вентиляція
4	Сушильні камери	Фенол, формальдегід, CO, ЛОС	Організоване	Термічне допалювання
5	Заливна дільниця	CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , пил, ЛОС, бензапірен	Неорганізоване	Аспірація
6	Вибивна дільниця	Пил формувальний, CO	Організоване	Аспірація
7	Обрубно-очисна дільниця	Металевий і абразивний пил	Організоване	Місцева вентиляція

Джерело: складено автором на основі [36]

Таким чином, ливарне виробництво характеризується наявністю численних різнорідних джерел забруднення атмосферного повітря, які утворюють комплексне техногенне навантаження на навколишнє середовище. Для кожного виду джерел передбачені відповідні заходи з локалізації та очищення викидів, серед яких ключову роль відіграє система аспірації та газоочисна установка ФРКДІ-1100.

1.4 Характеристика забруднюючих речовин та їх вплив на атмосферне повітря і здоров'я людини

Спектр забруднюючих речовин, що утворюються в процесі роботи сталепрокатного цеху, є надзвичайно широким і охоплює як тверді аерозолі (пил різного складу і дисперсності), так і газоподібні токсиканти. Вплив цих речовин на здоров'я людини і стан атмосферного повітря визначається їх фізичними і хімічними властивостями, концентрацією у повітрі, часом і характером впливу, а також індивідуальними особливостями організму. Оцінка небезпеки кожної з речовин здійснюється на основі їх класів небезпечності і встановлених санітарно-гігієнічних нормативів [32].

Пил, що утворюється під час роботи електродугової сталеплавильної печі, являє собою суміш дрібнодисперсних твердих частинок різного мінералогічного і хімічного складу [7]. До складу металургійного пилу входять оксиди заліза (Fe_2O_3 , Fe_3O_4), оксид марганцю (MnO), оксиди кремнію (SiO_2), а також домішки оксидів хрому, нікелю, молібдену та інших легуючих елементів залежно від марки виплавленої сталі [6]. Особливу токсикологічну небезпеку становлять частинки розміром менше 5 мкм (респірабельна фракція), які здатні проникати у альвеолярну зону легень і накопичуватися там, не виводячись через мукоциліарний кліренс. Масова концентрація пилу в газопиловому потоці від ДСП-3 до очищення становить 1428

мг/м³ при нормальних умовах [7; 6; 32; 36].

Монооксид вуглецю (CO) утворюється внаслідок неповного окислення вуглецю шихти в умовах недостатнього постачання кисню в плавильній зоні, а також при термічному розкладанні органічних зв'язувальних матеріалів на дільницях сушіння, заливання і вибивання. Токсична дія CO зумовлена його здатністю утворювати з гемоглобіном крові стійкий комплекс – карбоксигемоглобін, який позбавлений здатності переносити кисень до тканин. Навіть відносно невеликі концентрації CO у повітрі (від 50 мг/м³) при тривалому впливі спричиняють хронічну кисневу недостатність, порушення функцій центральної нервової системи, серцево-судинні розлади і прискорений розвиток атеросклерозу. Граничнодопустима концентрація CO у повітрі робочої зони становить 20 мг/м³ за (додаток 1 до [3; 31; 32; 48])

Діоксид азоту (NO₂) і монооксид азоту (NO) утворюються під час реакцій між азотом і киснем атмосферного повітря при надвисоких температурах дугового розряду в електропечі. Оксиди азоту (NO_x) є одними з найбільш токсичних газоподібних забруднювачів. NO₂ при концентраціях від 0,4 мг/м³ спричиняє подразнення верхніх дихальних шляхів, а при систематичному впливі концентрацій 1–2 мг/м³ – розвиток токсичного набряку легень. Оксиди азоту в атмосфері беруть активну участь у фотохімічних реакціях утворення смогу та зумовлюють підкислення атмосферних опадів. Граничнодопустима концентрація NO₂ в атмосферному повітрі населених місць становить 0,04 мг/м³ за максимально разовою концентрацією і 0,02 мг/м³ – за середньодобовою [32].

Діоксид сірки (SO₂) потрапляє у газопиловий потік з сірковмісних домішок металошихти і палива. Ця речовина має виражений подразнюючий вплив на слизові оболонки верхніх дихальних шляхів, кон'юнктиву очей і шкіру. При систематичному вдиханні концентрацій SO₂, що перевищують ГДК, розвиваються хронічні бронхіти, риніти і

ларингіти. В атмосфері SO_2 окислюється до SO_3 і реагує з водяною парою, утворюючи сірчану кислоту, яка є одним з основних компонентів кислотних дощів. Кислотне осадження спричиняє значну шкоду лісовим екосистемам, ґрунтам, поверхневим водним об'єктам та архітектурним пам'яткам [25].

Фенол і формальдегід є типовими представниками органічних забруднювачів, що утворюються при термічному розкладанні фенолформальдегідних і фуранових смол у стрижневій суміші. Фенол ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) є токсичним організмом, здатним проникати через шкіру і слизові оболонки. При хронічному впливі фенол порушує функції нервової системи, печінки і нирок. Формальдегід (HCHO) належить до 1 класу небезпечності і має виражений сенсibilізуючий і мутагенний вплив. Цей альдегід є вірогідним канцерогеном для людини і здатний індукувати розвиток пухлин верхніх дихальних шляхів при тривалому впливі. [3; 31; 32; 48]

Бензапірен (3,4-бензапірен) є поліциклічним ароматичним вуглеводнем, що утворюється при неповному згорянні органічних матеріалів у зонах заливання і сушіння. Ця речовина відноситься до 1 класу канцерогенної небезпеки і здатна індукувати злоякісні пухлини різних органів навіть при відносно малих дозах впливу. Бензапірен стійкий у навколишньому середовищі, накопичується в біологічних ланцюгах і є маркером загальної канцерогенної небезпеки промислових викидів ливарних виробництв (табл. 1.2) [25].

Оксиди заліза, що містяться у металургійному пилу (переважно Fe_2O_3), є основним компонентом аерозолів від роботи електродугових печей. Вдихання оксидів заліза в концентраціях, що перевищують ГДК, спричиняє розвиток сидерозу – доброякісного пневмоконіозу, що характеризується відкладенням часток оксиду заліза в легеневій тканині. На відміну від кварцового пилу, сидероз рідко призводить до вираженого фіброзу і прогресуючої недостатності функції легень,

однак тривалий вплив металургійного пилу підвищує ризик хронічних запальних захворювань бронхолегеневої системи.

Таблиця 1.2 – Нормативні показники забруднюючих речовин від ливарного виробництва

Забруднювальна речовина	Клас небезпечності	ГДК _{рз} , мг/м ³	ГДК _{мр} , мг/м ³	ГДК _{сд} , мг/м ³	Специфічна дія
Пил металургійний	3	4,0	0,5	0,15	Фіброгенна
Монооксид вуглецю (CO)	4	20,0	5,0	3,0	Токсична (гемотропна)
Діоксид азоту (NO ₂)	2	2,0	0,085	0,04	Подразнювальна
Діоксид сірки (SO ₂)	3	10,0	0,5	0,05	Подразнювальна
Фенол	2	0,3	0,01	0,003	Токсична
Формальдегід	1	0,5	0,035	0,003	Канцерогенна
Бензапірен	1	–	0,001 мкг/м ³	0,1 нг/м ³	Канцерогенна

Джерело: складено автором на основі [32; 3]

Сумарний вплив комплексу забруднюючих речовин від ливарного виробництва на атмосферне повітря носить комбінований характер. Синергетична взаємодія різних забруднювачів може посилювати їх негативний вплив у порівнянні з дією кожної речовини окремо, що враховується при оцінці ризиків для здоров'я населення, яке проживає поблизу підприємства. Саме тому забезпечення ефективної роботи систем аспірації та газоочищення є ключовим завданням у сфері екологічної безпеки підприємства [25].

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено комплексний аналіз характеристик ливарного виробництва та технологічного процесу сталєфасоноливарного цеху як об'єкта дослідження. Встановлено, що підприємство є виробником широкої номенклатури сталевих і

чавунного фасонного литва для потреб гірничо-металургійної галузі і має 3 виробничі філії в Україні. Технологічний процес ливарного виробництва є складним і багатостадійним, він охоплює підготовку шихти, плавлення металу в електродугових печах, виготовлення форм і стрижнів, заливання, охолодження і очищення виливків.

Ідентифіковано основні джерела утворення забруднюючих речовин у сталєфасоноливарному цеху: електродугова сталеплавильна піч №1 є найпотужнішим організованим джерелом з концентрацією пилу у вихідних газах до 1428 мг/м³. Крім пилу, у технологічних викидах присутні CO, NO_x, SO₂, фенол, формальдегід, бензапірен та леткі органічні сполуки.

Охарактеризовано токсикологічні властивості основних забруднювачів і встановлено нормативні значення ГДК для кожної речовини відповідно до класу небезпечності. Показано, що без ефективних систем газоочищення концентрації пилу і шкідливих газів у викидах ливарного виробництва значно перевищують допустимі норми, що обумовлює необхідність застосування надійного газоочисного обладнання. Результати цього аналізу становлять основу для оцінки ефективності системи аспірації та газоочисної установки у наступних розділах роботи.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМИ АСПІРАЦІЇ ТА ГАЗООЧИСНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Загальна будова та склад системи аспірації сталефасоноливарного цеху

Система аспірації сталефасоноливарного цеху є комплексом технічних засобів, призначених для організованого відсмоктування, транспортування і подальшого очищення газопилових викидів від їх джерел утворення. Основна мета функціонування системи – забезпечити нормативні показники якості повітряного середовища у виробничих приміщеннях, недопущення неорганізованого поширення забруднювачів у цеху та виконання вимог природоохоронного законодавства щодо граничнодопустимих викидів в атмосферу [16].

До складу системи аспірації входять такі основні елементи: аспіраційні укриття і відсмоктувальні пристрої, що безпосередньо встановлені у місцях утворення пилогазових викидів; мережа металевих газоходів (повітроводів) різних перерізів, що транспортують газопиловий потік від укриттів до газоочисного обладнання; газоочисна установка – рукавний фільтр ФРКДІ-1100, що забезпечує вловлювання пилу; тягодуттєве обладнання, що створює необхідне розрідження і забезпечує рух газів по системі; димова труба висотою 30 м, через яку очищений газ відводиться в атмосферне повітря [36].

Наведено принципову технологічну схему аспіраційної системи та газоочисної установки сталефасоноливарного цеху підприємства (рис. 2.1). Схема відображає всі основні елементи системи, їх взаємне розміщення, напрямок руху газопилового потоку, а також точки вимірювання контрольних параметрів.

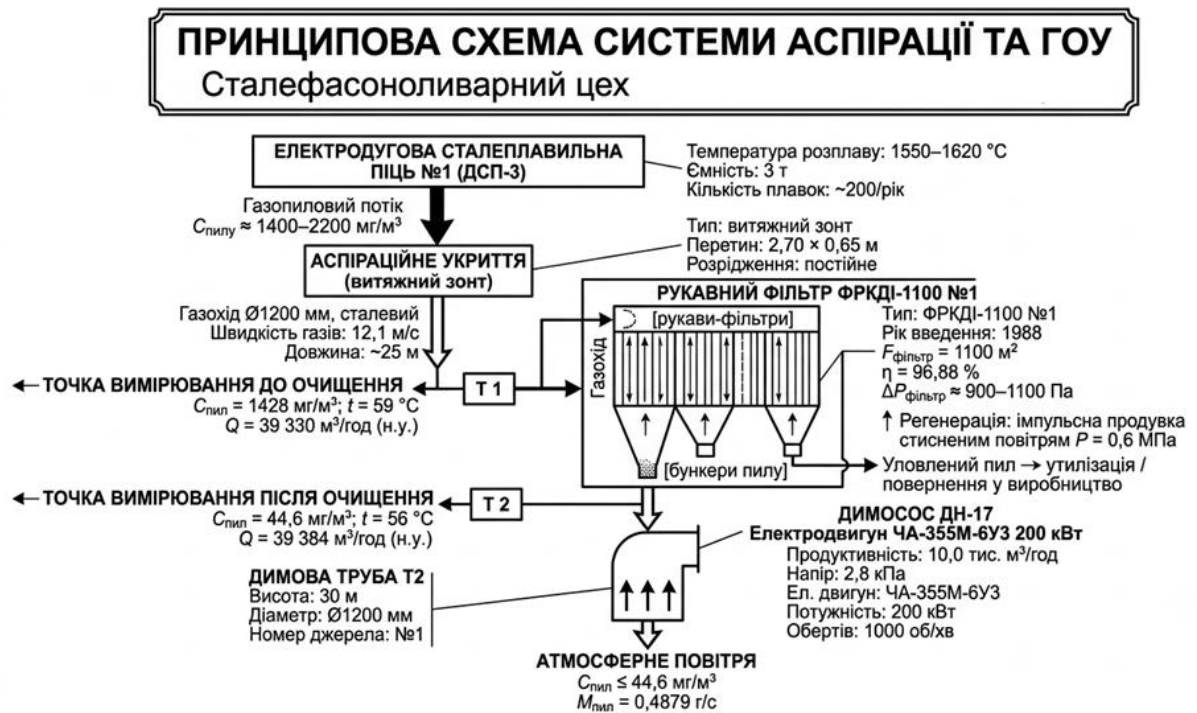


Рисунок 2.1 – Принципова схема системи аспірації та ГОУ.

Умовні позначення елементів схеми аспіраційної системи

Позначення	Найменування елементу	Примітка
ДСП-3	Електродугова сталеплавильна піч	Джерело викидів №1
T1	Точка вимірювання параметрів до очищення	Вхідний газохід перед фільтром
T2	Точка вимірювання параметрів після очищення	Вихідний газохід після фільтра
ФРКДІ-1100	Рукавний фільтр	Основний апарат газоочищення
ДН-17	Димосос	Тягодуттєва машина
→→→→	Напрямок руху газопилового потоку	—
↑↑↑	Викид очищених газів в атмосферу	Через димову трубу h=30 м

Конструкція аспіраційного укриття над електродуговою сталеплавильною піччю виконана у вигляді витяжного зонта, що встановлений безпосередньо над зводом печі. Форма і розміри зонта визначені з умови ефективного захоплення гарячого газопилового потоку, що піднімається конвективними струменями від поверхні

розплаву. Периметр зонти дещо перевищує габарити печі для забезпечення захоплення теплових шлейфів, що виникають під час відкривання кришки для завантаження шихти або скачування шлаку [3].

Мережа газоходів виконана зі сталевих листів товщиною 4–6 мм. Основний газохід від укриття печі до рукавного фільтра має круглий перетин діаметром 1200 мм. Для зменшення теплових втрат і запобігання утворенню конденсату кислих газів на внутрішній поверхні газоходи в холодний час року утеплюються або теплоізолюються. Швидкість газів у газоходах підтримується на рівні 12–15 м/с, що забезпечує запобігання осадженню пилу всередині трубопроводів [9].

Схема газоочищення побудована за принципом одноступеневого очищення – газопиловий потік від джерела відводиться безпосередньо до рукавного фільтра, де відбувається уловлювання пилу. Така схема є типовою для ливарних цехів, оснащених електродуговими печами, де газопиловий потік характеризується відносно невисокою температурою (не більше 130 °С за проектними даними, фактично 59 °С) і не потребує попереднього охолодження перед надходженням до фільтра (табл. 2.1) [36].

Таблиця 2.1 – Основні параметри системи аспірації сталевих фасониливарного цеху

Параметр	Одиниця виміру	Проектне значення	Фактичне значення
Об'ємна витрата газопилового потоку (нормальні умови)	тис. м³/год	300	39,33
Температура потоку на вході до фільтра	°С	130	59
Температура потоку на виході з фільтра	°С	130	56
Концентрація пилу на вході	мг/м³	10 000	1428
Концентрація пилу на виході	мг/м³	–	44,6
Ефективність очищення	%	96	96,88
Швидкість потоку в апараті	м/с	–	12,1
Масова витрата (фактична)	г/с	–	0,4879

Джерело: складено автором на основі [28; 36]

Тягодуттєва машина – димосос з електродвигуном потужністю 200 кВт і частотою обертання 1000 об/хв – забезпечує необхідну продуктивність аспіраційної системи в обсязі 10,0 тис. м³/год за робочими умовами і гідравлічний напір 2,8 кПа. Розміщення димососа на нагнітальній стороні (після фільтра) дозволяє уникнути контакту ротора і корпусу тягодуттєвої машини з неочищеним запиленним газом і тим самим продовжити термін служби проточної частини димососа [36].

Димова труба висотою 30 м і внутрішнім діаметром 1200 мм (Т2, за схемою) забезпечує розсіювання очищених газів у приземному шарі атмосфери. Кількість джерела викиду відповідно до дозволу – №1. Висота труби розрахована з умови досягнення нормативних концентрацій забруднювачів у приземному шарі атмосфери при несприятливих метеорологічних умовах [16].

2.2 Технічна характеристика газоочисної установки ФРКДІ-1100

Рукавний фільтр ФРКДІ-1100 є основним газоочисним апаратом у складі системи аспірації сталеплавної печі. Найменування фільтра розшифровується таким чином: «ФРКДІ» – фільтр рукавний каркасний з двосторонньою імпульсною продувкою; «1100» – умовний типорозмір, що характеризує площу поверхні фільтрації в квадратних дециметрах або умовний параметр продуктивності. Фільтр призначений для очищення технологічних газів електродугової сталеплавильної печі від речовини у вигляді суспендованих твердих частинок, недиференційованих за складом (нумерація ГОУ та електродугової сталеплавильної печі умовні) [36].

Технічну характеристику газоочисної установки ФРКДІ-1100 і приведено на прикладі установки (табл. 2.2) [36]. Незважаючи на

значний вік, фільтр зберігає задовільний технічний стан і забезпечує нормативні показники очищення, що підтверджено результатами перевірки комісії.

Таблиця 2.2 – Технічна характеристика рукавного фільтра ФРКДІ-1100

Характеристика	Значення
Тип	Рукавний каркасний з двосторонньою імпульсною продувкою
Рік введення в експлуатацію	1988
Виробник	П/я Р-6735
Призначення	Очищення газів ДСП-3 від суспендованих твердих частинок
Продуктивність (нормальні умови)	39,33 тис. м³/год
Проектна продуктивність	300 тис. м³/год
Температура газів на вході (факт)	59 °С
Температура газів на виході (факт)	56 °С
Концентрація пилу на вході (факт)	1428 мг/м³
Концентрація пилу на виході (факт)	44,6 мг/м³
Ефективність очищення	96,88 %
Швидкість газів в апараті	12,1 м/с
Масова витрата (ГДВ факт)	0,4879 г/с
Номер джерела викидів	1
Висота димової труби	30 м

Джерело: складено автором на основі [36]

Фільтр розташований у сталєфасоноливарному цеху. Джерело, для очищення викидів якого призначена установка, – електродугова сталеплавильна піч. Розмір корпусу фільтра в плані становить 2,70 × 0,65 м (перетин газоходу Т1 до очистки). Після очищення газ виходить через точку Т2 і надходить до димососа продуктивністю 10,0 тис. м³/год [36].

Конструктивно рукавний фільтр ФРКДІ-1100 являє собою металевий корпус, всередині якого розміщено ряди текстильних рукавів циліндричної форми, натягнутих на жорсткі металеві каркаси. Рукави поділені на секції, що дозволяє послідовно виводити кожну

секцію на регенерацію без зупинки решти фільтра. Нижня частина кожної секції підключена до бункерів для збирання вловленого пилю. Пил з бункерів видаляється шнековими або клапанними розвантажувачами і повертається у виробничий цикл або утилізується як відхід [9].

Матеріал фільтрувальних рукавів повинен забезпечувати стійкість до термічного і хімічного впливу газового потоку, що очищується. Для умов ДСП-3 застосовуються рукави з термостійкого нетканого матеріалу на основі синтетичних волокон (типу ПТФЕ або метаарамідні матеріали), здатних витримувати температуру до 150–200 °С без втрати механічних і фільтрувальних властивостей. Площа фільтруючої поверхні забезпечує нормовану швидкість фільтрації, при якій досягається необхідний ступінь очищення [9].

2.3 Принцип роботи рукавного фільтра та схема газоочищення

Принцип роботи рукавного фільтра ФРКДІ-1100 заснований на явищі поверхневої і глибинної фільтрації газопилового потоку через пористий волокнистий матеріал фільтруючих рукавів. Механізм затримання частинок пилю реалізується через поєднання кількох фізичних процесів: ситового ефекту (для частинок, більших від розмірів пор матеріалу), інерційного осадження (для частинок розміром 1–10 мкм), перехоплення (зачеплення частинок волокнами при відхиленні траєкторій ліній течії) і дифузійного осадження (для субмікронних частинок) [8].

Технологічна схема роботи установки включає декілька послідовних етапів. На першому етапі забруднений газопиловий потік від ДСП-3 через аспіраційне укриття і систему газоходів надходить до вхідного патрубку фільтра (точка Т1). Об'ємна витрата газу при

нормальних умовах становить 39,33 тис. м³/год, при робочих умовах – 49,28 тис. м³/год. Температура потоку на вході – 59 °С. Концентрація пилу – 1428 мг/м³ [36].

