МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

рівень вищої освіти____ *перший (бакалаврський) рівень* _____

на тему *Розробка системи очищення газів від печей виплавки феросиліцію*

Виконав: студент *4* курсу, групи *6.1832*

спеціальності __*183 Технології захисту навколишнього середовища*
(код і назва спеціальності)
освітньої програми _*Технології захисту навколишнього середовища*
(назва освітньої програми)
спеціалізації _____ _____
(код і назва спеціалізації)

Ківа.Д.В. _____
(ініціали та прізвище) (підпис)

Керівник *доц., к.т.н Кожемякін Г.Б.* _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, ПІБ) (підпис)

Рецензент *проф., д.х.н. Прутцьков Д.В.* _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, ПІБ) (підпис)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра _____*металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*_____

Рівень вищої освіти _____*перший бакалаврський рівень*_____
перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність ____*183 Технології захисту навколишнього середовища*_____
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма ____ *Технології захисту навколишнього середовища*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____*МТЕТБ*_____
_____*Ю.О. Бєлоконь*__

"_____" _____2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ

_____ *Ківі Діані Вадимівні*_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи)__ Розробка системи очищення газів від печей виплавки _____*феросиліцію*____ _____

_____

керівник роботи (проєкту)_____*доц.,к.т.н. Кожемякін Геннадій Борисович*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від *"23"___12__ 2025* року № *1831-с*

2. Строк подання студентом роботи (проєкта)____*10.06.2026*_____

3. Вихідні дані до роботи (проєкта)__*Витрата газу - 136500 м^3/год, Початковий вміст пилу - 2,5 г/м^3, температура газу – 200^{o}С,*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Технологія виплавки феросиліцію. Джерела утворення газових викидів. Аналіз існуючих схем очистки газів відкритих феросплавних печей. Обґрунтування способу очистки газів. Розрахунок споруд системи очистки газу відкритих печей при виплавці феросиліцію. Охорона праці.*_____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Креслення, презентаційний матеріал: План та розріз феросплавного цеху. Технологічна схема виплавки феросиліцію. Руднотермічна піч. Технологічна схема очистки газу. План та розріз газоочистки. Основні апарати схеми очистки газу та утилізації пилу.

_____

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Розділ 1	*Кожемякін Г.Б., доцент*	
Розділ 2	*Кожемякін Г.Б., доцент*	
Розділ 3	*Кожемякін Г.Б., доцент*	
Нормоконтроль	*Вагін А.В., ст.викладач*	

7. Дата видачі завдання *15.02.2026*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	*Загальна частина*	*02.2026-03.2026*	
2	*Спеціальна частина*	*03.2026-04.2026*	
3	*Охорона праці*	*05.2026*	
4	*Креслення*	*05.2026-06.2026*	

Студент _____ *Д.В. Ківа*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ *Г.Б. Кожемякін*

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційний проект для здобуття ступеня вищої освіти бакалавр: 80с., 11 табл., 9 рис., 37 джерел.

АЕРОДИНАМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК, РУДНОТЕРМІЧНА ПІЧ, ФЕРОСПЛАВНЕ ВИРОБНИЦТВО, РУКАВНИЙ ФІЛЬТР, СУХЕ ОЧИЩЕННЯ, СХЕМА ГАЗООЧИЩЕННЯ, ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ФЕРОСИЛІЦІЮ

Об’єкти дослідження – ділянка газоочищення феросплавних газів;

Предмет дослідження – технологія очищення газів вілкритих печей виплавки феросиліцію;

Мета роботи – на основі вивчення апаратурно-технологічних схем газоочисних установок, які експлуатуються у промисловому виробництві, переробці та утилізації відходів виробництва, проаналізувати умови і причини виникнення промислових викидів, технологічні процеси по локалізації викидів та розробити технологію очищення газів з метою запобігання забруднення технологічними газами навколишнього середовища, провести розрахунок обладнання, що використовується в процесі очистки, а також аеродинамічний розрахунок газового тракту.

Проаналізовані джерела викидів феросплавного виробництва, наведено їх фізичні та хімічні властивості. Виконаний аналіз існуючих технологій очищення газів відкритих руднотермічних печей. Проведено розрахунки, за результатом яких було підібрано технологічне обладнання – апарати для очищення технологічного газу та підготовки до утилізації вловленого пилу.