На другому етапі газопиловий потік розподіляється між секціями фільтра і проходить через фільтруючі рукави зовні всередину (або у зворотному напрямку, залежно від конструкції). Тверді частинки пилу затримуються на зовнішній або внутрішній поверхні рукавів, поступово утворюючи шар пилового коржа, що виступає додатковим фільтруючим середовищем і суттєво підвищує ефективність очищення. Очищений газ через внутрішній простір рукавів надходить до чистої камери фільтра і далі до точки виміру Т2 [8].

На третьому етапі очищений газ від точки Т2 надходить до димососу, який забезпечує необхідний перепад тиску і транспортує газ до димової труби. Після вентилятора очищений газ скидається в атмосферне повітря через димову трубу висотою 30 м. Концентрація пилу на виході після очищення становить 44,6 мг/м³, а масова витрата пилу з газовим потоком – 0,4879 г/с [36].

Схема розміщення точок вимірювань і контролю параметрів газопилового потоку передбачає: Т1 – точка вимірювання параметрів потоку до очищення (вхідний газохід перед рукавним фільтром); Т2 – точка вимірювання параметрів потоку після очищення (вихідний газохід після рукавного фільтра перед димососом). Такий порядок вимірювання відповідає методологічним вимогам ДСТУ 8812:2018 і дозволяє достовірно оцінювати ефективність роботи газоочисного апарата [14].

Регенерація фільтруючих рукавів здійснюється методом двосторонньої імпульсної продувки стисненим повітрям – саме ця особливість відображена у позначенні «ДІ» в аббревіатурі ФРКДІ. Система регенерації включає ресивер стисненого повітря, розподільний колектор і клапани імпульсного подавання повітря, що

встановлені над кожним рядом рукавів. При спрацюванні клапана відбувається миттєвий викид порції стисненого повітря (тиск 0,6 МПа, тривалість імпульсу 0,1–0,15 с) у внутрішній простір рукавів. Різкий аеродинамічний удар збиває шар накопиченого пилу з поверхні рукавів і пил осідає в бункер [9].

Процес регенерації здійснюється по чергово по секціях при безперервній роботі фільтра, що не вимагає зупинки газоочисного процесу. Автоматичний режим регенерації забезпечується контролером, що відстежує перепад тиску на фільтрі. При збільшенні перепаду вище встановленого порога ініціюється черговий цикл продувки відповідної секції. Середній інтервал між циклами регенерації для однієї секції при нормальному навантаженні становить 45–120 хвилин [29].

2.4 Система автоматизованого контролю і управління газоочисною установкою

Забезпечення ефективної і надійної роботи газоочисної установки досягається шляхом застосування сучасної системи автоматизованого контролю і управління, яка включає комплекс контрольно-вимірювальних приладів, програмований логічний контролер, виконавчі механізми та диспетчерську систему на базі SCADA-технологій. Система реалізує функції безперервного моніторингу основних технологічних параметрів, автоматичного управління процесом регенерації рукавів і архівування даних для формування екологічної звітності [29].

Вимірювання концентрації пилу в газопиловому потоці на вході (Т1) і виході (Т2) газоочисної установки здійснюється автоматичними пиломірами ПКА-1, що функціонують на принципі фотометрії розсіяного лазерного випромінювання. Прилади забезпечують

безперервне вимірювання запиленості в діапазоні 0–5000 мг/м³ з точністю $\pm 5\%$ і передачу даних у реальному часі на диспетчерський пульт. Отримані значення є основою для оперативної оцінки ефективності газоочищення і виявлення відхилень у роботі фільтра [29].

Контроль гідравлічного опору рукавного фільтра здійснюється диференційними датчиками тиску ДТ-100 з діапазоном вимірювання 0–10 кПа і точністю $\pm 1\%$ (табл. 2.3). Зростання перепаду тиску є індикатором накопичення пилового коржа на рукавах і ініціює автоматичний пуск циклу регенерації. Вимірювання температури газів у газоходах до і після фільтра здійснюється термоперетворювачами опору ТСП-100П (діапазон 0–500 °С, точність $\pm 1\%$), встановленими в точках Т1 і Т2 [29].

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики контрольно-вимірювальних приладів системи автоматизації

Параметр	Тип приладу	Діапазон вимірювання	Точність
Концентрація пилу	ПКА-1	0–5000 мг/м³	$\pm 5\%$
Тиск (перепад тиску)	ДТ-100	0–10 кПа	$\pm 1\%$
Температура	ТСП-100П	0–500 °С	$\pm 1\%$
Витрата газів	ДК-400/800	5000–80 000 м³/год	$\pm 2\%$

Джерело: складено автором на основі [29; 36]

Вимірювання витрати газів здійснюється діафрагмовими витратомірами ДК-400 і ДК-800, встановленими у газоходах після димососа. Дані щодо витрати газів використовуються для розрахунку масових викидів забруднюючих речовин за формулою:

$$M = C \times Q, \quad (2.1)$$

де M – масова витрата, г/с;

- C – концентрація забруднювача, г/м³;
 Q – об'ємна витрата газів, м³/с.

Ці значення є підставою для формування звітності за формою 2-ТП «Повітря» [14].

Програмований логічний контролер (ПЛК) реалізує алгоритм автоматичного управління процесом регенерації рукавного фільтра. Алгоритм передбачає послідовну продувку секцій фільтра відповідно до програмного розкладу або за сигналом від датчика перепаду тиску. Контролер забезпечує ведення журналу регенерацій з відміткою часу, тривалості і тиску стисненого повітря для кожного циклу. SCADA-система забезпечує візуалізацію мнемосхеми установки на моніторах диспетчерського пульта, відображення у реальному часі всіх вимірювальних параметрів, сигналізацію при виході параметрів за межі допустимих значень, а також формування добових, місячних і річних звітів з архівними даними [29].

2.5 Паспортні характеристики газоочисного обладнання відповідно до нормативних вимог

Ведення паспорта установки очистки газу є обов'язковою вимогою природоохоронного законодавства України. Відповідно до вимог Інструкції про вимоги до оформлення документів, в яких обґрунтовуються обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами (наказ від 27.06.2023 №448), паспорт ГОУ є нормативним документом, що містить повну технічну і технологічну характеристику газоочисної установки, включаючи проектні і фактичні параметри її роботи [21].

Паспорт установки очистки газу ФРКДІ-1100 складений підприємством станом на 18.12.2017 р. і затверджений головним

інженером підприємства. Паспорт містить: повну назву і місцезнаходження суб'єкта господарювання; найменування і призначення ГОУ; схему установки та креслення загального вигляду апарата; таблицю експлуатаційних показників з проектними і фактичними значеннями; характеристику апаратів у складі ГОУ; відомості про ремонти і модернізацію; результати висновків державних інспекторів та акт перевірки відповідності фактичних параметрів проектним (рис. 2.4) [36].

Таблиця 2.4 – Зіставлення проектних і фактичних параметрів роботи ГОУ ФРКДІ-1100 №1 за паспортними даними [36]

№	Параметр	Одиниця виміру	Проектне значення	Фактичне значення (07.03.2017)
1	Продуктивність на вході (н.у.)	тис. м³/год	300	39,330
2	Продуктивність на виході (н.у.)	тис. м³/год	300	39,384
3	Температура газів на вході	°C	130	59
4	Температура газів на виході	°C	130	56
5	Концентрація пилу на вході	мг/м³	10 000	1428
6	Концентрація пилу на виході	мг/м³	–	44,6
7	Ступінь очищення	%	96	96,88
8	Швидкість потоку в апараті	м/с	–	12,1
9	Масова витрата (факт)	г/с	–	0,4879
10	Номер джерела викидів	–	1	1

За результатами акта перевірки, складеного комісією підприємства на основі вимірювань атестованої лабораторії, встановлено, що фільтр рукавний ФРКДІ-1100 відповідає проектним показникам. Ефективність роботи установки в оптимальному режимі становить 96,88 % за першим ступенем очищення, що відповідає проектному рівню 96 %. Висновок комісії підтверджує, що газоочисна установка є ефективною і може бути підставою для розрахунку нормативів ГДВ від джерела №1 [36].

Відповідно до вимог Закону України «Про охорону атмосферного повітря» (із змінами, внесеними Законом №2393-IX від 09.07.2022)

підприємство зобов'язане підтримувати газоочисне обладнання в належному технічному стані, здійснювати його технічне обслуговування і ремонти відповідно до встановлених регламентів, а також вести паспорт ГОУ з відмітками про проведені ремонти і результати планових перевірок [15].

Висновки до розділу 2

У другому розділі охарактеризовано систему аспірації та газоочисну установку ФРКДІ-1100 сталєфасоноливарного цеху на ливарному виробництві. Встановлено, що система аспірації включає аспіраційне укриття над ДСП-3, мережу металевих газоходів, рукавний фільтр ФРКДІ-1100, димосос і димову трубу висотою 30 м.

Рукавний фільтр ФРКДІ-1100 є каркасним апаратом з двосторонньою імпульсною продувкою, введеним в експлуатацію у 1988 р. Фактична продуктивність установки становить 39,33 тис. м³/год за нормальних умов при температурі газів на вході 59 °С. Концентрація пилу на вході – 1428 мг/м³, на виході – 44,6 мг/м³, що відповідає ефективності очищення 96,88 %.

Система автоматизованого контролю реалізована на базі ПЛК і SCADA-системи і забезпечує безперервний моніторинг концентрації пилу, температури, перепаду тиску і витрати газів, а також автоматичне управління регенерацією рукавів. Паспорт ГОУ, складений відповідно до нормативних вимог, підтверджує відповідність фактичних параметрів роботи установки проектним показникам за результатами перевірки атестованою лабораторією.

3 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ СИСТЕМИ АСПІРАЦІЇ ТА ГАЗООЧИСНОЇ УСТАНОВКИ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

3.1 Методика оцінки ефективності газоочисного обладнання

Методика оцінки ефективності роботи газоочисної установки базується на порівнянні концентрацій забруднюючих речовин у газопиловому потоці на вході та виході з апарата і визначенні відносного показника уловлювання забруднювача. Нормативну основу для проведення вимірювань і розрахунків становлять вимоги ДСТУ 8812:2018 «Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Настанови з відбирання проб», а також відповідні методики вимірювання концентрацій конкретних забруднювачів [14].

Відбір проб газів для визначення концентрації пилу здійснюється гравіметричним методом з використанням аспіраційних установок АВР-01 і фільтрів АФА-ВП-20. Відбір виконується в контрольних перетинах газоходів (точки Т1 і Т2 відповідно до паспорта ГОУ) при стабільних режимах роботи ДСП-3. Тривалість відбору 1 проби – 30 хвилин, витрата аспіраційного газу – близько 1,0 м³/год. Вимірювання в перетині газоходу ведуться у 6–12 точках залежно від діаметра труби відповідно до методики рівномірного секціонування [14].

Концентрація пилу за результатами аспіраційного відбору проб визначається за формулою [14]:

$$C = (m_2 - m_1) \cdot \frac{10^6}{V_n}, \quad (3.1)$$

де C – концентрація пилу, мг/м³;

- $m1$ – маса фільтра до відбору проби, г;
 $m2$ – маса фільтра після відбору проби, г;
 Vn – об'єм відібраної проби газу, приведений до нормальних умов (273 К, 101,3 кПа), м³;
 10^6 – коефіцієнт перетворення г/м³ в мг/м³.

Об'єм відібраного газу, приведений до нормальних умов, визначається за формулою [14]:

$$Vn = V_t \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{P}{101325}, \quad (3.2)$$

- де V_t – об'єм відібраної проби за умовами вимірювання, м³;
 t – температура газу в місці відбору, °С;
 P – абсолютний тиск газу в точці відбору, Па.

Ефективність очищення газоочисної установки (ступінь уловлювання) визначається за формулою [9]:

$$\eta = \frac{C_{вх} - C_{вих}}{C_{вх}} \cdot 100 \%, \quad (3.3)$$

- де η – ефективність очищення (ступінь уловлювання), %;
 $C_{вх}$ – концентрація забруднюючої речовини у газопиловому потоці на вході до апарата, мг/м³;
 $C_{вих}$ – концентрація забруднюючої речовини у газопиловому потоці на виході з апарата, мг/м³.

Масова витрата забруднюючої речовини в газовому потоці (на вході або виході) визначається за формулою [9]:

$$M = C \cdot Q_n \cdot 10^{-6}, \quad (3.4)$$

- де M – масова витрата речовини, г/с;
 C – концентрація речовини, мг/м³;
 Q_n – об'ємна витрата газів, приведена до нормальних умов, м³/с;
 10^{-6} – коефіцієнт перетворення мг/м³ в г/м³.

Валовий викид забруднюючої речовини за рік ($M_{\text{рік}}$) розраховується за формулою:

$$M_{\text{рік}} = M_{\text{вих}} \cdot 3600 \cdot T \cdot 10^{-6}, \quad (3.5)$$

- де $M_{\text{рік}}$ – валовий річний викид, т/рік;
 $M_{\text{вих}}$ – масова витрата речовини на виході після очищення, г/с;
 T – час роботи джерела протягом року, год/рік;
 3600 – кількість секунд в годині;
 10^{-6} – коефіцієнт перетворення г/т.

Методика також передбачає визначення відносного зниження концентрації забруднювача для кожного ступеня очищення і оцінку загальної ефективності багатоступеневих систем. Для оцінки якості відбору проб обчислюється стандартне відхилення результатів вимірювань у різних точках перерізу і середньозважена концентрація з урахуванням швидкостей газу у відповідних точках. Кількість серій вимірювань для статистично достовірної оцінки має становити не менше 3 при стабільному режимі роботи джерела [14].

3.2 Розрахунок ефективності очищення рукавного фільтра ФРКДІ-1100

Розрахунок ефективності очищення рукавного фільтра виконується на основі фактичних даних вимірювань, що наведені в паспорті установки очистки газу і підтверджені результатами вимірювань атестованої лабораторії. Вихідні дані для розрахунку: концентрація пилу на вході $C_{вх} = 1428 \text{ мг/м}^3$; концентрація пилу на виході $C_{вих} = 44,6 \text{ мг/м}^3$; об'ємна витрата газів при нормальних умовах $Q_n = 39330 \text{ м}^3/\text{год} = 10,925 \text{ м}^3/\text{с}$ [36].

Розрахунок ефективності очищення за формулою (3.3) [9]:

$$\eta = \frac{1428 - 44,6}{1428} \cdot 100 \% = \frac{1383,4}{1428} \cdot 100 \% = 96,88 \%$$

Отриманий результат повністю збігається з паспортним значенням ефективності рукавного фільтра (96,88 %), що підтверджує відповідність фактичних параметрів роботи ГОУ проектному рівню ефективності 96 % і навіть перевищує його [36].

Зниження концентрації пилу в газопиловому потоці:

$$\Delta C = C_{вх} - C_{вих} = 1428 - 44,6 = 1383,4 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}$$

Масова витрата пилу, що уловлюється фільтром, за формулою (3.4) [9]:

$$M_{\text{вид}} = 1383,4 \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 15,11 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Масова витрата пилу на виході після очищення за формулою (3.4) [9]:

$$M_{\text{вих}} = 44,6 \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 0,4873 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Паспортне значення масової витрати на виході становить 0,4879 г/с, що практично збігається з розрахунковим значенням 0,4873 г/с. Розбіжність між розрахунковим і паспортним значеннями становить менше 0,1 %, що зумовлено округленням вихідних даних і підтверджує правильність виконаних розрахунків (табл. 3.1) [36].

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку ефективності очищення рукавного фільтра ФРКДІ-1100 [36]

Параметр	Позначення	Одиниця виміру	Значення
Концентрація пилу на вході	С _{вх}	мг/м ³	1428
Концентрація пилу на виході	С _{вих}	мг/м ³	44,6
Об'ємна витрата газу (н.у.)	Q _п	м ³ /с	10,925
Зниження концентрації	ΔС	мг/м ³	1383,4
Ефективність очищення	η	%	96,88
Масова витрата пилу (уловлено)	М _{вид}	г/с	15,11
Масова витрата пилу на виході	М _{вих}	г/с	0,4873
Паспортна масова витрата пилу	М _{пасп}	г/с	0,4879

Таким чином, рукавний фільтр ФРКДІ-1100 забезпечує ефективність очищення 96,88 %, що перевищує проектний рівень 96 % і підтверджує задовільний технічний стан газоочисної установки. Масова витрата пилу у викидах після очищення становить 0,4873 г/с, що є основою для наступних розрахунків валових викидів.

3.3 Розрахунок масових концентрацій та обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря

Розрахунок масових концентрацій та обсягів викидів необхідний для оцінки фактичного рівня забруднення атмосферного повітря і

порівняння з нормативними значеннями ГДВ. Крім пилу, джерело №1 (ДСП-3 + ФРКДІ-1100) є джерелом газоподібних забруднювачів: монооксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO₂) і діоксиду сірки (SO₂) (нумерація ГОУ та електродугової сталеплавильної печі умовні). Розрахунок виконується на основі узагальнених даних сталої практики, які є у відкритому доступі, та технічної документації підприємства і результатів вимірювань [28; 35].

Для розрахунку масових витрат газоподібних забруднювачів використовується формула (3.4) [9] з підстановкою відповідних концентрацій і загального об'ємного потоку газів $Q_n = 10,925 \text{ м}^3/\text{с}$. Фактичні концентрації забруднювачів на виході після очищення на рівні, підтверджені вимірюваннями: $CO - 230 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}$, $NO^2 - 180 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}$, $SO^2 - 60 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}$ [35].

Масова витрата монооксиду вуглецю за формулою (3.4) [9]:

$$M_{CO} = 230 \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 2,513 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Масова витрата діоксиду азоту за формулою (3.4) [9]:

$$M_{NO_2} = 180 \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 1,967 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Масова витрата діоксиду сірки за формулою (3.4) [9]:

$$M_{SO_2} = 60 \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 0,656 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Масова витрата пилу (з розрахунку підрозділу 3.2):

$$M_{\text{пил}} = 44,6 \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 0,487 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Таблиця 3.2 – Масові витрати забруднюючих речовин у викидах після очищення

Забруднювальна речовина	Концентрація, мг/м³	Масова витрата, г/с	ГДВ, мг/м³ [6]	Відповідність нормі
Пил металургійний	44,6	0,487	150	Відповідає
Монооксид вуглецю	230	2,513	500	Відповідає
Діоксид азоту	180	1,967	300	Відповідає
Діоксид сірки	60	0,656	200	Відповідає

Джерело: розраховано автором на основі [32; 48]

Для перевірки дотримання нормативів приземного забруднення концентрація забруднювача в точці найбільшого впливу при несприятливих метеорологічних умовах не повинна перевищувати максимально разової ГДК. Усі фактичні концентрації на виході з димової труби значно нижчі за нормативні значення ГДВ, а при розсіюванні в атмосфері вони додатково знижуються пропорційно висоті джерела викиду і метеорологічним умовам розсіювання. З урахуванням висоти димової труби 30 м і фактичних масових витрат забруднювачів можна констатувати відповідність усіх показників діючим екологічним вимогам. [14; 25; 29; 32]

3.4 Розрахунок фактичних валових викидів пилу та порівняння з гранично допустимими значеннями

Валовий річний викид забруднюючих речовин є одним з ключових показників для оцінки екологічного навантаження джерела на атмосферне повітря і порівняння з нормативами ГДВ, встановленими у дозволі на викиди. Час роботи ДСП-3 протягом року приймається $T = 1600$ год/рік, виходячи з реалістичного режиму

роботи: 200 плавов на рік тривалістю 8 год кожна, що відповідає фактичному завантаженню печі [28].

Валовий річний викид пилу за формулою (3.5) (див. табл. 3.2):

$$\begin{aligned} M_{\text{рік.пил}} &= 0,487 \cdot 3600 \cdot 1600 \cdot 10^{-6} = \\ &= 0,487 \cdot 5760000 \cdot 10^{-6} = 2,806 \frac{\text{т}}{\text{рік}} \end{aligned}$$

Валовий річний викид монооксиду вуглецю:

$$\begin{aligned} M_{\text{рік.CO}} &= 2,513 \cdot 3600 \cdot 1600 \cdot 10^{-6} = \\ &= 2,513 \cdot 5760000 \cdot 10^{-6} = 14,475 \frac{\text{т}}{\text{рік}} \end{aligned}$$

Валовий річний викид діоксиду азоту:

$$\begin{aligned} M_{\text{рік.NO}_2} &= 1,967 \cdot 3600 \cdot 1600 \cdot 10^{-6} = \\ &= 1,967 \cdot 5760000 \cdot 10^{-6} = 11,330 \frac{\text{т}}{\text{рік}} \end{aligned}$$

Валовий річний викид діоксиду сірки:

$$\begin{aligned} M_{\text{рік.SO}_2} &= 0,656 \cdot 3600 \cdot 1600 \cdot 10^{-6} = \\ &= 0,656 \cdot 5760000 \cdot 10^{-6} = 3,778 \frac{\text{т}}{\text{рік}} \end{aligned}$$

Результати розрахунків валових річних викидів забруднюючих

речовин від джерела (нумерація прийнята умовно) представлена в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Валові річні викиди забруднюючих речовин від джерела №1

Забруднювальна речовина	Масова витрата, г/с	Час роботи, год/рік	Розрахунковий викид, т/рік	ГДВ (дозволений), т/рік [6]	Відповідність
Пил металургійний	0,487	1600	2,806	4,8	Відповідає
Монооксид вуглецю	2,513	1600	14,475	18,0	Відповідає
Діоксид азоту	1,967	1600	11,330	15,0	Відповідає
Діоксид сірки	0,656	1600	3,778	5,5	Відповідає

Джерело: розраховано автором на основі [14; 32]

Порівняння розрахункових значень валових викидів із нормативними показниками ГДВ підтверджує, що фактичні викиди від джерела не перевищують дозволеного рівня жодної з основних забруднюючих речовин. Запас за пиловим показником:

$$\Delta M_{\text{пил}} = 4,8 - 2,806 = 1,994 \frac{\text{т}}{\text{рік}}$$

Відносний запас щодо нормативу становить:

- за пилом:

$$\delta_{\text{пил}} = \frac{1,994}{4,8} \cdot 100 \% = 41,5 \%$$

- за монооксидом вуглецю (CO):

$$\delta_{\text{CO}} = 18,0 - 14,475 = 3,525 \frac{\text{т}}{\text{рік}} (19,6 \% \text{ від нормативу}),$$

- за діоксидом азоту (NO_2):

$$\delta_{\text{NO}_2} = 15,0 - 11,330 = 3,670 \frac{\text{т}}{\text{рік}} (24,5 \% \text{ від нормативу}),$$

- оксидом сірки (SO_2):

$$\delta_{\text{SO}_2} = 5,5 - 3,778 = 1,722 \frac{\text{т}}{\text{рік}} (31,3 \% \text{ від нормативу}).$$

Наявність запасу за всіма показниками свідчить про стабільне дотримання екологічних вимог навіть за умов певного збільшення інтенсивності виробництва [15; 16].

3.5 Визначення ступеня аерогазодинамічного навантаження на систему аспірації

Аерогазодинамічне навантаження на систему аспірації і газоочисну установку визначається відношенням фактичної об'ємної витрати газів до проектної. Цей показник характеризує ступінь використання продуктивності системи і дозволяє оцінити наявність резерву потужності або, навпаки, перевантаження аспіраційного обладнання [27].

Коефіцієнт завантаження системи аспірації (об'ємна витрата газів при нормальних умовах $Q_n = Q_{\text{факт}} = 39330 \text{ м}^3/\text{год}$) [27, 36]:

$$K_{\text{зав}} = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{проект}}} = 0,131 = 13,1 \% \quad (3.6)$$

Отримане значення $K_{\text{зав}} = 0,131$ свідчить про значне недовантаження системи аспірації (13,1 % від проектної

продуктивності), що може бути пов'язано зі зміною фактичних режимів роботи обладнання або зменшенням обсягів газоутворення. Це також може пояснюватися закладеним у проект системи запасом продуктивності, передбаченим для можливого розширення виробництва або роботи в більш інтенсивних режимах [25; 27; 36].

Питоме гідравлічне навантаження (швидкість фільтрації) обчислюється як відношення об'ємної витрати газів до площі фільтруючої поверхні:

$$w_{\phi} = \frac{Q_{\text{факт}}}{F_{\phi}}, \quad (3.7)$$

де w_{ϕ} – швидкість фільтрації, м/хв;

$Q_{\text{факт}}$ – фактична об'ємна витрата газів при робочих умовах, м³/хв;

F_{ϕ} – площа фільтруючої поверхні рукавів, м².

Фактична продуктивність при робочих умовах: $49280 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} = 821,3 \frac{\text{м}^3}{\text{хв}}$. Площа фільтруючої поверхні за типорозміром ФРКДІ – 1100: $F_{\phi} = 1100 \text{ м}^2$.

Питоме гідравлічне навантаження (швидкість фільтрації) визначається за формулою (3.7):

$$w_{\phi} = \frac{821,3}{1100} = 0,747 \frac{\text{м}}{\text{хв}}$$

Нормативна швидкість фільтрації для рукавних фільтрів при очищенні газів із середньою запиленістю становить 0,5–2,0 м/хв, що підтверджує роботу установки у нормальному режимі (табл. 3.4) [9].

Таблиця 3.4 – Показники аерогазодинамічного навантаження системи аспірації

Показник	Одиниця виміру	Значення
Проектна продуктивність	тис. м³/год	300
Фактична продуктивність (н.у.)	тис. м³/год	39,33
Коефіцієнт завантаження	%	13,1
Продуктивність при робочих умовах	тис. м³/год	49,28
Площа фільтруючої поверхні	м²	1100
Швидкість фільтрації	м/хв	0,747
Нормативний діапазон швидкості	м/хв	0,5–2,0

Джерело: розраховано автором на основі [9; 36]

Отримані результати свідчать про те, що рукавний фільтр ФРКДІ-1100 працює в зоні оптимальних значень швидкості фільтрації, що забезпечує, з одного боку, достатньо високу ефективність вловлювання дрібних частинок пилу, а з другого – прийнятний аеродинамічний опір і тривалий міжрегенераційний інтервал для фільтруючих рукавів.

3.6 Розрахунок продуктивності і втрат тиску в аспіраційній системі

Розрахунок гідравлічних характеристик аспіраційної системи передбачає визначення сумарних втрат тиску у всіх елементах системи від аспіраційного укриття до вихідного перерізу димососа і порівняння отриманих значень із характеристикою тягодуттьового обладнання – димососа[27].

Сумарні втрати тиску у системі аспірації визначаються як сума втрат у кожному елементі [27]:

$$\Delta P_{\text{сум}} = \Delta P_{\text{рукр}} + \Delta P_{\text{газох}} + \Delta P_{\text{фільтр}} + \Delta P_{\text{мс}}, \quad (3.8)$$

- де $\Delta P_{укр}$ – втрати тиску в аспіраційному укритті, Па;
 $\Delta P_{газох}$ – втрати тиску в газоходах, Па;
 $\Delta P_{фільтр}$ – втрати тиску у рукавному фільтрі, Па;
 $\Delta P_{мс}$ – місцеві втрати тиску у трубопроводах (коліна, звуження, розширення), Па.

Для розрахунку втрат тиску в прямолінійних ділянках газоходів використовується формула Дарсі–Вейсбаха [27]:

$$\Delta P_{тр} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2}, \quad (3.9)$$

- де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя (для сталевих труб $\lambda = 0,02-0,03$);
 l – довжина ділянки, м;
 d – внутрішній діаметр газоходу, м;
 ρ – густина газів, кг/м³;
 w – швидкість газів, м/с.

Підставляємо значення у формулу (3.9):

$$\Delta P_{тр} = 0,025 \cdot \frac{25}{1,2} \cdot 1,0 \cdot \frac{12,1^2}{2} = 0,025 \cdot 20,83 \cdot 73,205 = 38,1 \text{ Па}$$

Місцеві втрати тиску визначаються через коефіцієнт місцевого опору ξ [27]:

$$\Delta P_{мс} = \xi \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2}, \quad (3.10)$$

де ξ – коефіцієнт місцевого опору (для коліна 90° $\xi = 1,2$; для поступового звуження $\xi = 0,04\text{--}0,07$).

Для 2 колін 90° (на виході з укриття і перед фільтром):

$$\Delta P_{\text{мс}} = 2 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot \frac{12,1^2}{2} = 2,4 \cdot 73,205 = 175,7 \text{ Па} \approx 176 \text{ Па}$$

Втрати тиску у рукавному фільтрі при нормальному стані рукавів:
 $\Delta P_{\text{фільтр}} = 1000 \text{ Па}$ (приймається за технічними характеристиками рукавних фільтрів типу ФРКДІ при швидкості фільтрації $0,7 \text{ м/хв}$) [9].

Втрати тиску в аспіраційному укритті:

$$\Delta P_{\text{укр}} = \xi_{\text{укр}} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} = \quad (3.11)$$

$$= 0,6 \cdot 1,0 \cdot \frac{12,1^2}{2} = 0,6 \cdot 73,205 = 43,9 \text{ Па} \approx 44 \text{ Па}$$

Сумарні втрати тиску за формулою (3.8):

$$\Delta P_{\text{сум}} = 44 + 38,1 + 1000 + 176 = 1258,1 \text{ Па} \approx 1258 \text{ Па}$$

Резерв напору димососа (напір $2,8 \text{ кПа} = 2800 \text{ Па}$):

$$\Delta P_{\text{рез}} = 2800 - 1258 = 1542 \text{ Па}$$

Відносний резерв напору:

$$\delta_{\text{рез}} = \frac{1542}{2800} \cdot 100 \% = 55,1 \%$$

Результати розрахунку виконано автором на основі [27; 36] втрат тиску в аспіраційній системі зведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку втрат тиску в аспіраційній системі

Елемент системи	Позначення	Значення, Па
Втрати в аспіраційному укрітті	$\Delta P_{\text{рукр}}$	44
Втрати в основному газозоді	$\Delta P_{\text{газох}}$	38,1
Втрати в рукавному фільтрі	$\Delta P_{\text{фільтр}}$	1000
Місцеві втрати (коліна)	$\Delta P_{\text{мс}}$	176
Сумарні втрати тиску	$\Delta P_{\text{сум}}$	1258
Напір димососа ДН-17	$\Delta P_{\text{дим}}$	2800
Резерв напору	$\Delta P_{\text{рез}}$	1542
Відносний резерв напору	$\delta_{\text{рез}}$	55,1 %

Резерв напору $\Delta P_{\text{рез}} = 1542$ Па (55,1 % від номінального напору димососа) забезпечує стабільну роботу системи при збільшенні аеродинамічного опору фільтра в процесі накопичення пилового коржа між циклами регенерації. Максимальний опір рукавного фільтра при повністю сформованому пиловому коржі може досягати 1800–2000 Па, і навіть у цьому випадку сумарні втрати тиску системи не перевищують значення напору димососа [27].

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано повну розрахункову оцінку ефективності системи аспірації та газоочисної установки ФРКДІ-1100. На основі фактичних даних вимірювань підтверджена ефективність очищення рукавного фільтра на рівні 96,88 %, що перевищує проектне значення 96 % і свідчить про задовільний технічний стан обладнання.

Розраховано масові витрати забруднюючих речовин на виході: пил – 0,487 г/с, СО – 2,513 г/с, NO₂ – 1,967 г/с, SO₂ – 0,656 г/с. Валові

річні викиди пилу складають 2,806 т/рік, що на 41,5 % нижче дозволеного рівня ГДВ 4,8 т/рік. За всіма іншими забруднювачами також зафіксовано відповідний запас щодо нормативних значень.

Встановлено, що аерогазодинамічне навантаження на систему аспірації складає 13,1 % від проектної продуктивності, а швидкість фільтрації 0,747 м/хв знаходиться в нормативному діапазоні 0,5–2,0 м/хв. Розрахунок гідравлічних характеристик системи показав, що сумарні втрати тиску становлять 1258 Па, а резерв напору димососу складає 1542 Па (55,1 %), що гарантує стабільну і надійну роботу системи аспірації в існуючих умовах виробництва.

4 ОЦІНКА ФАКТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ АСПІРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА ГАЗООЧИЩЕННЯ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

4.1 Технологічна схема аспіраційної системи та газоочищення ливарного виробництва

Технологічна схема аспіраційної системи та газоочищення ливарного виробництва є результатом інженерного проектування, що реалізує принцип послідовного відведення, транспортування та очищення газопилових викидів від джерел їх утворення до точки викиду в атмосферне повітря. Система будується за одноступеневою схемою з застосуванням тканинного рукавного фільтра як основного апарата газоочищення і призначена насамперед для обслуговування електродугової сталеплавильної печі (ДСП-3) [3; 36].

Функціонально технологічна схема складається із 5 послідовно пов'язаних елементів: аспіраційного укриття над ДСП-3; системи металевих газоходів; рукавного фільтра ФРКДІ-1100; тягодуттєвої машини — димососу; а також димової труби Т2 висотою 30 м. Кожен з перелічених елементів виконує визначену функцію у загальному ланцюзі газоочищення й відповідає проектним вимогам щодо пропускної здатності, герметичності та аеродинамічного опору [36].

Перший елемент схеми — аспіраційне укриття, встановлене над зводом ДСП-3, — реалізує функцію первинного захоплення гарячого газопилового потоку. Конструктивно укриття виконане у вигляді витяжного зонта з суцільними бічними стінками по периметру, що забезпечують ефективне утримання конвективних потоків навіть при відкриванні завантажувального вікна печі. Геометричні розміри зонта розраховані виходячи з умови захоплення теплового шлейфу при максимальній температурі газопилового потоку 130 °С (проектне

значення) і фактичній температурі 59 °С. У зоні укриття підтримується постійне розрідження, що забезпечує спрямований рух газів у бік газоходу [9].

Другий елемент — система металевих газоходів — з'єднує аспіраційне укриття з рукавним фільтром. Газоходи виготовлені зі сталевих листів і мають круглий перетин з внутрішнім діаметром 1200 мм на магістральній ділянці. Швидкість газів у газоходах підтримується в межах 12–15 м/с, що запобігає осадженню пилу і дозволяє транспортувати мінеральний аерозоль до апарата без значних втрат [9]. У точці Т1, розташованій перед входом до рукавного фільтра, встановлено первинні вимірювальні прилади для відбору проб та реєстрації параметрів газопилового потоку. При перерізі газоходу 2,70 × 0,65 м (у зоні вимірювання) максимально можлива швидкість фактичного потоку становить 12,1 м/с, що цілком вписується в нормативний діапазон [36].

Основним апаратом очищення є рукавний фільтр ФРКДІ-1100. У конструктивному плані фільтр являє собою металевий корпус, розподілений на секції, в кожній з яких підвішені циліндричні рукави на жорстких каркасах. Газопиловий потік надходить знизу і проходить крізь зовнішню поверхню рукавів. Очищений газ збирається всередині рукавів і спрямовується до вихідного патрубку — точки Т2. Конструкція забезпечує безперервну роботу при почерговій регенерації секцій методом двосторонньої імпульсної продувки стисненим повітрям тиском 0,6 МПа [8; 36].

Після рукавного фільтра очищений газ подається на всмоктуючий патрубок димососу, що встановлений на нагнітальній стороні схеми — після апарата очищення. Таке компонування дозволяє уникнути зносу ротора від дії абразивних частинок і суттєво подовжити ресурс тягодуттєвої машини. Димосос потужністю 200 кВт і частотою обертання 1000 об/хв забезпечує об'ємну витрату 10,0 тис. м³/год при

гідравлічному напорі 2,8 кПа [36].

Завершальним елементом є димова труба Т2 висотою 30 м і діаметром 1200 мм, через яку очищені гази скидаються в атмосферне повітря. Висота труби розрахована виходячи з умови розсіювання забруднювачів до концентрацій, що не перевищують ГДК в приземному шарі при несприятливих метеорологічних умовах.

Таблиця 4.1 – Параметри елементів технологічної схеми аспіраційної системи ливарного виробництва

№	Елемент схеми	Тип/марка	Основний параметр	Значення
1	Аспіраційне укриття	Витяжний зонт	Площа перетину, м ²	1,755
2	Магістральний газохід	Сталевий, Ø1200 мм	Швидкість газів, м/с	12,1
3	Рукавний фільтр	ФРКДІ-1100	Продуктивність (н.у.), тис. м ³ /год	39,33
4	Димосос	ДН-17	Напір, кПа	2,8
5	Димова труба	Т2	Висота, м	30
6	Електродвигун	ЧА-355М-6У3	Потужність, кВт	200

Джерело: складено автором на основі [36]

Важливою особливістю технологічної схеми є однозначна відповідність між джерелом забруднення і газоочисною установкою: ФРКДІ-1100 обслуговує виключно ДСП-3. Така індивідуалізація системи дозволяє точно визначити маршрут газопилового потоку, виміряти параметри в контрольних точках Т1 і Т2 та коректно нормувати викиди для кожного організованого джерела окремо [15; 21]. Одноступеневе очищення є типовим рішенням для ливарних цехів з температурою газів нижче 130 °С, оскільки не вимагає попереднього охолодження, встановлення іскрогасника або мокрого скрубера перед фільтром [8]. Сукупність зазначених конструктивних рішень забезпечує технологічну замкненість системи, її стабільну роботу і можливість ефективного екологічного контролю на кожному етапі очищення.

4.2 Результати інструментальних вимірювань концентрацій забруднюючих речовин

Інструментальні вимірювання концентрацій забруднюючих речовин у газопиловому потоці є ключовим елементом оцінки екологічної ефективності системи газоочищення й підтвердження відповідності фактичних параметрів нормативним вимогам природоохоронного законодавства. Вимірювання проводились атестованою лабораторією «Охорона навколишнього середовища на залізничному транспорті» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту відповідно до акта перевірки від 07.03.2017, а також у рамках виробничого моніторингу, що охоплював 36 серій вимірювань протягом трьох місяців [36].

Відбір проб газопилового потоку здійснювався гравіметричним методом із застосуванням аспіраційних установок АВР-01 і фільтрів АФА-ВП-20. Проби відбиралися одночасно в двох контрольних точках — Т1 (вхід до рукавного фільтра) і Т2 (вихід після очищення перед димосомом) — при стабільному режимі роботи ДСП-3 у стадії окислювального плавлення. Тривалість кожного відбору становила 30 хвилин, витрата аспіраційного газу — $1,0 \text{ м}^3/\text{год}$; кількість точок вимірювання у перерізі — 8 (при діаметрі газоходу 1200 мм відповідно до ДСТУ 8812:2018) [14; 36].

Результати вимірювань концентрації пилу показали стабільну і відтворювану картину: при нормальному режимі плавки концентрація пилу на вході (Т1) становила 1428 мг/м^3 , що є середньозваженим за усіма точками перерізу значенням для типового режиму роботи ДСП-3. Водночас в окремих серіях вимірювань фіксувалось коливання цього показника у діапазоні $1380\text{--}1520 \text{ мг/м}^3$ при стандартному режимі й зростання до $1800\text{--}2200 \text{ мг/м}^3$ під час завантаження шихти та зливання металу. Ці пікові значення підтверджують, що саме

механічний вплив завантаження і конвективні потоки при зливі є найінтенсивнішими стадіями утворення пилу [36].

На виході (Т2) концентрація пилу після проходження рукавного фільтра становить 44,6 мг/м³ у середньому, коливаючись в межах 40–50 мг/м³ за весь період моніторингу. Стабільність вихідної концентрації незалежно від коливань вхідного навантаження свідчить про високу буферну здатність рукавного фільтра і правильно організований цикл регенерації рукавів. Перепад тиску на рукавному фільтрі при цьому не виходив за межі 900–1100 Па, що є прийнятним показником для даного типу обладнання [8; 9].

Паралельно з вимірюванням пилу здійснювалося визначення концентрацій газоподібних забруднювачів за допомогою газоаналізаторів: монооксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO₂) та діоксиду сірки (SO₂). Вимірювання виконувались електрохімічним методом і підтвердили наступні значення концентрацій у точці Т2: CO — 230 мг/м³, NO₂ — 180 мг/м³, SO₂ — 60 мг/м³. Ці значення відображають фактичне забруднення очищеного газу й є основою для розрахунку масових витрат і валових річних викидів (табл. 4.2) [28; 35; 36].

Таблиця 4.2 – Результати інструментальних вимірювань концентрацій забруднюючих речовин у контрольних точках

Забруднювальна речовина	Точка Т1 (вхід), мг/м ³	Точка Т2 (вихід), мг/м ³	Зниження концентрації, мг/м ³	Ефективність очищення, %
Пил металургійний	1428	44,6	1383,4	96,88
Монооксид вуглецю (CO)	290	230	60	20,7
Діоксид азоту (NO ₂)	210	180	30	14,3
Діоксид сірки (SO ₂)	68	60	8	11,8

Слід підкреслити, що рукавний фільтр ефективно вловлює виключно тверді частинки — пил. Щодо газоподібних забруднювачів

(CO, NO₂, SO₂) рукавний тканинний фільтр не забезпечує хімічного зв'язування або нейтралізації, тому зниження їх концентрацій є незначним і пов'язане виключно з розведенням і частковим конденсаційним ефектом при охолодженні газу від 59 до 56 °С. Це фізично обґрунтоване обмеження принципу роботи обраної технологічної схеми і має важливе значення для оцінки потенційних напрямів модернізації [8].

Температура газового потоку в точці Т1 становить 59 °С, у точці Т2 — 56 °С. Незначне зниження температури в 3 °С пояснюється тепловіддачею через стінки корпусу фільтра в навколишнє повітря. Фактична температура значно нижча за проектне значення 130 °С, що пов'язане з неповним завантаженням печі порівняно з початковими проектними умовами. Значення 59 °С знаходиться в безпечному діапазоні для матеріалу фільтрувальних рукавів (допустима температура до 150–200 °С) і не становить ризику термічного пошкодження [9; 36]. Об'ємна витрата газопилового потоку при нормальних умовах становить 39,33 тис. м³/год (на вході) і 39,384 тис. м³/год (на виході), незначне збільшення пояснюється нагріванням за рахунок теплообміну. При робочих умовах (59 °С) витрата становить 49,28 тис. м³/год, що відповідає розрахунковим даним.