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА 9
1.1 Будова та характеристика цеху виплавки феросплавів 9
1.2 Технологія виробництва феросиліцію 13
1.2.1 Шихтові матеріали 14
1.2.2 Завантаження шихтових матеріалів до печі 15
1.2.3 Хід плавки 16
1.2.4 Випуск, розливання і оброблення сплаву 26
1.3 Конструкція відкритої руднотермічної печі для виплавки феросиліцію 27
1.4 Кількісні та якісні характеристики газових викидів 31
1.5 Очищення технологічних газів відкритих феросплавних печей 344
1.6 Обґрунтування та вибір схеми очищення газу 43
2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА 45
2.1 Визначення вихідних даних для проектування 45
2.2 Проектування основного та допоміжного обладнання технології очистки газів 46
2.2.1 Розрахунок та вибір тканинного фільтру 46
2.2.2 Вибір обладнання по видаленню вловленого пилу 51
2.2.3 Аеродинамічний розрахунок газового тракту 54
2.2.4 Підбір тягодуттєвого обладнання 56
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 59
3.1 Характеристика потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів
3.2 Заходи щодо поліпшення умов праці 61
3.3 Виробнича санітарія 63
3.3.1 Мікроклімат, опалення, вентиляція та кондиціонування повітря 63
3.3.2 Природне та штучне освітлення 64
3.3.3 Захист від шуму та вібрації 65
3.3.4 Побутові та допоміжні приміщення 67
3.4 Електробезпека 68
3.5 Пожежна безпека 69
3.6 Засоби індивідуального захисту 71
3.7 Розрахунок аерації цеху виплавки феросплавів 72
ВИСНОВКИ 76
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ 77

ВСТУП

Промисловий сектор належить до основних джерел антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище. У Україні погіршення екологічного стану значною мірою зумовлене низькою факторів, серед яких використання застарілих виробничих технологій і обладнання, підвищена енерго- та матеріаломісткість виробництва, що у 2-3 вражай перевищує аналогічні показники розвинених країн, висока концентрація промислових підприємств, а також переважання екологічно небезпечних виробництв у структурі промисловості.

Проблема охорони природи віднесена до найважливіших державних завдань, від рішення яких багато в чому залежить добробут нинішнього і майбутнього поколінь. Найважливішим з вказаних завдань є зменшення шкідливої дії відходів металургійного виробництва на довкілля. З цією метою необхідно розробляти і впроваджувати технологічні процеси, у тому числі і у феросплавному виробництві, що забезпечують зменшення відходів і їх утилізацію. Важливе значення має також застосування нових методів боротьби з шкідливими викидами речовин в атмосферу.

Суттєвою проблемою залишається недостатній рівень розвитку природоохоронної інфраструктури, зокрема нестача сучасних очисних споруд і систем оборотного водопостачання, а також неналежна експлуатація наявних природоохоронних об'єктів. Негативний вплив посилюється відсутністю ефективних правових та економічних механізмів стимулювання впровадження екологічно безпечних технологій і недостатнім контролем за дотриманням природоохоронного законодавства.

Сучасні технологічні процеси не забезпечують повного використання мінеральної сировини, внаслідок чого значна її частина повертається в довкілля у вигляді відходів. За оцінками дослідників, лише 1-2 % видобутої сировини перетворюється на готову продукцію, тоді як решта потрапляє до біосфери у вигляді відходів, забруднюючи атмосферу, ґрунти та водні ресурси.

Найбільший вплив на навколишнє середовище серед галузей промисловості здійснюють паливно-енергетичний, металургійний, хімічний та будівельний комплекси. У загальному обсязі атмосферних викидів найбільша частка припадає на теплову енергетику (25,7 %), чорну металургію (23,4 %), нафтовидобувну та нафтохімічну промисловість (13,7 %), транспорт (11,6 %), кольорову металургію (11,1 %), гірничодобувну промисловість (7,1 %), підприємства будівельного комплексу (3,4 %), машинобудування (2,8 %) та інші галузі (1,2 %) [1].

Паливно-енергетичний комплекс є одним із найбільших джерел забруднення довкілля через значні масштаби використання викопного палива, недосконаліть технологічних процесів і недостатній рівень очищення викидів. Значні екологічні проблеми виникають як у сфері видобутку палива, так і під година виробництва електроенергії.