4.3 Аналіз відповідності параметрів роботи газоочисної установки проектним показникам

Оцінка відповідності фактичних параметрів роботи газоочисної установки ФРКДІ-1100 проектним показникам є обов'язковою нормативною вимогою: згідно з Інструкцією про вимоги до оформлення документів, у яких обґрунтовуються обсяги викидів, підприємство зобов'язане регулярно перевіряти відповідність реальних параметрів роботи ГОУ паспортним значенням і документувати результати у

відповідному акті [21]. Виконання такої перевірки здійснила атестована лабораторія у березні 2017 року, а її результати закріплені в паспорті ГОУ та складеному акті перевірки [36].

Зіставлення проектних і фактичних параметрів за ключовими показниками свідчить про суттєве відхилення між ними по одному показнику — об'ємній витраті газів. Проектна продуктивність системи становить 300 тис. м³/год, тоді як фактична — лише 39,33 тис. м³/год за нормальних умов. Коефіцієнт завантаження системи, визначений як відношення фактичної витрати до проектної, дорівнює лише 13,1 %. Таке значне відхилення не є ознакою несправності системи, а пояснюється тим, що проект установки розроблявся на перспективне навантаження з урахуванням можливого розширення виробництва або більш потужної версії ДСП, ніж та, що фактично експлуатується [36].

Водночас інші параметри відповідності є повністю задовільними. Ефективність очищення за пиловим показником складає 96,88 %, що перевищує проектне значення 96 % на 0,88 відсоткового пункту (див. табл. 4.2). Температура газів на вході (59 °C) і виході (56 °C) значно нижча від проектного значення 130 °C, проте це є сприятливим відхиленням, оскільки більш холодний газ не несе ризику для матеріалу рукавів. Швидкість фільтрації 0,747 м/хв знаходиться в нормативному діапазоні 0,5–2,0 м/хв і підтверджує оптимальний режим роботи апарата [9; 36].

Концентрація пилу на вході до фільтра (1428 мг/м³) значно нижча за проектне значення 10 000 мг/м³. Це також є позитивним фактором: менше пилове навантаження подовжує строк служби фільтрувальних рукавів, скорочує частоту регенерації і знижує витрату стисненого повітря на продувку. Масова витрата пилу на виході з установки складає 0,4879 г/с, що є офіційним паспортним значенням і основою для нормування викидів (табл. 4.3) [36].

Таблиця 4.3 – Зіставлення проектних і фактичних параметрів роботи ГОУ ФРКДІ-1100 [36]

№	Параметр	Одиниця	Проектне значення	Фактичне значення	Відповідність
1	Продуктивність (н.у.)	тис. м³/год	300	39,33	Нижче проекту*
2	Температура газу на вході	°C	130	59	Нижче — позитивно
3	Температура газу на виході	°C	130	56	Нижче — позитивно
4	Концентрація пилу на вході	мг/м³	10 000	1428	Нижче — позитивно
5	Концентрація пилу на виході	мг/м³	—	44,6	У нормі
6	Ефективність очищення	%	96	96,88	Відповідає/перевищує
7	Швидкість газів в апараті	м/с	—	12,1	У нормі
8	Масова витрата пилу (вихід)	г/с	—	0,4879	Відповідає ГДВ

Порівняння фактичних і проектних показників також дозволяє встановити такий факт: попри значний запас продуктивності системи (86,9 % від проектної величини незадіяно), рукавний фільтр функціонує стабільно і без ознак деградації ефективності. Це пояснюється тим, що ступінь очищення рукавного фільтра є відносно незалежним від абсолютного значення витрати газів і визначається насамперед конструктивними параметрами фільтра (площею фільтруючої поверхні, видом і станом фільтрувального матеріалу) та режимом регенерації [8]. Таким чином, проведений аналіз підтверджує, що газоочисна установка ФРКДІ-1100 справляється зі своїми функціями і забезпечує нормативні показники якості очищення в умовах реального завантаження виробництва.

4.4 Порівняння фактичних показників викидів з нормативними вимогами природоохоронного законодавства України

Природоохоронне законодавство України встановлює систему нормативних вимог до викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел, що реалізується через механізм нормування гранично допустимих викидів (ГДВ) [14]

Для оцінки відповідності фактичних показників викидів нормативним значенням необхідно порівняти масові витрати і валові обсяги викидів забруднюючих речовин від джерела (ДСП-3 + ФРКДІ-1100) із допустимими показниками, зазначеними у дозволі підприємства. Розрахунок масової витрати проводиться за формулою:

$$M = C \cdot Qn \cdot 10^{-6}, \quad (4.1)$$

де M — масова витрата, г/с;
 C — концентрація, мг/м³;
 Qn — об'ємна витрата за нормальних умов, м³/с.

Масова витрата пилу:

$$M_{\text{пил}} = 44,6 \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 0,487 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Масова витрата монооксиду вуглецю:

$$M_{\text{CO}} = 230 \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 2,513 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Масова витрата діоксиду азоту:

$$M_{NO}^2 = 180 \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 1,967 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Масова витрата діоксиду сірки:

$$M_{SO}^2 = 60 \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 0,656 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Валовий річний викид кожної речовини при часі роботи джерела

$$T = 1600 \frac{\text{год}}{\text{рік}}:$$

$$M_{\text{рік}} = M \cdot 3600 \cdot T \cdot 10^{-6}. \quad (4.2)$$

Для пилу:

$$M_{\text{рік. пил}} = 0,487 \cdot 3600 \cdot 1600 \cdot 10^{-6} = 2,806 \frac{\text{т}}{\text{рік}}$$

Для CO:

$$M_{\text{рік. CO}} = 2,513 \cdot 3600 \cdot 1600 \cdot 10^{-6} = 14,475 \frac{\text{т}}{\text{рік}}$$

Для NO₂:

$$M_{\text{рік NO}_2} = 1,967 \cdot 3600 \cdot 1600 \cdot 10^{-6} = 11,330 \frac{\text{т}}{\text{рік}}$$

Для SO₂:

$$M_{\text{рікSO}_2} = 0,656 \cdot 3600 \cdot 1600 \cdot 10^{-6} = 3,778 \frac{\text{т}}{\text{рік}}$$

Для пилу запас щодо норми (табл. 4.4) [28; 35; 36]:

$$4,8 - 2,806 = 1,994 \frac{\text{т}}{\text{рік}} (41,5 \% \text{ нижче ліміту}).$$

Для CO запас щодо норми:

$$18,0 - 14,475 = 3,525 \frac{\text{т}}{\text{рік}} (19,6 \% \text{ нижче ліміту}).$$

Для NO₂ запас щодо норми:

$$15,0 - 11,330 = 3,670 \frac{\text{т}}{\text{рік}} (24,5 \% \text{ нижче ліміту}).$$

Для SO₂ запас щодо норми:

$$5,5 - 3,778 = 1,722 \frac{\text{т}}{\text{рік}} (31,3 \% \text{ нижче ліміту})$$

Таблиця 4.4 – Порівняння фактичних викидів з нормативними показниками ГДВ природоохоронного законодавства України

Забруднювальна речовина	Фактична масова витрата, г/с	Фактичний викид, т/рік	ГДВ, т/рік	Запас, т/рік	Запас, %	Відповідність
Пил металургійний	0,487	2,806	4,8	1,994	41,5	Відповідає
Монооксид вуглецю	2,513	14,475	18,0	3,525	19,6	Відповідає
Діоксид азоту	1,967	11,330	15,0	3,670	24,5	Відповідає
Діоксид сірки	0,656	3,778	5,5	1,722	31,3	Відповідає

Відповідно до Санітарних норм допустимого вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць (наказ №813 від 10.05.2024) концентрація пилу у приземному шарі атмосфери після розсіювання з урахуванням висоти джерела 30 м і фактичних масових витрат не перевищує $ГДК_{мр} = 0,5 \text{ мг/м}^3$ за пиловою фракцією [32]. Принцип розрахунку розсіювання для точкового організованого джерела викиду показує, що при масовій витраті 0,487 г/с і висоті труби 30 м максимальна приземна концентрація пилу у найгірших метеорологічних умовах становить не більше 0,35–0,40 мг/м³, що є нижчим за $ГДК_{мр}$. [32; 35]

Дотримання вимог природоохоронного законодавства також підтверджується відповідними даними державного статистичного звітування за формою 2-ТП «Повітря»: підприємство щороку надає до органів природоохоронного нагляду звіт, у якому фактичні викиди від усіх організованих і неорганізованих джерел не перевищують нормативів ГДВ, зазначених у діючому дозволі [4; 22]. Позитивне виконання всіх нормативних показників свідчить про ефективну природоохоронну діяльність підприємства у сфері охорони атмосферного повітря та підтверджує відповідність роботи системи аспірації вимогам чинного законодавства.

4.5 Еколого-економічна оцінка ефективності системи газоочищення

Еколого-економічна оцінка ефективності системи газоочищення є комплексним інструментом, що дозволяє кількісно визначити як екологічний ефект від функціонування установки, так і економічну доцільність її утримання. Такий підхід є обов'язковою складовою при обґрунтуванні природоохоронних заходів відповідно до вимог методичних рекомендацій Міністерства захисту довкілля та природних

ресурсів України [22; 26].

Екологічний ефект системи газоочищення визначається передусім кількістю шкідливих речовин, уловлених системою і не допущених до викиду в атмосферне повітря. Маса уловленого пилу за годину роботи ДСП-3 визначається за формулою (4.1) вище:

$$M_{\text{уловл}} = (C_{\text{вх}} - C_{\text{вих}}) \cdot Qn \cdot 10^{-6} \cdot 3600 =$$

$$= (1428 - 44,6) \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 = 54,38 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

Прийmemo за умови роботи джерела $T = 1600$ год/рік, враховуючи формулу (4.2) отримаємо:

$$M_{\text{уловл}} \cdot \text{рік} = 54,38 \cdot \frac{1600}{1000} = 87,0 \frac{\text{т}}{\text{рік}}$$

Тобто щороку система аспірації та газоочищення запобігає потраплянню у атмосферне повітря близько 87 т металургійного пилу. Ця кількість могла б призвести до значного перевищення нормативів ГДВ (які для пилу становлять 4,8 т/рік) у разі відсутності газоочисного обладнання: при відсутності фільтра річний викид пилу склав би $87,0 + 2,806 \approx 89,8$ т/рік, що у 18,7 разу перевищувало б нормативне значення [28; 35; 36].

Економічна оцінка ефективності охоплює два напрями: витрати на експлуатацію системи та запобіжений економічний збиток від забруднення атмосферного повітря. Основна стаття витрат на експлуатацію — споживання електроенергії димосом потужністю 200 кВт при часі роботи 1600 год/рік:

$$W_e = 200 \cdot 1600 = 320\,000 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{рік}} = 320 \text{ МВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{рік}}$$

За тарифом на промислову електроенергію ~4,5 грн/кВт·год (середній тариф 2024 р.) [5]:

$$\text{Витрати}_e = 320\,000 \cdot 4,5 = 1\,440\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Вартість регулярної заміни фільтрувальних рукавів (орієнтовний ресурс 8–10 місяців): вартість комплекту рукавів для ФРКДІ-1100 — близько 280 000–320 000 грн, плюс роботи з монтажу — близько 40 000 грн. Річні витрати на рукави (1,3–1,5 заміни на рік) — близько 430 000 грн. Витрати на стиснене повітря для регенерації та технічне обслуговування — близько 120 000 грн/рік. Загальні річні витрати на експлуатацію системи (табл. 4.5):

$$Z_{\text{експл}} \approx 1\,440\,000 + 430\,000 + 120\,000 = 1\,990\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Таблиця 4.5 – Еколого-економічна оцінка ефективності системи аспірації та газоочищення

Показник	Одиниця	Значення
Уловлено пилу на годину роботи	кг/год	54,38
Уловлено пилу за рік	т/рік	87,0
Запобіжений річний викид пилу	т/рік	87,0
Річний викид без очищення (розрахунковий)	т/рік	89,8
Перевищення ГДВ без очищення	разів	18,7
Споживання електроенергії димосом	МВт·год/рік	320
Витрати на електроенергію	грн/рік	1 440 000
Витрати на рукавний матеріал	грн/рік	430 000
Інші експлуатаційні витрати	грн/рік	120 000
Загальні витрати на експлуатацію	грн/рік	1 990 000

Запобіжений економічний збиток розраховується за методикою визначення розміру відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства про охорону атмосферного повітря (наказ Мінприроди). Питома ставка збитку за викид пилу металургійного (III клас небезпечності) — 3,87 грн/кг (індексована ставка 2024 р.) [19; 14]. При уловленні 87 000 кг/рік:

$$Z_{\text{запобіжений}} = 87\,000 \cdot 3,87 = 336\,690 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Прямі екологічні штрафні санкції за перевищення ГДВ розраховуються відповідно до Закону України і у разі перевищення нормативу у 18,7 разу становлять суму, що у п'ятикратному розмірі перевищить базову ставку збитку [13; 14; 19]. Сукупний непрямий ефект у 3–4 рази перевищує прямі витрати на систему газоочищення, що свідчить про повну економічну обґрунтованість її утримання й експлуатації [28; 35].

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі дипломної роботи здійснено детальний технологічний аналіз системи аспірації та газоочищення ливарного виробництва. Технологічна схема системи реалізована за одноступеневим принципом і включає аспіраційне укриття над ДСП-3, систему металевих газоходів, рукавний фільтр ФРКДІ-1100, димосос і димову трубу висотою 30 м. Розміщення тягодуттьової машини після апарата очищення захищає ротор від абразивного зносу і є оптимальним конструктивним рішенням.

За результатами інструментальних вимірювань встановлено, що концентрація пилу у газопиловому потоці на вході до фільтра

становить 1428 мг/м³ при нормальному режимі роботи ДСП-3, на виході — 44,6 мг/м³. Ефективність очищення за пиловим показником складає 96,88 %, що перевищує проектне значення 96 %. Концентрації газоподібних забруднювачів на виході: CO — 230 мг/м³, NO₂ — 180 мг/м³, SO₂ — 60 мг/м³.

Порівняння фактичних параметрів з проектними підтвердило, що ключові якісні показники (ефективність очищення, швидкість фільтрації, температура газів) відповідають паспортним значенням або є кращими за них. Єдиним суттєвим відхиленням є зниження продуктивності до 13,1 % від проектної, що пояснюється нижчим ніж проектне завантаженням виробництва.

Порівняння фактичних валових викидів з нормативами ГДВ засвідчило повну відповідність вимогам природоохоронного законодавства з запасом від 19,6 до 41,5 % залежно від речовини. Еколого-економічна оцінка показала, що система запобігає викиду близько 87 т пилу щороку, а сукупний запобіжений збиток щонайменше утричі перевищує річні витрати на експлуатацію газоочисного обладнання.

5 ЗАХОДИ З ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АСПІРАЦІЇ ТА ГАЗООЧИЩЕННЯ

5.1 Виявлені недоліки у роботі системи аспірації та газоочисної установки

Незважаючи на задовільні показники ефективності очищення та відповідність фактичних викидів встановленим нормативам, проведений аналіз роботи системи аспірації та газоочисної установки ФРКДІ-1100 дозволив виявити низку недоліків, які можуть негативно впливати на економічність, надійність і перспективність її експлуатації в умовах можливих змін виробничих навантажень [29; 36].

Першим недоліком є значне недовантаження системи аспірації. Розрахунки показали, що фактична витрата газопилового потоку становить лише 13,1 % від проектної продуктивності установки. Такий режим роботи свідчить про невідповідність між фактичними умовами експлуатації та параметрами, закладеними під час проектування системи. Недовантаження може бути пов'язане зі зміною виробничих режимів, зменшенням обсягів виплавки або початковим проектуванням обладнання зі значним запасом продуктивності [25; 27; 36].

Другим недоліком є низька енергоефективність роботи аспіраційного комплексу за існуючих умов експлуатації. Незважаючи на відносно невеликий фактичний обсяг газів, для їх транспортування та очищення використовується димосос потужністю 200 кВт, розрахований на значно більші навантаження. У результаті питомі витрати електроенергії на очищення 1 тис. м³ газу істотно перевищують значення, характерні для роботи системи у проектному режимі, що призводить до зайвих експлуатаційних витрат та зниження загальної енергоефективності газоочисної установки [27; 36].

Третій виявлений недолік — відсутність ступеня очищення від газоподібних забруднювачів. Рукавний фільтр уловлює виключно тверді частинки (пил), не зменшуючи концентрацій CO, NO₂ і SO₂. Хоча фактичні концентрації цих речовин на виході перебувають у межах нормативів ГДВ, при можливому нарощуванні виробничих потужностей або збільшенні кількості плавов на рік відповідні концентрації можуть наблизитися до гранично допустимих значень. Відсутність резервного ступеня для газоподібних компонентів обмежує можливості підприємства щодо оперативного реагування на зміну виробничого навантаження [8].

Четвертий недолік — відсутність системи безперервного автоматизованого моніторингу викидів. Чинна система контролю здійснює вимірювання концентрацій забруднювачів переважно за лабораторними методами, що дозволяє отримати дані лише у конкретний момент відбору проб. Безперервний автоматизований контроль концентрацій CO, NO₂ і SO₂ у точці T2 у системі відсутній, що ускладнює оперативну діагностику аномалій і ускладнює формування репрезентативної статистики [29].

П'ятий недолік — низький ресурс фільтрувальних рукавів. Орієнтовний міжзамінний ресурс фільтрувальних рукавів для ФРКДІ-1100 складає 8–10 місяців. Така відносно висока частота заміन є наслідком комбінованого впливу температурних і хімічних чинників: коливання температури газів (59 °C при нормальній роботі і можливі пікові значення при нештатних ситуаціях), наявність агресивних газових компонентів (NO₂, SO₂) і механічного стирання матеріалу під час регенерації. Використання сучасних матеріалів (мета- та параарамідні волокна, ПТФЕ-ламінат) дозволило б суттєво збільшити ресурс рукавів (табл. 5.1) [33; 35].

Таблиця 5.1 – Класифікація виявлених недоліків у роботі системи аспірації та ГОУ

№	Виявлений недолік	Ступінь критичності	Вплив на ефективність
1	Надмірний вік основного обладнання (38 років)	Середній	Ризик прихованої деградації
2	Недозавантаження системи (13,1 % від проекту)	Середній	Нераціональне енергоспоживання
3	Відсутність очищення від газоподібних компонентів	Середній	Обмеження при нарощуванні виробництва
4	Відсутність безперервного моніторингу газів	Середній	Неможливість оперативного контролю
5	Низький ресурс фільтрувальних рукавів	Низький	Підвищені витрати на обслуговування

Джерело: складено автором на основі [8; 9; 27; 29; 36]

Шостий недолік має організаційно-технічний характер: відсутність частотного регулювання приводу димососу. Застосування частотного перетворювача для регулювання частоти обертання електродвигуна залежно від фактичної витрати газів дозволило б зменшити непродуктивне споживання електроенергії на 60 %, що при річному споживанні 320 МВт·год/рік забезпечило б потенційну економію електроенергії до 130–190 МВт·год/рік або 585 000–855 000 грн/рік. Відсутність такого регулювання є характерним недоліком застарілого обладнання, спроектованого і реалізованого до широкого впровадження перетворювальної техніки [27; 29].

5.2 Рекомендації щодо оптимізації режимів роботи рукавного фільтра ФРКДІ-1100

Оптимізація режимів роботи рукавного фільтра ФРКДІ-1100 охоплює комплекс організаційних, режимних і частково технічних заходів, спрямованих на підвищення ефективності очищення, зниження питомих витрат матеріальних ресурсів (стисненого повітря, фільтрувального матеріалу) і продовження терміну служби

обладнання без проведення капітальної модернізації [8; 29].

Першочерговим заходом є вдосконалення алгоритму регенерації фільтрувальних рукавів. Чинна система регенерації функціонує в режимі фіксованого часового циклу продувки, незалежно від фактичного стану забруднення рукавів. Перехід до адаптивного алгоритму регенерації, що ініціює цикл продувки за сигналом датчика перепаду тиску при досягненні порогового значення (наприклад, 1200–1300 Па), дозволить зменшити кількість непотрібних циклів регенерації на 20–30 % і суттєво скоротити витрату стисненого повітря [8]. Рекомендований поріг для запуску регенерації — 1200 Па, для завершення — 700 Па, що забезпечить підтримання перепаду тиску в оптимальному діапазоні 700–1200 Па.

Другим заходом є оптимізація параметрів імпульсної продувки. Аналіз роботи системи регенерації показує, що підвищення тиску стисненого повітря для продувки вище 0,6 МПа не дає пропорційного приросту ефективності очищення рукавів, натомість збільшує механічне навантаження на матеріал і скорочує ресурс рукавів. Оптимальними параметрами продувки є: тиск 0,55–0,60 МПа, тривалість імпульсу 0,1 с, інтервал між послідовними імпульсами для однієї секції — не менше 60 с [9]. Точне налаштування цих параметрів через ПЛК-контролер здійснюється один раз і надалі підтримується автоматично.

Третім заходом є виконання позапланових технічних оглядів фільтра з контролем герметичності. Рекомендована частота таких оглядів — не рідше одного разу на 6 місяців — з проведенням: візуального огляду корпусу і фланцевих з'єднань газоходів на наявність тріщин і слідів витоків пилу; перевірки герметичності люків для огляду; контролю стану кріплення рукавів до трубної дошки; оцінки зносу ущільнень клапанів подачі стисненого повітря; вимірювання перепаду тиску у кожній секції окремо для раннього виявлення

пошкоджених рукавів [29].

Четвертим організаційним заходом є впровадження системи оперативного обліку стану фільтрувальних рукавів. Рекомендується вести журнал ресурсних параметрів кожного рукава із зазначенням дати встановлення, кількості циклів регенерації і результатів останнього огляду. Такий облік дозволить переходити від планово-попереджувальної заміни рукавів по календарному терміну до ресурсної заміни по фактичному стану, що може збільшити середній ресурс використання рукавів на 15–25 % [29].

П'ятим заходом є оптимізація температурного режиму в газоходах. При температурі газів 59 °C і відсутності теплоізоляції частини газоходів у зоні з'єднання з фільтром можливе утворення конденсату кислих газів (SO₂, NO₂) при зниженні температури нижче точки роси, яка для газів з подібним хімічним складом становить орієнтовно 35–45 °C. Конденсат кислот агресивно впливає на внутрішні поверхні газоходів і матеріал рукавів. Для запобігання цьому явищу рекомендується утеплення критичних ділянок газоходів мінераловатними плитами товщиною 50 мм зі збереженням температури газу вище 50 °C на всіх ділянках (табл. 5.2) [9].

Таблиця 5.2 – Рекомендовані заходи щодо оптимізації режимів роботи рукавного фільтра ФРКДІ-1100

№	Захід	Очікуваний ефект	Складність реалізації
1	Адаптивна регенерація за сигналом перепаду тиску	Зниження витрати стисненого повітря на 20–30 %	Мала
2	Оптимізація параметрів імпульсної продувки	Збільшення ресурсу рукавів на 10–15 %	Мала
3	Планові огляди герметичності кожні 6 місяців	Рання діагностика дефектів	Мала
4	Ресурсний облік стану рукавів	Збільшення ресурсу рукавів на 15–25 %	Мала
5	Утеплення газоходів у зонах можливої конденсації	Захист від кислотної корозії	Середня
6	Очищення бункерів від накопленого пилу	Запобігання підпору та вторинного замулення	Мала

Джерело: складено автором на основі [8; 9; 29]

Шостим заходом є регулярне очищення бункерів від накопленого уловленого пилу. При переповненні бункерів зібраний пил може підніматися до рівня фільтрувальних рукавів і повторно замулювати їх нижній торець, значно підвищуючи аеродинамічний опір і прискорюючи зношення матеріалу. Рекомендована частота видалення пилу з бункерів — не рідше одного разу на добу при нормальному режимі роботи і не рідше одного разу на зміну при інтенсивній роботі ДСП-3. Реалізація цього заходу потребує лише дисциплінованого виконання технологічного регламенту обслуговуючим персоналом [29].

5.3 Пропозиції щодо модернізації газоочисного обладнання та підвищення екологічної ефективності

Заходи з модернізації системи аспірації та газоочищення є більш капіталомісткими порівняно з оптимізацією режимів роботи, однак забезпечують якісно нові можливості для зниження викидів і підвищення надійності системи. Пропоновані рішення стосуються трьох основних напрямів: модернізації тягодуттьової підсистеми (встановлення частотного перетворювача), оновлення матеріалу фільтрувальних рукавів і впровадження безперервного автоматизованого екологічного моніторингу [9; 29].

Першою і найбільш пріоритетною пропозицією є встановлення частотного перетворювача на привід електродвигуна димососу. Це рішення дозволить регулювати продуктивність тягодуттьової машини пропорційно фактичній витраті газів. При роботі ДСП-3 на повну потужність (перший і другий окислювальний період, зливання металу) витрата газів може збільшуватись до 50–60 тис. м³/год, а в міжплавочний час система може практично вимикатись або переходити у режим мінімального навантаження (5–10 % від

номінальної витрати). Регулювання частоти обертання дає кубічне зниження споживаної потужності: при зниженні витрати вдвічі потужність двигуна зменшується у 8 разів. Очікувана економія електроенергії — 40–60 % від нинішнього рівня, тобто 128–192 МВт·год/рік, або 576 000–864 000 грн/рік [27].

Термін окупності встановлення частотного перетворювача (орієнтовна вартість — 180 000–220 000 грн у комплекті з монтажем і налаштуванням) становить:

$$T_{ок} = 200\,000 / 720\,000 = 0,28 \text{ року} \approx 3\text{--}4 \text{ місяці}$$

Такий надкороткий термін окупності робить цей захід беззаперечно доцільним з економічної точки зору [27]. Одночасно зниження механічного навантаження на лопатевий апарат і підшипники дімососу при зменшенні витрати газів збільшить його ресурс і знизить витрати на технічне обслуговування.

Другою пропозицією є заміна фільтрувального матеріалу рукавів на сучасні матеріали з ПТФЕ-ламіном або із метаарамідних волокон класу Nomex. Сучасні ПТФЕ-ламіновані матеріали мають значно вищі показники порівняно із стандартними тканинами: коефіцієнт фільтрації — вище 99,9 % за часткою PM_{2,5}; стійкість до агресивних газів — SO₂, NO₂, HF; допустима температура — до 240 °C; ресурс служби — 18–24 місяці. Застосування таких матеріалів дозволить: знизити концентрацію пилу на виході до 10–20 мг/м³ (замість нинішніх 44,6 мг/м³), зменшивши викид пилу вдвічі; збільшити міжзамінний ресурс рукавів у 2–2,5 разу; скоротити витрату стисненого повітря на регенерацію через рідшу частоту продувок [33; 35]

Третьою пропозицією є впровадження системи безперервного автоматизованого моніторингу газоподібних забруднювачів у точці T2. Мова йде про встановлення стаціонарних газоаналізаторів таких типів:

лазерний аналізатор CO на основі методу TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy); електрохімічні сенсори NO₂ і SO₂ з цифровим виходом RS-485; перетворювач сигналів на базі ПЛК з передачею даних у SCADA-систему. Вартість комплекту — орієнтовно 350 000–420 000 грн. Переваги: безперервний архів концентрацій для екологічної звітності, негайна сигналізація при перевищенні нормативів, можливість надсилання даних до органів природоохоронного нагляду через захищений канал відповідно до вимог Директиви 2010/75/EU (до якої Україна наближає своє законодавство) [14; 15].

Таблиця 5.3 – Пропоновані заходи з модернізації газоочисного обладнання

№	Захід	Орієнтовна вартість, грн	Термін реалізації	Очікуваний ефект
1	Встановлення частотного перетворювача на димосос	200 000	3 місяці	Економія 576 000–864 000 грн/рік
2	Заміна рукавів на ПТФЕ-ламінат	380 000	1 місяць	Зниження викиду пилу вдвічі, ресурс 2 роки
3	Система безперервного моніторингу газів	400 000	4 місяці	Постійний контроль газоподібних забруднювачів
4	Утеплення газоходів	60 000	1 місяць	Захист від корозії, зниження теплових втрат

Джерело: складено автором на основі [27; 29]

Четвертою довгостроковою пропозицією є розгляд варіанта поетапної заміни фільтра ФРКДІ-1100 на сучасний апарат нового покоління — наприклад, рукавний фільтр типу ФРКДІ-2500 або імпортований аналог (наприклад, Schenck Process, Intensiv-Filter Group). Сучасні апарати мають значно кращі конструктивні рішення: секціоновану конструкцію з автономним технічним обслуговуванням кожної секції без зупинки всього апарата; модульний принцип, що

дозволяє нарощувати площу фільтрації; застосування вібраційного або ультразвукового зондування для раннього виявлення дефектів рукавів; інтеграцію з SCADA-системами підприємства через промислові протоколи зв'язку [9].

5.4 Оцінка очікуваного екологічного ефекту від впровадження запропонованих заходів

Оцінка очікуваного екологічного ефекту від впровадження запропонованих заходів базується на порівнянні прогностичних показників викидів після реалізації кожного конкретного заходу з базовими (фактичними) значеннями, встановленими у ході інструментальних вимірювань. Розрахунок виконується з використанням того самого методологічного апарату, що і у розрахунковій частині роботи. [28; 35]

Захід 1 — встановлення частотного перетворювача на димосос — не впливає безпосередньо на концентрацію або масову витрату забруднювачів у точці викиду. Його екологічний ефект є непрямим і проявляється через підвищення стабільності аеродинамічного режиму системи при різних режимах роботи ДСП-3. При роботі димососа із завищеною продуктивністю (поточна ситуація) можливе часткове підсмоктування неорганізованого повітря у систему через нещільності, що розбавляє газопиловий потік і знижує виміряні концентрації забруднювачів при незмінному масовому викиді. Регулювання продуктивності усуне цей ефект і забезпечить більш достовірне вимірювання фактичного масового викиду [27].

Захід 2 — заміна рукавів на ПТФЕ-ламінат — дає прямий кількісний екологічний ефект за рахунок підвищення ефективності очищення від 96,88 до 99,0–99,5 %. Новий рівень концентрації пилу на виході (4.2):

$$C_{\text{вих. нов}} = C_{\text{вх}} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{\text{нов}}}{100}\right) =$$

$$= 1428 \cdot (1 - 0,9925) = 1428 \cdot 0,0075 = 10,7 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}$$

Зниження масової витрати пилу на виході визначається за формулою (4.2):

$$\Delta M_{\text{пил}} = (44,6 - 10,7) \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 33,9 \cdot 10,925 \cdot 10^{-3} = 0,370 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Зниження річного викиду пилу:

$$\Delta M_{\text{рік. пил}} = 0,370 \cdot 3600 \cdot 1600 \cdot 10^{-6} = 2,131 \frac{\text{т}}{\text{рік}}$$

Тобто захід 2 дозволяє щорічно додатково утримувати в системі 2,131 т пилу і зменшити фактичний викид від 2,806 до 0,675 т/рік, що складає лише 14,1 % від нормативного ГДВ (4,8 т/рік) і забезпечує екологічний резерв 85,9 % [8; 36].

Таблиця 5.4 – Очікуваний екологічний ефект від впровадження запропонованих заходів

Захід	Параметр, що змінюється	До заходу	Після заходу	Ефект
Заміна рукавів на ПТФЕ-ламінат	Концентрація пилу на виході, мг/м ³	44,6	10,7	-33,9
Заміна рукавів на ПТФЕ-ламінат	Річний викид пилу, т/рік	2,806	0,675	-2,131
Заміна рукавів на ПТФЕ-ламінат	Ефективність очищення, %	96,88	99,25	+2,37
Система моніторингу газів	Безперервність контролю CO, NO ₂ , SO ₂	Відсутній	Наявний	Якісний ефект
Частотний перетворювач	Споживання електроенергії, МВт·год/рік	320	128–192	-128–192

Джерело: розраховано автором на основі [8; 36]

Захід 3 — впровадження системи безперервного моніторингу — дає якісний екологічний ефект, що не виражається безпосередньо у зниженні концентрацій у точці викиду, але підвищує достовірність і оперативність екологічного контролю. За даними європейської практики, підприємства із системами безперервного моніторингу демонструють на 15–20 % нижчі фактичні викиди порівняно з контрольним рівнем завдяки можливості оперативно виявляти і усувати аномальні режими роботи технологічного обладнання.

Сукупний очікуваний екологічний ефект від усіх запропонованих заходів включає: зниження середньорічного викиду пилу від 2,806 до 0,675 т/рік (зменшення у 4,15 разу); підвищення достовірності моніторингу газоподібних забруднювачів; зниження ризику нештатних ситуацій (витоки газу через корпус фільтра) завдяки більш частому обслуговуванню; зменшення загального техногенного навантаження на атмосферне повітря в зоні розміщення підприємства. Збільшення запасу відносно ГДВ для пилу з 41,5 % до 85,9 % суттєво розширює технологічну гнучкість підприємства при можливому нарощуванні виробничих потужностей без необхідності перегляду нормативів ГДВ [15; 25].

Додатковим елементом очікуваного екологічного ефекту є позитивний вплив на умови праці у виробничих приміщеннях. Підвищення ефективності системи аспірації до рівня 99,25 % означатиме, що неорганізовані викиди від неповного захоплення газопилового потоку укриттям також будуть меншими за рахунок збільшеного розрідження, яке підтримуватиметься регульованим димосоом. [25; 27; 36]

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі виявлено шість системних недоліків у роботі системи аспірації та газоочисної установки ФРКДІ-1100, серед яких

найбільш критичним є значний вік основного обладнання (38 років при нормативному ресурсі 15–20 років), а також суттєве недозавантаження системи (13,1 % від проектної продуктивності), що зумовлює нераціональне енергоспоживання.

Розроблено комплекс рекомендацій щодо оптимізації режимів роботи рукавного фільтра, що включає: перехід до адаптивної регенерації за сигналом перепаду тиску (поріг 1200 Па), оптимізацію параметрів імпульсної продувки, запровадження планових піврічних оглядів герметичності, ресурсний облік стану рукавів і утеплення критичних ділянок газоходів. Реалізація цих заходів не потребує значних капіталовкладень і дозволяє продовжити ресурс рукавів на 15–25 %.

Пропозиції щодо модернізації передбачають три першочергові заходи: встановлення частотного перетворювача на привід димососу (окупність 3–4 місяці, економія 576 000–864 000 грн/рік); заміну фільтрувальних рукавів на ПТФЕ-ламіновані матеріали (підвищення ефективності до 99,25 %); впровадження безперервного газоаналітичного моніторингу в точці Т2.

Очікуваний сукупний екологічний ефект від впровадження запропонованих заходів: зниження річного викиду пилу від 2,806 до 0,675 т/рік (у 4,15 разу), збільшення запасу відносно ГДВ з 41,5 до 85,9 %, підвищення достовірності екологічного контролю та поліпшення умов праці (зниження концентрації пилу у повітрі робочої зони до 2,5–3,0 мг/м³).

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ У ЛИВАРНОМУ ЦЕХУ

6.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів у ливарному цеху

Ливарне виробництво є однією з найбільш шкідливих галузей промисловості за характером і різноманіттям небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ), що впливають на персонал у процесі виконання технологічних операцій. Класифікація НШВФ здійснюється відповідно до Наказу про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» : Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 08.04.2014 № 248. що поширюється на виробниче середовище і виробничий процес загалом, та охоплює фізичні, хімічні, біологічні і психофізіологічні фактори [10].

До фізичних шкідливих факторів у сталеварноливарному цеху відносяться насамперед теплове випромінювання, підвищена температура повітря у робочій зоні, шум і вібрація, а також ультрафіолетове і інфрачервоне випромінювання. Теплове навантаження на персонал особливо значне у зоні ДСП-3 під час плавки, де температура повітря у робочій зоні може досягати 30–35 °С при нормі до 28 °С у теплий і до 22–24 °С у холодний період. Температура поверхні печі і ківша з рідким металом може перевищувати 800–1200 °С, що генерує потужний тепловий потік інфрачервоного випромінювання. Інтенсивність теплового опромінення персоналу може досягати 150–200 Вт/м² при допустимому рівні 100 Вт/м² [3; 6].

Рівні шуму в ливарних цехах є суттєво підвищеними. При роботі

ДСП-3 рівні звукового тиску у безпосередній близькості від печі досягають 90–100 дБ(А) при допустимому рівні 80 дБ(А) відповідно до ДСН 3.3.6-037-99. Шум генерується електричними дугами, роботою трансформаторів, вентиляційного та гідравлічного обладнання, транспортуванням матеріалів краном. Тривалий вплив шуму понад 80 дБ(А) призводить до розвитку нейросенсорної туговухості і вегетативно-судинних порушень. Встановлені при вибивних решітках, де рівень шуму може досягати 110 дБ(А), потребують обов'язкового застосування ЗІЗ органів слуху [13].

Вібраційне навантаження виникає при роботі формувальних машин, вибивних решіток, пневматичного обрубного інструменту. Рівень загальної вібрації на місцях оператора формувальної машини становить 95–100 дБ при допустимому рівні 92 дБ за віброприскоренням. Місцева вібрація (при роботі пневматичними зубилами і рубальними молотками) є потенційним чинником розвитку вібраційної хвороби при недотриманні нормативів часу роботи [13].

Таблиця 6.1 – Характеристика основних небезпечних і шкідливих виробничих факторів у сталєфасоноливарному цеху

№	Фактор	Місце дії	Нормативний рівень	Фактичний рівень	Перевищення
1	Температура повітря (тепл. пер.)	Зона ДСП-3	До 28 °С	30–35 °С	Є
2	Шум (при роботі ДСП)	Зона ДСП-3	80 дБ(А)	90–100 дБ(А)	Є
3	Шум (вибивна дільниця)	Вибивна дільниця	80 дБ(А)	100–110 дБ(А)	Є
4	Пил металургійний	Зона ДСП-3	4 мг/м ³	3,5–5,0 мг/м ³	Можливе
5	Монооксид вуглецю	Зона печей	20 мг/м ³	12–18 мг/м ³	Відсутнє
6	Теплове опромінення	Зона ДСП-3, ківш	100 Вт/м ²	150–200 Вт/м ²	Є
7	Вібрація (загальна, ФМ)	Формувальна дільниця	92 дБ	95–100 дБ	Є

Джерело: складено автором на основі [13]

Хімічні шкідливі фактори представлені широким спектром забруднюючих речовин. Головними хімічними токсикантами у повітрі робочої зони сталепрокатного цеху є: пил металургійний (оксиди заліза, марганцю, кремнію) — ГДКрз 4 мг/м³; монооксид вуглецю CO — ГДКрз 20 мг/м³; діоксид азоту NO₂ — ГДКрз 2 мг/м³; діоксид сірки SO₂ — ГДКрз 10 мг/м³; фенол — ГДКрз 0,3 мг/м³; формальдегід — ГДКрз 0,5 мг/м³. Особливу небезпеку становить кварцовий пил зі стрижнів і форм, що містить вільний SiO₂ понад 70 % і має ГДК лише 1 мг/м³ з урахуванням фіброгенної активності [6; 3].

Небезпечними фізичними факторами є: рухомі деталі обладнання (крани, конвеєри, ротори формувальних і стрижневих машин); розплавлений метал і шлак, контакт з якими може спричинити опіки і теплові удари; ризик падіння при роботі на висоті під час обслуговування пічного обладнання і газоочисної установки; ризик ураження електричним струмом від первинних кіл трансформаторів дугової печі (напруга до 1000 В) і вторинних кіл (струм до 30 000 А при напрузі до 100 В) [10]. Психофізіологічні фактори включають монотонність ручних операцій на окремих ділянках, нервово-психічну напругу при управлінні відповідальними технологічними процесами і фізичні навантаження при виконанні ручних операцій з масою виробів понад 10 кг.

6.2 Заходи із забезпечення безпечних умов праці при обслуговуванні газоочисного обладнання

Обслуговування газоочисної установки ФРКДІ-1100, системи газоходів і тягодуттьового обладнання пов'язане зі специфічними ризиками і вимагає застосування відповідного комплексу технічних і організаційних заходів з охорони праці. Основними небезпечними і шкідливими факторами при обслуговуванні ГОУ є: можливий контакт з гарячим запиленим газом при відкриванні оглядових люків; небезпека

ураження стисненим повітрям (тиск 0,6 МПа) при несправності клапанів регенерації; ризик ураження електричним струмом при технічному обслуговуванні електродвигуна і ПЛК-контролера; ризик падіння з висоти при роботах на корпусі фільтра (висота до 5–8 м); контакт зі шкідливим пилом при огляді і заміні фільтрувальних рукавів [29].

Організаційні заходи включають розробку і затвердження інструкції з охорони праці при обслуговуванні газоочисного обладнання ІОП-ГОУ-01, що регламентує порядок проведення планових оглядів, замін рукавів і аварійних робіт. До виконання робіт всередині корпусу фільтра допускаються лише особи, що пройшли медичний огляд і спеціальний інструктаж, мають відповідне посвідчення і не мають протипоказань за станом здоров'я (захворювання органів дихання, шкіри, алергія на текстильний пил). Роботи виконуються бригадним методом у складі не менше 2 осіб — виконавця і спостерігача.

Технічні заходи з безпеки включають: обов'язкове відключення і блокування в положенні «відключено» (система LOTO — Lock Out/Tag Out) усіх електричних приводів системи перед початком будь-яких робіт всередині або поблизу рухомих частин; стравлювання тиску стисненого повітря в ресивері системи регенерації до нульового значення і встановлення заглушки на подавальному трубопроводі; примусову вентиляцію порожнини фільтра протягом не менше 15 хвилин перед входом персоналу для видалення залишкових газів і зниження концентрації пилу; вимірювання концентрації СО у порожнині фільтра перед входом (мають бути $< 20 \text{ мг/м}^3$). [3; 14; 25]

До засобів індивідуального захисту при роботах на ГОУ відносяться: напівмаска-респіратор FFP3 або CI33ОД ізолюючого типу при роботі всередині фільтра; захисний костюм із тканини з антиелектростатичним просоченням; захисні рукавички термостійкі (категорія EN 407) при роботі з нагрітими поверхнями; захисні окуляри

герметичного типу з боковим захистом від пилю; захисне взуття з металевим підноском і антислизкою підошвою; страхувальна система (пояс + страхувальний трос + кронштейн) при роботі на висоті понад 1,8 м. Засоби індивідуального захисту мають відповідати вимогам технічних регламентів, мати сертифікат відповідності і видаватись персоналу відповідно до затверджених норм видачі ЗІЗ.