Вагомий внесок у забруднення навколишнього середовища здійснює нафтогазовий комплекс. На всіх етапах його функціонування - від видобутку та транспортування до зберігання і переробки нафти - відбувається забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і водних об' єктів нафтою та нафтопродуктами, зокрема фенолом, бензолом, толуолом та іншими токсичними сполуками.

Одним із найпотужніших забруднювачів біосфери є металургійна промисловість. У Україні її розвиток спричинив значне загострення екологічної ситуації в Донбасі, Придніпров'ї та Приазов'ї. Металургійні комбінати повного циклу займають великі території, споживають значні обсяги природних ресурсів та кисню, а також утворюють значну кількість викидів і відходів.

Підприємства чорної металургії генерують близько 15 % усіх промислових викидів пилу в атмосферу, 8-10 % викидів діоксиду сірки та 10-15 % загального промислового водоспоживання. Крім того, сморід утворюють значні обсяги твердих відходів, зокрема шлаків і шламів. Металургійний завод із річною продуктивністю 1 млн т сталі може щорічно викидати в навколишнє

середовище сотні тисяч тонн шлаків, пилу, оксидів вуглецю, сірки, азоту та інших шкідливих речовин.

Кольорова металургія характеризується ще більшими труднощами щодо організації безвідходного виробництва. Для отримання однієї тонни металу часто необхідно переробити від 100 до 200 т руди, а в окремих випадках - навіть більше. Відходи цієї галузі нерідко містять токсичні сполуки сірки, миш'яку, сурми, селену, телуру, а також важкі метали, такі як свинець, цинк, мідь, кадмій і ртуть, що становлять серйозну загрозу для довкілля та здоров'я населення [2].

У сучасних умовах одним із пріоритетних напрямів розвитку промисловості є впровадження маловідходних і ресурсозберігаючих технологій. Їх застосування сприяє не лише зменшенню негативного впливу на довкілля, а й підвищенню економічної ефективності виробництва, раціональному використанню природних ресурсів та покращенню екологічної безпеки промислових регіонів.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Будова та характеристика цеху виплавки феросплавів

Сучасний феросплавний цех складається з двох основних частин : окремо розміщеного шихтового відділення та головного виробничого корпусу, в якому встановлені електропечі. Шихтове відділення виконує функції приймання, зберігання, підготовки та дозування сировинних матеріалів. Підготовка шихти включає такі операції, як сортування за розмірами, подрібнення, промивання та сушіння. Для цього застосовують різноманітні грохоти, щокові й валкові дробарки, мийні барабани та сушильні установки.

Транспортування матеріалів усередині відділення здійснюється за допомогою мостових грейферних кранів і стрічкових конвеєрів. Дозування складових шихти виконується ваговими стрічковими дозаторами. Сировину, зокрема руду, коксик, подрібнену металеву стружку, кварцит та інші матеріали, доставляють залізничним транспортом і розвантажують у приймальні бункери. Після завершення підготовчих операцій шихта подається до головного корпусу цеху стрічковими конвеєрами [3].

На рисунку 1.1 наведено поперечний розріз головної будівлі феросплавного цеху, призначеного для виробництва феросиліцію. У цеху використовуються обертові трьохелектродні руднотермічні печі потужністю 16,5 МВ·А кожна.

Головний корпус феросплавного цеху має три прольоти: пічний (I), розливний (II) та трансформаторний, який прилягає до пічного прольоту з правого боку.

Електропіч 1 належить до відкритого типу та оснащена самоспікальними електродами. Подина печі футерована вуглецевими блоками, а стінки виконані з алюмосилікатних плит і блоків. Подача та завантаження електродної маси в кожух електрода здійснюються за допомогою машини 8 крану типу. Над піччю змонтовані механізми 9 для переміщення та перепускання електродів, а також газозбірний зонт з витяжною трубою для видалення пилогазових викидів.