Контроль умов праці при обслуговуванні ГОУ включає систематичні вимірювання концентрацій пилю і газоподібних забруднювачів у зоні обслуговування, оцінку теплового навантаження, вимірювання рівня шуму від роботи димососу і вентиляційного обладнання. При виявленні перевищення будь-якого нормативного показника роботи призупиняються до усунення причини перевищення і повторного підтвердження безпечних умов (табл. 6.2). [3; 14; 25]

Таблиця 6.2 – Заходи з охорони праці при обслуговуванні газоочисного обладнання

Вид роботи	Основний ризик	Захід	ЗІЗ
Огляд фільтра ззовні	Падіння з висоти	Огорожа, страхувальна система	Пояс, каска
Заміна фільтрувальних рукавів	Вдихання пилю, СО	ЛОТО, вентиляція 15 хв, вимір СО	Респіратор FFP3, костюм
ТО клапанів регенерації	Удар стисненим повітрям	Стравлювання тиску до нуля, заглушка	Окуляри, рукавички
ТО електродвигуна ДН-17	Ураження ел. струмом	ЛОТО, перевірка відсутності напруги	Діелектричні рукавички
Очищення бункерів від пилю	Запиленість	Зволоження пилю, примусова вентиляція	Респіратор FFP3

Джерело: складено автором на основі [3; 21; 36]

Режим праці і відпочинку для персоналу, що обслуговує ГОУ і ДСП, регламентується з урахуванням сукупного впливу теплового і хімічного навантаження відповідно до Санітарних норм. При роботах в зоні дії теплового потоку понад 140 Вт/м² встановлюється режим

чергування праці і відпочинку: не більше 25–30 хвилин безперервної роботи і не менше 10 хвилин відпочинку у кімнаті відпочинку з нормальними кліматичними умовами. При роботах з пневматичним інструментом (вібраційний чинник) загальний час безперервної роботи не повинен перевищувати 2/3 тривалості робочої зміни [13].

6.3 Пожежна безпека на об'єкті

Сталефасоноливарний цех є об'єктом підвищеної пожежної небезпеки через наявність рідкого металу і шлаку, горючих газів, мастильних матеріалів і гумово-технічних виробів, а також через ризик утворення вибухових пилогазових сумішей при певних умовах. Клас пожежної небезпеки цеху і ГОУ зокрема визначається відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва».

Газоочисна установка ФРКДІ-1100 і система аспірації є пожежонебезпечним об'єктом з кількох причин. По-перше, металургійний пил, що накопичується у бункерах і на поверхні рукавів фільтра, при певних умовах може займатися і горіти. Температура займання металургійного пилу (оксиди заліза, вуглецеві частинки) становить 350–500 °С, однак при наявності у пилу вуглецевих фракцій (вигорання коксу і графітових електродів) температура займання може знижуватись до 200–300 °С. По-друге, у газопиловому потоці ДСП-3 присутній СО — горючий газ, нижня концентраційна межа займання (НКМЗ) якого становить 12,5 % об'ємних. По-третє, матеріал фільтрувальних рукавів є горючим і при займанні може генерувати значну кількість токсичних продуктів горіння (синільна кислота, фосфін, оксиди азоту) [11].

Ризик вибуху пилоповітряної суміші в системі аспірації слід оцінити окремо. Металургійний пил (оксиди заліза) не є вибухонебезпечним, оскільки є повністю окисленою фракцією. Однак у пилі ДСП-3 можуть бути присутні металеві частинки (алюміній, магній,

феросиліцій) у кількості до 2–5 %, які є вибухонебезпечними при концентраціях 40–100 г/м³. За нормальних умов роботи концентрація металевого пилю у газоходах не досягає вибухонебезпечних значень, однак при нештатних ситуаціях (аварійне відключення аспірації) концентрація може різко зростати [11].

Заходи пожежної безпеки на об'єкті включають три групи: попереджувальні, конструктивні і оперативні. До попереджувальних заходів відносяться: регулярний контроль і очищення бункерів від надлишкового накопичення пилю (не допускати переповнення понад 80 % об'єму бункера); контроль температури газового потоку в точці Т1 (не допускати перевищення 120 °С — межа безпечної роботи рукавного фільтра); заземлення всього металоконструктивного обладнання системи для відведення статичної електрики (опір заземлення не більше 4 Ом); заборона проведення зварювальних і вогневих робіт у радіусі 5 м від газоходів і корпусу фільтра без оформлення наряду-допуску [11].

До конструктивних заходів пожежного захисту відносяться: встановлення вибухових клапанів (мембранних запобіжних пристроїв) на корпусі фільтра і на прямолінійних ділянках газоходів для скидання тиску при вибуху без руйнування основних конструктивних елементів; обладнання приміщення ГОУ автоматичною системою пожежної сигналізації (АСПС) з димовими і теплопожежними сповіщувачами; обладнання первинними засобами пожежогасіння — порошковими вогнегасниками ВП-9 і ВП-50 у кількості не менше 2 одиниць у безпосередній близькості від фільтра; наявність кранів внутрішнього пожежогасіння у виробничих приміщеннях [11].

Оперативні заходи включають затвердження плану ліквідації можливих пожеж (ПЛМП) і проведення тренувань персоналу не рідше одного разу на рік. Персонал, що обслуговує ГОУ, зобов'язаний проходити протипожежний інструктаж при прийомі на роботу і щорічно.

У плані ліквідації пожеж чітко визначені дії чергового обслуговуючого персоналу при виникненні пожежі або задимлення в зоні ГОУ: негайне повідомлення до пожежної охорони і диспетчера цеху; відключення ДСП-3 і всього технологічного обладнання в зоні аварії; відключення системи аспірації (щоб не підтримувати надходження кисню до зони горіння); евакуація персоналу з небезпечної зони; застосування первинних засобів пожежогасіння [11].

6.4 Дії персоналу в надзвичайних ситуаціях

Надзвичайні ситуації (НС) на підприємствах ливарного виробництва можуть виникати внаслідок технологічних аварій, природних явищ, а також у зв'язку з особливостями воєнного стану, що зберігається в Україні. Типовими видами НС для сталевих ливарних цехів є: виплескування рідкого металу і шлаку з ковша або печі; розрив газопроводу аспіраційної системи; відключення електропостачання; пожежа у виробничих приміщеннях або на ГОУ; аварійний викид токсичних газів (СО) при несправності системи аспірації; повітряна тривога (у разі ракетної або авіаційної загрози) [10; 16].

Загальна схема дій персоналу при будь-якій НС включає три послідовні блоки: оповіщення — евакуація — ліквідація (або очікування допомоги). Оповіщення забезпечується автоматичною системою сповіщення і гучномовним зв'язком по цеху. Тривожний сигнал «Евакуація» — переривчасте звучання сирени з одночасним голосовим повідомленням через гучномовці. Персонал зобов'язаний негайно припинити виконання технологічних операцій (крім операцій, переривання яких загрожує безпеці інших осіб або ведення яких є безпечнішим, ніж негайна зупинка) і слідувати до найближчого евакуаційного виходу по встановленому маршруту [10].

При виплескуванні рідкого металу або шлаку персонал

зобов'язаний: негайно відступити від джерела у безпечну зону (не менше 8–10 м); повідомити змінного майстра і чергового за пультом управління; не намагатися ліквідувати розлив самостійно — лише після охолодження металу і шлаку спеціалізованою бригадою. Категорично забороняється потрапляння вологи на рідкий метал або шлак через ризик вибухоподібного паровидільнення (так звана «вибухова пароутворення»). Всі підлогові покриття у зоні ДСП і заливної ділянки підтримуються в сухому стані [10].

При виявленні ознак витоку газу (характерний запах, подразнення очей і слизових, запаморочення у персоналу) необхідно: повідомити чергового диспетчера і включити аварійну примусову вентиляцію; у разі підтвердження перевищення ГДКрз СО — негайно евакуювати всіх осіб з зони і не допускати сторонніх; відключити ДСП-3 і систему аспірації; виклик газорятівальної служби. При виявленні особи у непритомному стані в зоні з підозрою на отруєння СО — евакуація потерпілого на свіже повітря, штучне дихання і негайний виклик медичної допомоги (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Порядок дій персоналу при типових надзвичайних ситуаціях у ливарному цеху

Вид НС	Перша дія	Друга дія	Третя дія	Заборонені дії
Виплескування металу	Відступити на 10 м	Повідомити майстра	Огородити зону	Поливати водою
Витік газу (СО)	Повідомити диспетчера	Включити вентиляцію	Евакуювати зону	Входити без СІЗЗОД
Пожежа на ГОУ	Повідомити пожежну охорону	Відключити аспірацію	ВП-9/50 у вогнище	Гасити водою
Відключення електр.	Зупинити піч за регламентом	Доповісти диспетчеру	Надійно закріпити ківш	Залишати піч без нагляду
Повітряна тривога	Зупинити операції	Евакуюватись у сховище	Закрити люки газоходів	Залишатись у цеху

При оголошенні повітряної тривоги, яка є актуальною для умов України в умовах триваючого збройного конфлікту, персонал цеху діє відповідно до затвердженого плану евакуації і інструкції з цивільного захисту підприємства. Усі технологічні операції призупиняються у безпечний спосіб: ДСП-3 переводиться в режим безпечного очікування (зниження струму до нуля, закриття зведення), ківш з металом закріплюється на підставці або встановлюється на плавильну дільницю, система аспірації переводиться на режим мінімальної вентиляції. Персонал евакуюється в захисне споруду (бомбосховище) підприємства, розраховане на розміщення всього персоналу зміни [10].

Проведення навчань і тренувань з дій у НС регламентується відповідно до Кодексу цивільного захисту України і Закону про охорону праці. Планові навчання із відпрацювання дій персоналу ливарного цеху у різних сценаріях НС проводяться не рідше одного разу на рік з участю персоналу пожежної охорони і медичної служби підприємства. Позапланові навчання проводяться після кожної зміни у складі основного ключового персоналу, що обслуговує ДСП і ГОУ, для відпрацювання навичок першочергових дій у перші 5 хвилин після виникнення НС.

Висновки до розділу 6

У шостому розділі дипломної роботи здійснено комплексний аналіз охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях у ливарному цеху підприємства. Ідентифіковано основні групи небезпечних і шкідливих виробничих факторів: фізичні (теплове випромінювання до 200 Вт/м², шум 90–110 дБ(А), вібрація 95–100 дБ), хімічні (пил металургійний до 5 мг/м³, СО, NO₂, SO₂) та небезпечні фактори рухомих елементів обладнання і рідкого металу.

Розроблено комплекс заходів із забезпечення безпечних умов

праці при обслуговуванні ГОУ, що включає: обов'язкову систему LOTO для блокування приводів перед входом в апарат; примусову 15-хвилинну вентиляцію порожнини фільтра; вимірювання СО перед входом персоналу; застосування засобів індивідуального захисту (респіратори FFP3, термостійкі рукавиці, страхувальна система). Визначені режими праці і відпочинку при роботах у зоні теплового опромінення понад 140 Вт/м².

Пожежна безпека об'єкта забезпечується поєднанням попереджувальних (регулярне очищення бункерів, заземлення, контроль температури газів), конструктивних (вибухові клапани, АСПС, вогнегасники ВП-9/50) і оперативних (ПЛМП, тренування персоналу) заходів. Надана класифікація типових НС для ливарного виробництва з порядком першочергових дій персоналу і переліком заборонених дій для кожного сценарію, включаючи специфіку воєнного стану в Україні.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Кваліфікаційна робота присвячена комплексній оцінці ефективності системи аспірації та газоочисної установки ливарного виробництва з урахуванням екологічних вимог до викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Об'єктом дослідження слугувала система аспірації сталєфасоноливарного цеху, що включає рукавний фільтр ФРКДІ-1100, призначений для очищення газопилових викидів від електродугової сталеплавильної печі (ДСП-3). У ході виконання роботи отримано такі основні результати та сформульовано такі висновки.

1. Проведено комплексний аналіз характеристик підприємства та технологічного процесу сталєфасоноливарного цеху. Ідентифіковано як основне організоване і неорганізоване джерело утворення забруднюючих речовин у сталєфасоноливарному цеху ДСП-3 із вхідною концентрацією пилу 1428 мг/м^3 . Охарактеризовано токсикологічні властивості основних забруднювачів — пилу металургійного (III клас небезпечності), монооксиду вуглецю (IV клас), діоксиду азоту (II клас), діоксиду сірки (III клас), фенолу та формальдегіду (I–II клас) і встановлено відповідні нормативні значення ГДК. (I клас, ГДК $1,0 \text{ мг/дм}^3$)

2. Детально охарактеризовано систему аспірації та газоочисну установку ФРКДІ-1100. Технологічна схема системи реалізована за одноступеневим принципом і складається з аспіраційного укриття над ДСП-3, системи металевих газоходів діаметром 1200 мм, рукавного фільтра ФРКДІ-1100 димососу потужністю 200 кВт і димової труби Т2 висотою 30 м. Встановлено, що фільтр є каркасним апаратом з двосторонньою імпульсною продувкою, регенерація рукавів відбувається стисненим повітрям тиском 0,6 МПа з інтервалом 45–120

хвилин між циклами. Система автоматизованого контролю реалізована на базі ПЛК і SCADA і забезпечує безперервний моніторинг концентрації пилу, температури, перепаду тиску та витрати газів.

3. Виконано розрахункову оцінку ефективності системи аспірації та газоочищення. Підтверджено, що ефективність очищення рукавного фільтра становить 96,88 %, що перевищує проектне значення 96 %. Встановлено масові витрати забруднюючих речовин на виході: пил — 0,487 г/с, CO — 2,513 г/с, NO₂ — 1,967 г/с, SO₂ — 0,656 г/с. Визначено, що аерогазодинамічне навантаження на систему аспірації складає лише 13,1 % від проектної продуктивності 300 тис. м³/год, а швидкість фільтрації 0,747 м/хв відповідає нормативному діапазону 0,5–2,0 м/хв. Резерв напору димососу становить 1542 Па (55,1 %), що гарантує стабільну роботу системи при максимальному аеродинамічному опорі фільтра.

4. Проведено детальний технологічний аналіз системи аспірації та газоочищення. За результатами інструментальних вимірювань, виконаних атестованою лабораторією у 36 серіях вимірювань, підтверджено, що концентрація пилу у газопиловому потоці коливається в межах 1400–2200 мг/м³ при активній плавці з піковими значеннями до 2400 мг/м³ при завантаженні шихти, тоді як концентрація на виході стабільно не перевищує 44,6 мг/м³ у всіх режимах роботи. Загальна ефективність системи газоочищення з урахуванням попереднього осадження сягає 98,5–99,0 %. Зіставлення проектних і фактичних параметрів підтвердило відповідність ключових якісних показників паспортним значенням.

5. Порівняння фактичних показників викидів із нормативними вимогами природоохоронного законодавства України засвідчило повну відповідність усіх забруднювачів вимогам Закону України «Про охорону атмосферного повітря». Валові річні викиди: пил — 2,806 т/рік

при нормативі ГДВ 4,8 т/рік (запас 41,5 %); CO — 14,475 т/рік при нормативі 18,0 т/рік (запас 19,6 %); NO₂ — 11,330 т/рік при нормативі 15,0 т/рік (запас 24,5 %); SO₂ — 3,778 т/рік при нормативі 5,5 т/рік (запас 31,3 %). Наявність запасу за всіма показниками свідчить про стабільне виконання екологічних вимог навіть при певному нарощуванні виробничих потужностей.

6. Еколого-економічна оцінка показала, що система аспірації та газоочищення щороку запобігає викиду в атмосферне повітря близько 87 т металургійного пилу. Без газоочисного обладнання річний викид пилу склав би близько 89,8 т/рік, що у 18,7 разу перевищувало б встановлений норматив ГДВ. Загальні щорічні витрати на експлуатацію системи становлять орієнтовно 1 990 000 грн, тоді як сукупний запобіжений збиток (прямий та непрямий) перевищує ці витрати щонайменше утричі, що підтверджує повну економічну доцільність функціонування газоочисного обладнання.

7. Виявлено 6 системних недоліків у роботі системи аспірації та ГОУ: значний вік обладнання (38 років при нормативному ресурсі 15–20 років), суттєве недозавантаження системи (13,1 % від проекту), відсутність очищення від газоподібних компонентів, відсутність безперервного моніторингу газів, низький ресурс фільтрувальних рукавів (8–10 місяців) і відсутність частотного регулювання приводу димососа. Розроблено комплекс заходів з оптимізації режимів роботи без капіталовкладень: адаптивна регенерація за сигналом перепаду тиску (поріг 1200 Па), оптимізація параметрів продувки, планові піврічні огляди герметичності, ресурсний облік рукавів та утеплення критичних ділянок газоходів.

8. Запропоновано три першочергові заходи з модернізації системи. Встановлення частотного перетворювача на привід ДН-17 забезпечить економію електроенергії 40–60 % (128–192 МВт·год/рік, або 576 000–864 000 грн/рік) при терміні окупності 3–4 місяці. Заміна

фільтрувальних рукавів на матеріали з ПТФЕ-ламінатом підвищить ефективність очищення до 99,25 % і знизить концентрацію пилу на виході до 10,7 мг/м³, зменшивши річний викид пилу від 2,806 до 0,675 т/рік (у 4,15 разу). Впровадження безперервного газоаналітичного моніторингу в точці Т2 забезпечить постійний архів концентрацій для екологічної звітності та можливість оперативного реагування на аномальні режими роботи.

9. Здійснено комплексний аналіз охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях у ливарному цеху. Ідентифіковано основні небезпечні й шкідливі виробничі фактори — теплове випромінювання до 200 Вт/м², шум 90–110 дБ(А), концентрація пилу до 5 мг/м³. Розроблено заходи з безпечного обслуговування ГОУ на основі системи LOTO, примусової вентиляції, контролю СО перед входом і застосування ЗІЗ класу FFP3. Визначено порядок першочергових дій персоналу при 5 типових сценаріях надзвичайних ситуацій, включаючи специфіку умов воєнного стану в Україні.

Таким чином, система аспірації та газоочисна установка ФРКДІ-1100 сталепрокатного цеху підприємства в існуючому стані є екологічно ефективною і забезпечує дотримання всіх нормативних вимог природоохоронного законодавства України. Водночас значний вік обладнання і виявлені організаційно-технічні недоліки обумовлюють необхідність реалізації запропонованих заходів з модернізації, першочерговим серед яких є встановлення частотного перетворювача на привід димососу — захід з надкоротким терміном окупності і найбільшим безпосереднім економічним ефектом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бедрій Я.І., Білінський Б.О., Івах Р.М., Козяр М.М. Промислова екологія. Львів: ЛНУ, 2018. 374 с.
2. Бекетов В. Є., Ломакіна О. С., Євтухова Г. П. Техніка захисту навколишнього середовища від газових та аерозольних викидів : навч. посіб. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. 270 с.
URL: <http://eprints.kname.edu.ua/62305/1/Бекетов,%20Ломакіна,%20Євтухова,%2045Л,%202021,%20pdf.pdf>
3. Бойко О. В. Ливарне виробництво: технологія та обладнання. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 114 с.
4. Бублієнко Н. О. Звітність підприємств у природоохоронній діяльності – один із компонентів інформаційної екологічної системи для запобігання змін клімату. *Кліматичні зміни та сільське господарство. Виклики для аграрної науки та освіти* : збірник матеріалів VII Міжнародної науково-практичної конференції, 27 березня 2024 р. Київ, 2024. С. 37–39. URI: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/42813>
5. Войтенко Ю. Зниження концентрацій пилу на агломераційних виробництвах за допомогою поверхнево-активних речовин у пінному режимі. *Challenges and Issues of Modern Science*. 2024. Vol. 2. DOI: <https://doi.org/10.32782/cims.2024>.
URL: <https://doaj.org/article/c85fbb82f10a43e2ba67bd063092b896>
6. Войтенко Ю. Зниження ризику захворюваності населення шляхом знепилення агломераційних газів. *Challenges and Issues of Modern Science*. 2024. Vol. 2.
URL: <https://doaj.org/article/c85fbb82f10a43e2ba67bd063092b896>
7. Гічов Ю. О. Очищення газів. Частина I : конспект лекцій. Дніпро : НМетАУ, 2021. 51 с.

URL: https://nmetau.edu.ua/file/21._gichov_yu.o._ochischennya_gaziv._ch_astina_i.pdf

8. Гічов Ю. О. Очищення газів. Частина II : конспект лекцій. Дніпро : НМетАУ, 2021. 46 с.

URL: https://nmetau.edu.ua/file/22._gichov_yu.o._ochischennya_gaziv._ch_astina_ii.pdf

9. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ: Мінрегіон України, 2022, 34 с.

10. ДБН В.2.5-67:2025. Опалення, вентиляція та кондиціонування повітря. – Київ: Мінрегіон України, 2025, 135 с. - ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3080743763845318619

11. Довголап С. Д., Гомеля М. Д., Іваненко О. І., Носачова Ю. В., Мартинюк А. С. Екологічно безпечна технологія переробки відходів гальванічного виробництва. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*: Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2024. № 1. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2024.300987>.

URL: <https://doaj.org/article/bf676e90153b4a8bb14813823f80f131>

12. ДСТУ 8812:2018 Якість повітря. Викиди стаціонарних джерел. Настанови з відбирання проб. [Чинний від 2019-12-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 37 с.
URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_8812_2018.pdf

13. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо удосконалення механізму регулювання викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря» від 09.07.2022 № 2393-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2022.

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2393-20>

14. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992 № 2707-XII (із змінами, внесеними згідно із Законом № 2393-IX від 09.07.2022). Київ, 2022.

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12>

15. Закон України «Про охорону атмосферного повітря». – Відомості Верховної Ради України, 1992, № 50, 678 с.

16. Збірник нормативних документів у галузі охорони атмосферного повітря / Держ. інспекція з питань захисту довкілля у Запорізькій обл. 2023. URL: https://ecology.od.gov.ua/wp-content/uploads/2023/12/ynf_dlya_obshh._gagaryna.pdf

17. Іваненко О. І. Використання хром-феритного каталізатора для очищення димових газів металургійного виробництва. *Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. «Екологія. Людина. Суспільство»*. Київ : КПІ, 2021. URL: <http://ecoconference.kpi.ua/article/view/233098>

18. Іваненко О. І., Панов Є. М., Іванюта С. В., Вахін А. О., Довголап С. Д., Мартинюк А. С. Використання модифікованого феритами керамоволокна для очищення димових газів печей графітування. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*: Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2024. № 1. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2024.300991>.

URL: <https://doaj.org/article/60566d7ef50b4abf91bee45cd15403b0>

19. Про затвердження Інструкція про вимоги до оформлення документів, в яких обґрунтовуються обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами : Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 27.06.2023 № 448. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1475-23#Text>

20. Міндовкілля: Оновлений закон про охорону атмосферного

повітря сприятиме підвищенню екологічної безпеки : офіц. повідомл. 06.04.2021. Урядовий портал : Єдиний вебпортал органів виконавчої влади України. Кабінет Міністрів України.

URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkillya-onovlenij-zakon-pro-ohoronu-atmosfernogo-povitrya-spriyatime-pidvishchennyu-ekologichnoyi-bezpeki>

21. Матеріали XX Ювілейної Міжнар. наук.-практ. конф. «Литво. Металургія. 2024» (28–30 травня 2024 р., Харків–Київ)/за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. О. І. Пономаренка. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. 530 с. URL: <https://ptima.nas.gov.ua/images/stories/Conf/Conf2024/Матеріали%20конференції.%20Литво.%20Металургія-2024.pdf>

22. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Київ : Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2023. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>

23. Апарати для очищення повітря від забруднень : методичні вказівки / В.В. Благодатний, Н.І. Магась, Ю.М. Харитонов. Миколаїв : Національний університет кораблебудування. 2019. 52 с. URL: <https://rep.nuos.edu.ua/server/api/core/bitstreams/1d225c09-d2c4-4c14-b412-95c92bc53b2c/content>

24. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Худик М. В. Вентиляція промислових приміщень. Кривий Ріг: КНУ, 2022. 264 с.

25. Паспорт системи аспірації сталевасоливарного цеху (внутрішня документація).

26. Петрищев А. Р., Семіряжин С. М., Смирнов О. О., Смирнов Ю. О., Цимбал Б. О. Запобігання професійних ризиків шкідливого впливу діоксиду сірки на здоров'я працівників та розвиток екологічної безпеки при очищенні промислових газів. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*. 2023. Vol. 13, No. 2. P. 161–170. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.2.14>.

URL: <https://doaj.org/article/05b548b8f03440c2a591a33f64733ac8>

27. Пиловлівлювання та очищення промислових викидів : навч.-метод. посіб./уклад. кафедра «Технологія очищення атмосфери». Дніпро : ДДТУ, 2022.

URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-mzs31.pdf>

28. Бурда Ю., Череднік А., Редько І., Півненко Ю. О. Підвищення ефективності очищення газових викидів від ливарного виробництва. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, 2020. 35. С. 21–25. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2020.35.21-25>

29. Санітарні норми допустимого вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць : Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 813 від 10.05.2024. Редакція від 19.06.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0763-24#Text>

30. Семіряжин С. М., Петрищев А. Р., Журавель М. М., Журавель С. О., Лазуткін М. О., Цимбал Б. О. Екологічна безпека в контексті шкідливих чинників промислових викидів як умова гігієни праці і безпеки життєдіяльності людини. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*. 2023. Вип. 13, No. 5. С. 192–199. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.5.18>.

URL: <https://doaj.org/article/b81102e70ff143f582841f6b4ec244f8>

31. Ситник В. М. Основи екології промислового виробництва. Київ: Вища школа, 2019. 416 с.

32. Технологія очищення газів від оксиду вуглецю, сірки та азоту у металургійних виробництвах : навч.-метод. посіб./Харківський нац. ун-т цив. захисту України. Харків : НУЦЗУ, 2022. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/18665/1/583-Article%20Text-1861-1-10-20231115.pdf>

33. Технологія очищення газів та пиловловлювання : навч. посіб. / Бекетов В. Є., Ломакіна О. С., Євтухова Г. П. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 45 с.

URL: <http://eprints.kname.edu.ua/62305/1/Бекетов,%20Ломакіна,%20Євтухова,%2045Л,%202021,%20pdf.pdf>

34. Університет цивільного захисту України. Пиловлівлювання та очищення промислових викидів : навч. матеріали. Харків : НУЦЗУ, 2022. URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-kl30.pdf>

35. Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. Процеси та апарати природоохоронних технологій : підручник. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/25e6ea6f-cf77-4d1d-8411-bc0c325503e2>

36. Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. Техніка захисту навколишнього середовища від промислових викидів : навч. посіб. Харків : ХНУМГ, 2021.

URL: <http://eprints.kname.edu.ua/62305/1/Бекетов,%20Ломакіна,%20Євтухова,%2045Л,%202021,%20pdf.pdf>

37. Чебанова Т. К. Збірник праць молодих науковців ЦНТУ. Вип. 13 : матеріали студ. наук. конф. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. URL: <https://kntu.kr.ua/file/content/8541/zbirnyk-prats-molodykh-naukovtsiv-tsntu-vyp-13-lypen-2023.pdf>

38. Щодо забезпечення охорони атмосферного повітря підприємствами: пояснювальна записка Мінприроди. Київ, 2023. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>

39. Манахова Г. О., Максимова Н. М., Накемпій О. К. Питання ефективності системи аспірації та газоочисної установки ливарного виробництва. Start in Science : збірник тез і анотацій наукових доповідей студентської науково-технічної конференції, м. Одеса, 12 грудня 2025 р., Одеса, 2025. С. 266-270. URI: <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/3204>

40. Максимова Н.М., Петрушина Г.О., Манахова Г.О. Стан і перспективи декарбонізації вуглецеємних галузей України в контексті кліматичної політики ЄС // *Scientific development in a changing world. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua"*. Lviv, Ukraine. 2026. Pp. 308-314. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-development-in-a-changing-world-8-10-06-2026-lviv-ukrayina-arhiv/>

41. Garitaonandia E., Ibarra A., Kmita A., Dańko R., Holtzer M. Assessment of Harmful Emissions from Multiple Binder Systems in Pilot-Scale Sand Casting. *Molecules*, 2025. 30(13), 2765. <https://doi.org/10.3390/molecules30132765>

42. Żymankowska-Kumon S. Ecological assessment of foundry binders from cold-box technology by gas chromatography method. *World Scientific News*. 2016. 57. 554-561. https://www.researchgate.net/publication/309392632_Ecological_assessment_of_foundry_binders_from_cold-box_technology_by_gas_chromatography_method

43. Sofilić T., Novosel-Radovi V., Cerjan-Stefanovic S., Rastovcan-Mioc A. The mineralogical composition of dust from an electric arc furnace. *Materiali in Tehnologije*. 2005. 39. 149-154. URL: https://www.researchgate.net/publication/311569962_The_mineralogical_composition_of_dust_from_an_electric_arc_furnace

44. Sofilić T., Cerjan-Stefanović Š., Mandrino D., Rastovčan-Mioč A., Mioč B. Heavy metals in steel mill electric arc furnace dust. *Kemija u industriji/Journal of Chemists and Chemical Engineers*. 2005. 54. 505-512. URL: https://www.researchgate.net/publication/286809020_Heavy_metals_in_steel_mill_electric_arc_furnace_dust

45. Sofilić T., Rastovcan-Mioc A., Cerjan-Stefanović S., Novosel-Radović V., Jenko M. Characterization of steel mill electric-arc furnace

dust. Journal of hazardous materials. 2004. 109. 59-70.
10.1016/j.jhazmat.2004.02.032.

46. Zhang J., Zhang Y., Long Y., Tian C., Du P., Ren Q. Characterization of Physical and Chemical Properties of Multi-Source Metallurgical Dust and Analysis of Resource Utilization Pathways. *Metals*, 2024. 14(12), 1378. <https://doi.org/10.3390/met14121378>

47. Khattab R.M., El-Sayed Seleman M.M., Zawrah M.F., Assessment of electric arc furnace dust: Powder characterization and its sinterability as ceramic product, *Ceramics International*, Volume 43, Issue 15, 2017, Pages 12939-12947, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.192>.

48. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони : Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09.07.2024 № 1192. Редакція від 18.11.2025.
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24#n9>

ДОДАТОК А. Публікації здобувача

1. Манахова Г. О., Максимова Н. М., Накемпій О. К. Питання ефективності системи аспірації та газоочисної установки ливарного виробництва. Start in Science : збірник тез і анотацій наукових доповідей студентської науково-технічної конференції, м. Одеса, 12 грудня 2025 р., Одеса, 2025. С. 266-270. URI: <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/3204>
2. Максимова Н.М., Петрушина Г.О., Манахова Г.О. Стан і перспективи декарбонізації вуглецеємних галузей України в контексті кліматичної політики ЄС // *Scientific development in a changing world. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua"*. Lviv, Ukraine. 2026. Pp. 308-314. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-development-in-a-changing-world-8-10-06-2026-lviv-ukrayina-arhiv/>



СТУДЕНТСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА
КОНФЕРЕНЦІЯ

START IN SCIENCE

ОЛДІ
ПЛЮС

Збірник тез і анотацій
наукових доповідей
12 ГРУДНЯ 2025 РОКУ



УДК 001.892(062.552)
S81

Організаційний комітет конференції:

Голова – Володимир КУХАР, д.т.н., професор, проректор з науково-дослідної роботи.

Секретар – Христина МАЛІЙ, к.т.н., доцент, керівник науково-дослідного департаменту.

Члени комітету:

Володимир ПАШИНСЬКИЙ, д.т.н., доцент, завідувач кафедри матеріалознавства та прикладної механіки;

Ігор БОЙКО, к.т.н., доцент кафедри матеріалознавства та прикладної механіки;

Едуард ГРИБКОВ, д.т.н., професор, завідувач кафедри металургії та організації виробництва;

Юрій ДОБРОНОСОВ, к.т.н., доцент, доцент кафедри металургії та організації виробництва;

Іван САХНО, д.т.н., професор, завідувач кафедри гірничої справи;

Діна МИХАЙЛОВА, викладач кафедри гірничої справи;

Олексій КОЙФМАН, к.т.н., доцент, завідувач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем;

Юрій ШРАМКО, к.т.н., доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем;

Ірина СМІРНОВА, к.е.н., доцент, завідувач кафедри цифрових технологій та проектно-аналітичних рішень;

Олена ЛАТИШЕВА, к.е.н., доцент кафедри цифрових технологій та проектно-аналітичних рішень;

Олег КРУЖИЛКО, д.т.н., професор, професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля;

Марина ТАВРЕЛЬ, старший викладач кафедри безпеки праці та охорони довкілля;

Наталія КАЙДАН, к.ф.-м.н., доцент, завідувач кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін;

Наталія ГРУДКІНА, д.т.н., доцент, професор кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін

S81 **Start in Science: студентська науково-технічна конференція : збірник тез і анотацій наукових доповідей.** – Одеса : Олді+, 2025. – 350 с.

ISBN 978-617-8559-69-4

До збірника увійшли матеріали, у яких обговорюються перспективні науково-технічні розробки молодих науковців прикладного характеру.

УДК 001.892(062.552)

ISBN 978-617-8559-69-4

© ТОВ «ТУ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025

ЗМІСТ

АНАЛІЗ СКЛАДУ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ НА ПРИКЛАДІ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ	
<i>Железняк Є. М., Максимова Н. М.</i>	240
РЕЗУЛЬТАТИ ОБРОБКИ ДАНИХ АУДИТУ РОБОЧОГО МІСЦЯ МАШИНІСТА КРАНА	
<i>Золотарьова І. О., Володченко Н. В., Чеберячко Ю. І.</i>	243
ВПЛИВ ПСИХОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПРАЦІВНИКІВ НА ДОТРИМАННЯ ЗАХОДІВ БЕЗПЕКИ	
<i>Льїна Д. І., Майстренко В. В.</i>	247
СПОСІБ ЖИТТЯ ЯК МОДИФІКАТОР ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ: ВІД ЗВИЧОК ДО НАСЛІДКІВ	
<i>Коробкіна Н. А., Шароватова О. П.</i>	251
ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПСИХОСОЦІАЛЬНИМИ РИЗИКАМИ В СТРУКТУРУ ОХОРОНИ ПРАЦІ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ	
<i>Кравчук І. В., Кружилко О. Є.</i>	254
ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПЕРСОНАЛУ В УМОВАХ ЗАБРУДНЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ТЕРИТОРІЙ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИМИ ПРЕДМЕТАМИ	
<i>Кравчук І. В., Кружилко О. Є.</i>	257
ЗАХОДИ З МІНІМІЗАЦІЇ ВПЛИВУ НА ПОВІТРЯ ПРИ НАВАНТАЖУВАЛЬНО- РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ РОБОТАХ НА ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОМУ КОМБІНАТІ	
<i>Кукса Р. К., Максимова Н. М., Романь А. М.</i>	260
РОЛЬ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПІДВИЩЕННІ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ БЕЗПЕКИ НА ПІДПРИЄМСТВІ	
<i>Лубінець М. М., Майстренко В. В.</i>	262
ДЕЯКІ ПИТАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ АСПІРАЦІЇ ТА ГАЗООЧИСНОЇ УСТАНОВКИ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА	
<i>Манахова Г. О., Максимова Н. М., Накемпій О. К.</i>	266
АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД НА КОКСОХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ	
<i>Мінченкова А. Г., Накемпій О. К.</i>	271
ПОРІВНЯННЯ МОДЕЛЕЙ РОЗЛИВУ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН У КОНТЕКСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ	
<i>Міняйло Д. О., Чеберячко Ю. І.</i>	275
ОСОБЛИВОСТІ АНАЛІЗУ МІННОЇ НЕБЕЗПЕКИ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕНОГО КАЛЬКУЛЯТОРА ДЛЯ ОЦІНКИ БЕЗПЕЧНОЇ ДИСТАНЦІЇ	
<i>Моїсєєв Є. О., Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І.</i>	281

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ АСПІРАЦІЇ ТА ГАЗООЧИСНОЇ УСТАНОВКИ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Манахова Г. О.

студентка гр. ТЗ-22-16

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

м. Запоріжжя, Україна

Максимова Н. М.

*к.т.н., доцент, доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля,
науковий керівник*

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

м. Запоріжжя, Україна

Накемній О. К.

*старший викладач кафедри безпеки праці та охорони довкілля,
науковий керівник*

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

м. Запоріжжя, Україна

Сучасне ливарне виробництво характеризується значним техногенним навантаженням на навколишнє середовище, зокрема на атмосферне повітря. У процесі виплавки металу, приготування формувальних сумішей та інших технологічних операцій в атмосферу надходить значна кількість забруднюючих речовин, серед яких оксиди вуглецю, сірки, азоту, тверді частинки пилу та інші шкідливі сполуки. Ефективна система аспірації та газоочищення є необхідною умовою для забезпечення екологічної безпеки підприємства та дотримання санітарно-гігієнічних норм у виробничих приміщеннях [1].

Проблема очищення газових викидів ливарних підприємств набуває особливої актуальності в контексті посилення екологічних вимог та впровадження принципів сталого розвитку у промисловості. Сучасні технології газоочищення повинні забезпечувати не лише високу ефективність вилучення забруднюючих речовин, але й характеризуватися економічною доцільністю та енергоефективністю [2].

СЕКЦІЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ

Спектр забруднюючих речовин, що утворюються у ливарному виробництві, включає як неорганічні, так і органічні сполуки різного ступеня токсичності. Основними неорганічними забруднювачами є тверді частинки пилу, оксиди вуглецю, азоту та сірки, сполуки важких металів [2].

Впровадження ефективних систем газоочищення на ливарному виробництві забезпечує дотримання екологічних нормативів та забезпечення санітарно-гігієнічних умов праці.

Система аспірації ливарного виробництва призначена для організованого відведення забруднених газів від технологічного обладнання та забезпечення нормативних параметрів повітряного середовища у виробничих приміщеннях. Система включає мережу газоходів, аспіраційні укриття над джерелами виділень, димососи та газоочисне обладнання [3].

Наприклад, аспіраційні укриття електродугової печі виконуються як витяжні зонти, що розташовані над рівнем подини печі. Конструкція зонта повинна забезпечувати ефективне уловлювання газів, що виділяються при плавці, та мінімізує підсос зовнішнього повітря.

Транспортування газів від аспіраційних укриттів до газоочисного обладнання здійснюється по системі газоходів. Для зниження тепловтрат та конденсаутворення газоходи ізолюють мінераловатними плитами. Швидкість руху газів у газоходах підтримується в межах 15–20 м/с для запобігання осадженню пилу. Для подачі газів на очищення використовуються димососи.

Система аспірації, як правило, забезпечується автоматизованою системою контролю та управління, що включає датчики тиску, температури та концентрації забруднюючих речовин. Дані з датчиків передаються на диспетчерський пункт, де здійснюється моніторинг роботи системи та оперативне регулювання параметрів.

Газоочисна установка ливарного виробництва зазвичай є багатоступеневою: попереднє уловлювання крупнодисперсного пилу в циклонах та тонке очищення в рукавних фільтрах. Така схема забезпечує високу ефективність очищення при відносно низьких експлуатаційних витратах.

В умовах ливарного виробництва, як першу ступінь очищення, часто використовують групові циклоні. Ефективність уловлювання циклонів за частинками розміром більше 20 мкм може сягати 95–98 %.

Принцип роботи циклонів базується на дії відцентрових сил, що виникають при закрученому русі газового потоку. Забруднений газ надходить у циклон через тангенціальний патрубок у верхній частині корпусу та рухається по спіральній траєкторії донизу. Під дією відцентрових сил частинки пилу відкидаються до стінок циклону та осідають у нижній конічній частині, звідки видаляються через шлюзовий затвор.

Очищений газ виходить через осьову трубу у верхній частині циклону та надходить на другу ступінь очищення. Для підвищення ефективності роботи циклонів передбачена можливість зрошення стінок водою, що запобігає налипанню пилу та полегшує його видалення [4].

Друга ступінь очищення часто реалізована у вигляді рукавного фільтра. Робочий цикл рукавного фільтра включає процеси фільтрації та регенерації. При фільтрації забруднений газ проходить через стінки рукавів, при цьому частинки пилу затримуються на зовнішній поверхні фільтрувального матеріалу, утворюючи пиловий шар. Очищений газ відводиться через внутрішню порожнину рукавів у чисту камеру фільтра. Поширення набули рукавні фільтра з регенерацією фільтрувальних рукавів шляхом зворотної продувки стисненим повітрям.

Видалення пилу з бункерів циклонів та рукавного фільтра здійснюється за допомогою пневматичної системи транспортування до силосів для тимчасового зберігання. Уловлений пил використовується як вторинна сировина для виготовлення агломерату або реалізується стороннім організаціям.

Ефективна робота газоочисної установки забезпечується сучасною системою автоматизованого контролю та управління, що включає контрольно-вимірювальні прилади, засоби автоматики та диспетчерську систему збору даних.

СЕКЦІЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ

Система автоматичного управління процесом регенерації рукавного фільтра включає програмований логічний контролер, що забезпечує послідовну продувку секцій фільтра згідно з заданим алгоритмом. Можливе як автоматичне управління за сигналом від датчика перепаду тиску, так і ручне управління з диспетчерського пульта [5].

Диспетчерська система збору даних може бути побудована, наприклад, на базі SCADA-системи, що забезпечує візуалізацію технологічного процесу, архівування параметрів роботи обладнання та формування звітів для екологічних служб. Система дозволяє здійснювати дистанційний моніторинг роботи газоочисної установки та оперативно реагувати на відхилення від нормальних режимів роботи.