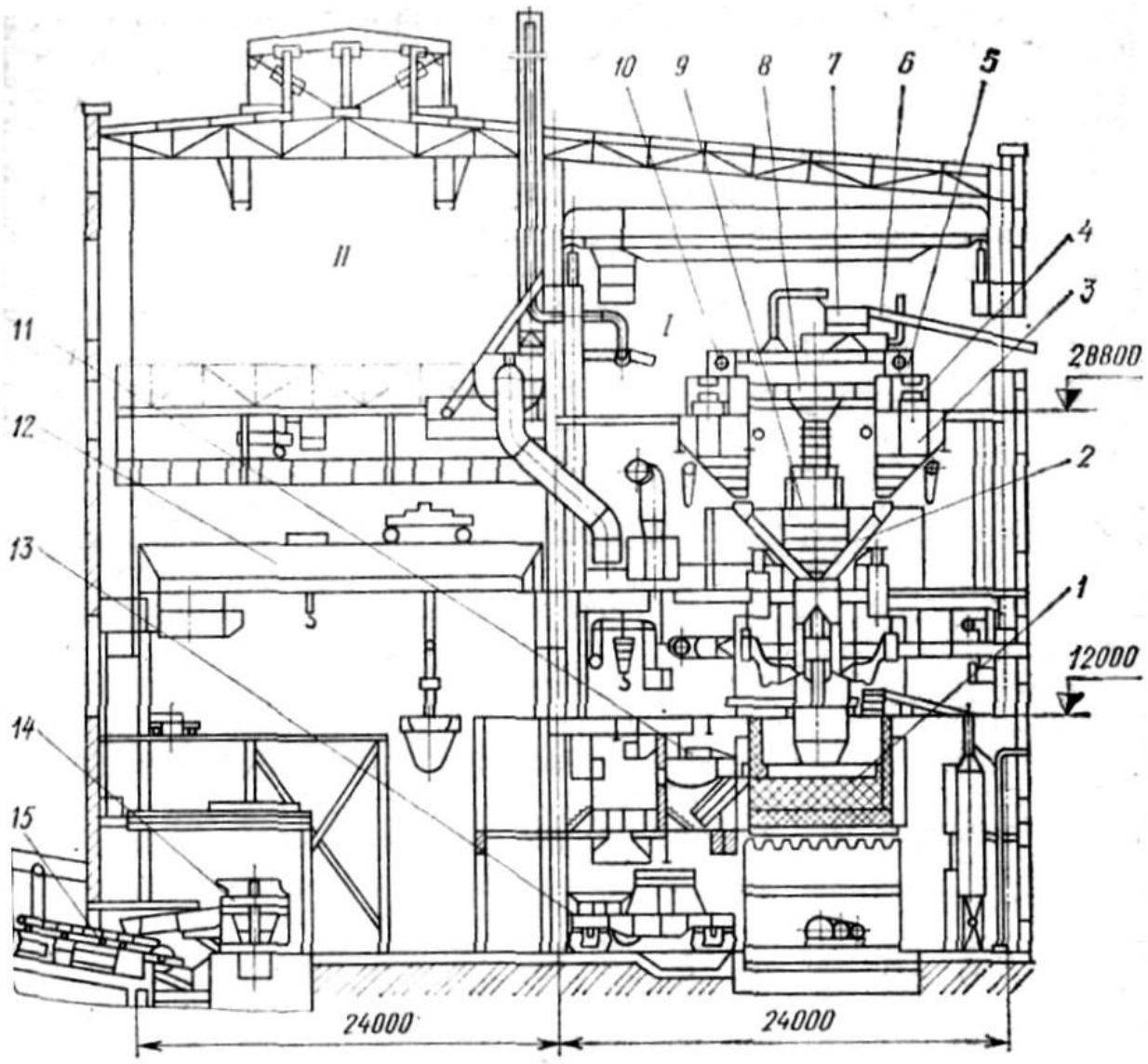


Рисунок 1.1 - Розріз головної будівлі феросплавного цеху

Для транспортування та завантаження шихтових матеріалів у печі використовуються три однакові конвеєрні комплекси з тічками, кожен із яких забезпечує роботові двох сусідніх печей. До складу комплексу входять тракт 6 подачі шихти із шихтового відділення, утворений двома паралельними похилими стрічковими конвеєрами, приймальна воронка 7, стаціонарний реверсивний конвеєр 10 з розподільними тічками 5 по обидва боки, два

пересувні реверсивні конвеєри 4, чотири групи витратних бункерів 3 (по дві на кожну піч) та система труботічок 2, встановлених безпосередньо на печах.

Похилий конвеєрний тракт забезпечує подачу підготовленої шихти до верхньої частини головного корпусу. Поклад від напрямку руху стрічки стаціонарний реверсивний конвеєр спрямовує матеріал на один із двох пересувних реверсивних конвеєрів. Останні подають шихту до лівих або правих груп витратних бункерів першої чи другої печі. Із бункерів шихта надходить до зони електродів через труботічки, прокладені крізь склепіння печі. Постійна наявність шихти в труботічках запобігає виходу пічних газів назовні.