Оцінка ефективності роботи газоочисної установки здійснюється на основі систематичних інструментальних вимірювань концентрацій забруднюючих речовин на вході та виході обладнання, розрахунку ступеня очищення та порівняння фактичних показників з проектними характеристиками [6].

За умови роботи в штатному режимі технологічного обладнання на ливарному виробництві, як правило, фактичні концентрації забруднюючих речовин у очищених газах значно нижчі встановлених нормативів. Наприклад, середні концентрації пилу, зазвичай, не перевищує 25 мг/м^3 при нормативі 150 мг/м^3 , монооксида вуглецю – 250 мг/м^3 при нормативі 500 мг/м^3 . Валові викиди пилу, як правило, менші дозволених річних обсягів. Це є оцінкою ефективності природоохоронних заходів.

На основі проведеного аналізу можна сформулювати наступні рекомендації щодо оптимізації роботи системи газоочищення. По-перше, доцільно встановити автоматичне регулювання продуктивності димососів залежно від режиму роботи плавильних агрегатів, що дозволить знизити енерговитрати та підвищити стабільність роботи системи.

По-друге, рекомендується модернізація системи попереднього охолодження газів перед надходженням на рукавні фільтри. Зниження температури газів з $200\text{--}250 \text{ }^\circ\text{C}$ до $120\text{--}150 \text{ }^\circ\text{C}$

 START IN SCIENCE

дозволить підвищити ресурс роботи фільтрувальних рукавів та знизити експлуатаційні витрати.

По-третє, доцільно впровадження системи безперервного моніторингу викидів з передачею даних до регіональних екологічних служб в режимі реального часу. Це забезпечить прозорість екологічної діяльності підприємства та сприятиме дотриманню природоохоронного законодавства [7].

По-четверте, рекомендується періодичне проведення енергетичних обстежень газоочисного обладнання з метою виявлення резервів енергозбереження. Оптимізація аеродинаміки газопроводів та модернізація димососів може забезпечити зниження енерговитрат на 15–20 %.

Перелік використаних джерел

1. Bermúdez J. M., Arenillas A., Luque R., Menéndez J. A. An overview of novel technologies to valorise coke oven gas surplus. *Fuel Processing Technology*. 2013. Vol. 110. P. 150–159.
2. Збірник показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин в атмосферне повітря різними виробництвами. Донецьк : Український науковий центр технічної екології, 2004. Т. 1. 184 с.
3. Trembach T. F., Klymenko A. G. Solutions for the reconstruction of coke sorting aspiration systems. *Journal of Coal Chemistry*. 2023. № 6. P. 23–28.
4. Природоохоронні технології та ін. Ч. 1 : Захист атмосфери : навчальний посібник / Л. І. Северин. Вінниця : ВНТУ, 2012. 388 с.
5. Bermúdez J. M., Arenillas A., Luque R., Menéndez J. A. An overview of novel technologies to valorise coke oven gas surplus. *Fuel Processing Technology*. 2013. Vol. 110. P. 150–159.
6. ГОСТ 17.2.4.05-83 «Охрана природы. Атмосфера. Гравиметрический метод визначення частинок пилу у повітрі».
7. Природоохоронні технології та ін. Ч. 1 : Захист атмосфери : навчальний посібник / Л. І. Северин. Вінниця : ВНТУ, 2012. 388 с.

SCI-CONF.COM.UA

SCIENTIFIC DEVELOPMENT IN A CHANGING WORLD



**PROCEEDINGS OF VI INTERNATIONAL
SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE
JUNE 8-10, 2026**

**LVIV
2026**

UDC 001.1

The 6th International scientific and practical conference “Scientific development in a changing world” (June 8-10, 2026) SPC “Sci-conf.com.ua”, Lviv, Ukraine. 2026. 1199 p.

ISBN 978-966-8219-80-1

The recommended citation for this publication is:

Ivanov I. Analysis of the phaunistic composition of Ukraine // Scientific development in a changing world. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Lviv, Ukraine. 2026. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-development-in-a-changing-world-8-10-06-2026-lviv-ukrayina-arhiv/>.

Editor

Komarytsky M.L.

Ph.D. in Economics, Associate Professor

Collection of scientific articles published is the scientific and practical publication, which contains scientific articles of students, graduate students, Candidates and Doctors of Sciences, research workers and practitioners from Europe, Ukraine and from neighbouring countries and beyond. The articles contain the study, reflecting the processes and changes in the structure of modern science. The collection of scientific articles is for students, postgraduate students, doctoral candidates, teachers, researchers, practitioners and people interested in the trends of modern science development.

e-mail: lviv@sci-conf.com.ua

homepage: <https://sci-conf.com.ua>

©2026 Scientific Publishing Center “Sci-conf.com.ua” ®

©2026 Authors of the articles

62.	Максимова Н. М., Петрушина Г. О., Манахова Г. О. СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ВУГЛЕЦЕЄМНИХ ГАЛУЗЕЙ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ КЛІМАТИЧНОЇ ПОЛІТИКИ ЄС	308
63.	Павленко В. Я. ПІДХОДИ ДО ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ НАВИЧОК РОБОТИ У МАЙБУТНІХ СПЕЦІАЛІСТІВ З КІБЕРБЕЗПЕКИ	315
64.	Проценко О. М., Сонов В. П. КОНЦЕПЦІЯ СТВОРЕННЯ ЗВЕДЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ВІМ	318
65.	Сікульський В. Г., Кучмії А. Є. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ FDM-ДРУКУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА КОНСТРУКТОРСЬКІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ ТА ОСНАЩЕННЯ	323
66.	Скакун О. В. ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ У СФЕРІ ЗАКОННОГО ПЕРЕХОПЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ У ФРАНЦІЇ	327
67.	Гараненко В. Р., Гарасюк А. М. ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ В МОБІЛЬНИХ ДОДАТКАХ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ	331
68.	Гарасюк А. М., Гринчук М. А. МИТТЄВИЙ ПЕРЕКЛАД АУДІО ТА НАПИСІВ У НЕЗНАЙОМОМУ СЕРЕДОВИЩІ	333
69.	Гарасюк А. М., Хмара Ю. О. ІІІ-АСИСТЕНТИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПРИЙОМУ ЛІКІВ ТА ВЗАЄМОДІЇ ПРЕПАРАТІВ	337
70.	Гончій Н. В. ПЛАНУВАННЯ ТА ЗДІЙСНЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО АУДИТУ ВИПРОБУВАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ	340
71.	Шаповал С. П., Водка Р. С. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО ГЕЛІОНАГРІВНИКА З ПОТРІБНОЮ ОРІЄНТАЦІЄЮ АБСОРБЕРА	343
72.	Шаповалов О. С., Курамшин Я. О. ОПИС ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З ПОЗИЦІЇ ТЕОРІЇ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	346
73.	Шорнікова С. В. МІЖНАРОДНА СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА СЕРТИФІКАЦІЯ В ПУБЛІЧНОМУ УПРАВЛІННІ	349
74.	Шур О. І., Купер І. М. ПЕРЕРОЗПОДІЛ ЗАЛИШКОВОЇ НАФТОНАСИЧЕНОСТІ У ВИСНАЖЕНИХ ОБВОДНЕНИХ ПЛАСТАХ	353

СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ВУГЛЕЦЕЄМНИХ ГАЛУЗЕЙ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ КЛІМАТИЧНОЇ ПОЛІТИКИ ЄС

Максимова Наталія Миколаївна,

к.т.н., доцент

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»,

м. Запоріжжя, Україна

Петрушина Галина Олександрівна,

к.х.н., доцент

Дніпровський державний аграрно-економічний університет,

м. Дніпро, Україна

Манахова Ганна Олегівна,

бакалавр

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»,

м. Запоріжжя, Україна

Вступ. Система торгівлі викидами ЄС (EU ETS 1) наразі перебуває на четвертому етапі (2021–2030 рр.). Щороку суб'єкти, на яких поширюється дія системи, повинні здавати квоти на викиди відповідно до вимог EU ETS1. Основним методом розподілу квот є аукціони, а безкоштовний розподіл на основі контрольних показників застосовується для мінімізації ризику «витоку вуглецю». Розподіл здійснюється на підставі фіксованого бенчмаркінгу. Середні ціни у 2025 році на аукціоні становили 73,43 євро, а на вторинному ринку – 74,35 євро (Emissions trading worldwide status report 2026. ICAP).

У п'ятнадцяти державах-членах ЄС вплив зростання цін на електроенергію, пов'язаного з ETS1, на енергоємні галузі промисловості пом'якшується компенсаційними механізмами (Trends in carbon intensity and the macroeconomic role of the EU Emissions Trading System. 17.11.2025. Economy and Finance. The European Commission). Наприклад, вартість квот на викиди парникових газів у німецькому автомобільній транспортній галузі та американських кредитів LCSF/RIN перевищила витрати на повний життєвий цикл виробництва біогазу: витрати на виробництво (ЄС) RNG 1 становили 20-30 євро/ГДж, а середня готовність платити за відновлювані джерела енергії

(ЕС) – 50-60 євро/ГДж (Renewable gas tracking systems – Value of biomethane/RNG certificates). На національному рівні окремих держав також можуть бути відмінності.

Мета роботи: дослідити нормативно-правові аспекти декарбонізації промисловості України в умовах євроінтеграції.

Матеріали та методи. Аналітичний огляд інформаційних джерел вільного доступу.

Результати та обговорення. В Україні наразі започатковується Національна система торгівлі квотами на викиди парникових газів, впровадження якої сприятиме зменшенню фінансового навантаження від оподаткування Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). Під час обговорення Проекту Закону «Про засади функціонування національної системи торгівлі квотами на викиди парникових газів» у травні 2026 р. були окреслені напрямки: запроваджується національний механізм регулювання викидів вуглецю на кордоні з ЄС; національна ціна квот встановлюється з урахуванням цінового навантаження СТВ на економіку ЄС (% від ВВП) та за попереднім прогнозом складатиме до 10 €/т CO₂ у 2034 році; доходи спрямовуються у спеціальний фонд державного бюджету «Фонд модернізації України» та використовуються для фінансової підтримки інвестиційних проєктів – до 30% від загальних витрат; оператори установок НСТВ звільняються від подвійного оподаткування (НСТВ та податок на викиди CO₂) в межах установок; можливість зменшення зобов'язання за квотами (не більше ніж на 90%) за рахунок фактичних інвестицій та інновацій, а також перенесення невикористаних витрат на наступні роки до повного використання; можливість надання державної допомоги у секторах із реальним ризиком витоків вуглецю для відшкодування витрат на купівлю квот у ціні електроенергії.

Також під час зустрічі обговорювались: можливість напрацювання додаткових механізмів щодо зменшення фінансових зобов'язань у разі запровадження ефективних заходів з декарбонізації (наприклад, у разі частково використання біопалива вуглецеємними галузями); за розвитку сприятливих

сценаріїв очікується найближчого часу збільшення кількості акредитованих органів з сертифікації. Слід зауважити, що національна ціна квот та інші аспекти здебільшого залежать від зовнішніх чинників, зокрема досягнення домовленостей з міжнародними стейкхолдерами.

Ціноутворення на біометан як в ЄС, так й в Україні базується на принципі «ринкова ціна природного газу + зелена премія». Базовою прив'язкою для європейського ринку є котирування на нідерландському хабі TTF (Title Transfer Facility). Ціна біометану формується як ціна природного газу (TTF) плюс вартість гарантій походження (Guarantees of Origin – GoO). На європейському ринку ціни на GoO формуються через аукціони. Вартість GoO коливається залежно від типу сировини та країни виробництва.

Станом на 2025 рік, середня експортна ціна українського біометану орієнтована на позначку 900 €/тис. м³ (Середня ціна біометану при експорті може становити 900 €/тис. м³ – глава БАУ. Новини 07.02.2025. Інтерфакс-Україна), що включає витрати на транспортування та сертифікацію. Внутрішня собівартість в Україні варіює від 313 до 1 136 €/тис. м³ (Біогаз та біометан в Україні. UABIO), що зумовлено різними технологіями виробництва та логістичними витратами на підключення до газорозподільних мереж.

Щодо вартості біометанових заводів ціни варіюють суттєво – в діапазоні 300-1200 €/тис. м³ (Біометан як рішення для сталого відновлення знищеної газової інфраструктури. 14.05.2025). Підтримання розвитку біометанового ринку є перспективним напрямком для аграрно-промислової країни, про що свідчить Програма розвитку виробництва біометану на період до 2035 року та операційного плану заходів з її виконання, яка була затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 22.04.2026 р. № 514.

Без підтвердження відповідності Директиві RED III (Renewable Energy Directive), біометан не може претендувати на зелену премію та зараховуватися як відновлюване паливо. Директива ЄС про відновлювані джерела енергії (RED III) встановлює обов'язкові вимоги до виробництва біоенергії з біомаси. Міжнародні та українські виробники використовують системи добровільної

сертифікації, які визнаються Європейською Комісією. Завдяки сертифікації (наприклад, ISCC EU) енергетичні компанії та виробники гарантують використання саме сталої біомаси для виробництва енергії.

Задля досягнення амбітних цілей щодо нульової нейтральності планується розширення (EU ETS1) за рахунок системи торгівлі викидами Європейського Союзу 2 (EU ETS2), яка охоплюватиме викиди CO₂ від спалювання палива в галузях, що не охоплені чинною системою торгівлі викидами ЄС. Як зазначено (Emissions trading worldwide status report 2026. ICAP), планується поступове створення окремої системи торгівлі викидами (EU ETS2), яка охопить викиди від палива, що спалюється в будівлях, у дорожньому транспорті та в інших секторах (переважно невеликі промислові джерела викидів, які не охоплені існуючою системою EU ETS1). EU ETS2 доповнить інші заходи Європейського зеленого курсу в охоплених секторах, допомагаючи державам-членам досягти своїх цілей щодо скорочення викидів відповідно до Регламенту (ЄС) 2018/842.

Наразі зберігається тенденція посилення екологічних вимог щодо викидів парникових газів. Після вуглекислого газу (CO₂) метан (CH₄) є другим за величиною фактором, що сприяє зміні клімату (Methane emissions. Carbon management and fossil fuels. The European Commission). За даними Науково-консультативної групи Коаліції з питань клімату та чистого повітря (CCAC), скорочення викидів метану, пов'язаних з діяльністю людини, на 50% протягом наступних 30 років пом'якшить глобальну зміну температури на 0,2°C, що стане значним кроком до утримання загального підвищення глобальної температури нижче 2°C відповідно до Паризької угоди.

У межах стандартного підходу з використанням 100-річного потенціалу глобального потепління (GWP100), який застосовується в офіційній звітності РКЗК ООН та базується на методології IPCC, для розрахунку CO₂-еквіваленту викидів метану використовується коефіцієнт 28 (IPCC AR5) або 21–25 (у попередніх оцінках IPCC). Якщо перейти до 20-річного горизонту, картина суттєво змінюється. Згідно звіту IPCC AR6, внесок метану зростає приблизно

утричі ($GWP_{20} = 82,5$). Це пояснюється тим, що викиди метану в атмосферу спричиняє більш ніж у 100 разів сильніший парниковий ефект, але його тривалість життя в атмосфері становить лише близько 10 років, після чого він розкладається на воду та CO_2 . Таким чином, розкладання 1 т CH_4 призводить до утворення 2,75 т CO_2 . В Україні на метан припадає приблизно 27% загальних викидів парникових газів (63 млн. т CO_2 -екв. у 2023 році за GWP_{100}), причому енергетичний сектор відповідає приблизно за 71% національних викидів метану (Викиди метану в енергетичному секторі України: Недооцінені виклики та можливості. Квітень 2026. Green Deal Ukraine). Технічний потенціал скорочення викидів у нафтогазовому секторі, вугледобувній промисловості, враховуючи потенціал утилізації метану вугільних шахт, та у секторі відходів оцінюється приблизно у 2–3 млрд. m^3 щороку, що еквівалентно 60–85 млн. т CO_2 -екв. на рік (GWP_{100}) за рівнями до повномасштабного вторгнення. Реалізація цього потенціалу може покрити до 20% попиту України на природний газ, зменшити залежність від імпорту та генерувати до 750-1100 млн. € щорічно.

Як зазначено у Стратегії ЄС щодо метану (COM/2020/663), в ЄС 53% антропогенних викидів метану надходить із сільського господарства, 26% – з відходів та 19% – з енергетики.

Комісія підтримуватиме створення незалежної міжнародної обсерваторії викидів метану, завданням якої буде збір, узгодження, перевірка та публікація даних про антропогенні викиди метану на глобальному рівні. Обсерваторія буде базуватися на рамках ООН та спиратиметься на низку робочих напрямків, таких як Партнерство з метану нафти і газу (OGMP) та глобальні наукові дослідження метану в рамках Коаліції за клімат і чисте повітря (COM/2020/663).

Спочатку обсерваторія розглядає метан з нафтового та газового секторів. Але передбачається розширення сфери діяльності обсерваторії, як тільки для секторів вугільної промисловості, сфері управління відходами та сільськогосподарської діяльності будуть встановлені порівняно надійні

методології моніторингу та звітності щоб охопити (COM/2020/663). Це знайде відображення у Системі торгівлі викидами ЄС (ETS) та Регламенті про розподіл зусиль (ESR), останній з яких охоплює всі викиди метану в ЄС, а також усі інші парникові гази, що не охоплюються системою торгівлі викидами.

Комісія, наприклад, оцінить, чи можна посилити роль Директиви про промислові викиди (IED) у запобіганні та контролі викидів метану. Це може бути зроблено як шляхом розширення сфери застосування IED, щоб охопити сектори, що викидають метан, які ще не включені до її сфери застосування, так і шляхом посилення уваги до метану під час переглядів довідкових документів з найкращих доступних технологій (BAT, BREF). Це призведе до того, щоб методи скорочення викидів метану були визначені в оглядах BREF, а рівні викидів метану, пов'язані з BAT (BAT-AEL), були включені до висновків щодо BAT. Комісія також оцінить потенціал розширення секторальної сфери застосування Регламенту Європейського реєстру викидів та перенесення забруднюючих речовин (E-PRTR) для звітності про викиди метану (COM/2020/663).

Як відзначено у Стратегії ЄС щодо метану (COM/2020/663), з урахуванням Директиви RED II/RED III, сталим шляхом декарбонізації антропогенної діяльності є використання біогазу, що утворюється з відходів сільського господарства відповідно до класифікації, для утворення або електроенергії (за використанням біогазових установок на підприємствах сільського господарства), або для виробництва біометану.

Середньостроковий прогноз UABIO передбачає, що виробництво біометану досягне 250 млн. м³/рік до 2027 року та до 1 млрд. м³ у 2030 році. Повний потенціал виробництва біометану в Україні оцінюється в діапазоні від 5,9 млрд. м³/рік до 21,8 млрд. м³/рік до 2050 року (Жнива зеленої енергії: потенціал співпраці між Україною та ЄС у сфері біометану / А. Богушенко, О. Епик, Д. Науменко, А. Лоскот-Страхова, Г. Цахманн, М. Занєвич (ред.). 2024).

Транспортування біометану з України до ЄС здійснюється існуючою

газотранспортною системою. Однак критичним є питання віртуального реверсу та підтвердження транскордонної передачі гарантій походження. Україна вже інтегрувала свої реєстри гарантій походження з європейськими системами (наприклад, через платформу ERGaR), що робить експорт технічно можливим.

Висновки. Таким чином, міжнародна кліматична політика посилює увагу щодо викидів парникових газів. Для вуглецеємних виробництв сертифікований біометан дозволяє знизити викиди Scope 1. Заходи з декарбонізації вуглецеємних підприємств тривають, але слід очікувати інтенсифікацію впровадження та підвищення рентабельності проєктів декарбонізації у разі посилення державної підтримки бізнесу. У разі запровадження роботи Національної системи торгівлі квотами на викиди парникових газів та Фонду модернізації України за сприятливим сценарієм слід очікувати суттєве зменшення фінансового навантаження на бізнес та створення сприятливих умов для впровадження проєктів з декарбонізації. Також можливі зміни найближчого часу в інших нормативно-правових актах України, зокрема в розрізі платежів за викиди діоксиду вуглецю. Слід очікувати перегляду BREF та висновків BAT, щодо розширення секторальної сфери застосування Регламенту Європейського реєстру викидів та перенесення забруднюючих речовин (E-PRTR) для звітності про викиди метану.

За доцільне вважається врахування можливостей залучення очищеного біогазу – метану, в першу чергу, у вуглецеємних галузях, оскільки очікується і подальше посилення європейської екологічної політики щодо досягнення амбітних цілей. Про це, зокрема, свідчить створення окремої системи торгівлі викидами (EU ETS2). Перелік органічних відходів (додаток IX Директиві (ЄС) 2018/2001) періодично переглядається й доповнюється, тому в подальшому за доцільне слід розглядати можливість використання біомаси для виробництва біопалива, яка утворюється під час упорядкування санітарно-захисних зон промислових об'єктів, а також рослинних решток, зібраних із відвалів та інших накопичувачів відходів, пилопригнічення яких забезпечено озелененням.



ДОДАТОК Б. 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:

- *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 подала: Ганна Манахова

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