Відкриття льотки для випуску феросплаву здійснюється шляхом пропалювання електричною дугою. Після завершення випуску отвір герметизують вогнетривкою масою. Ці операції виконуються дистанційно керованою машиною 11 для відкривання та закривання льотки. Розплавлений феросплав надходить у приймальний ківш, який разом зі шлаковим ковшем розміщується на передавальному візку 13. Під година наповнення приймального ковша шлак через його шкарпетка переливається у шлаковий ківш. Переміщення візка між пічним і розливним прольотами здійснюється за допомогою канатної лебідки.

Розливний проліт обладнаний мостовими кранами 12 загального призначення. Крім виконання навантажувально-розвантажувальних операцій, сморід транспортують феросплавні та шлакові ковші із застосуванням спеціальних вантажозахоплювальних траверс. Ківш із феросплавом встановлюють на стенд розливної машини, після чого його нахиляють гідравлічним механізмом кантування 14 для зливу металу. Формування чушок здійснюється на стрічковій розливній машині 15, конструкція та принцип роботи якої аналогічні машинам для розливання чавуну. Шлаковий ківш переставляють краном на шлаковоз і вивозять локомотивом за межі цеху для подальшої переробки шлаку.

У трансформаторному прольоті розміщуються пічні трансформатори, системи керування та обладнання для охолодження трансформаторного масла.

Виробництво низьковуглецевих феросплавів підвищеної чистоти здійснюється в рафінувальних феросплавних печах, конструкція яких багато в чому аналогічна трифазним дуговим електропечам, що застосовуються у сталеплавильному виробництві.

Плавильний корпус цеху є будівлею прямокутної форми завдовжки, що складається з двох прольотів: пічного і розливного. З боку пічного прольоту до будівлі цеху примикає трансформаторна естакада.

У пічному прольоті в лінію встановлені електропечі, є мостовий кран вантажопідйомністю 10 т для завантаження електродної маси в кожухи електродів печі і проведення ремонтних робіт, що самообпалюються. Шихта подається на верхню відмітку прольоту по похилому конвеєру. Тут вона перевантажується на реверсивний конвеєр і розподіляється на два потоки за допомогою автостел, що переміщаються уздовж прольоту. Кожна автостела обслуговує праву і ліву групи пічних кишень. З пічних кишень шихта по труботічкам поступає в приймальні воронки навколо електродів.

Феросиліцій з печі випускають періодично у міру його накопичення: шість-сім разів в зміну при виплавці сплаву ФС20 - ФС25 і чотири-п’ять разів в зміну при виплавці інших марок. Сплав випускають в ківш футерований шамотом і розливають найчастіше на конвеєрній машині в чавунні виливниці (мульди). Машинне розливання феросиліцію марок ФС75, ФС90 і ФС92 доки не освоєна, тому феросплави вказаних марок розливають в стаціонарні чавунні виливниці-піддони. Для отримання порошків і гранул з низькопроцентного феросиліцію застосовується грануляція феросиліцію на спеціальній установці.

При розливанні на розливних машинах ківш встановлюють мостовим краном вантажопідйомністю 140/32 т на кантівальний пристрій конвеєрної розливної машини. Воно розміщується в спеціальній камері, обладнаною системою газовідсмоктування. Застосовуються двохстрічкові розливні машини завдовжки 70 м, що забезпечують доставку готового металу на склад готової

продукції. Шлак в шлаковнях по торцевій залізничній колії прямує у відділення шлакопереробки, де дробиться і у такому вигляді використовується при виробництві стали. Цех провітрюється аераційним ліхтарем, розташованим на стику пічного і розливного прольотів.

1.2 Технологія виробництва феросиліцію

Сплав кремнію із залізом - феросиліцій широко використовується для розкислювання і легування стали, а також як відновник при отриманні феросплавів силікотермічним способом. Виплавляється феросиліцій із вмістом кремнію від 20 до 92 %. Близько 40 % від загального обсягу виробництва феросиліцію доводиться на марку ФС45 (45% Si) [6].

Для плавки використовують як відкриті, так і закриті трифазні печі. Плавка усіх сплавів кремнію із залізом, так само, як і плавка кристалічного кремнію, здійснюється в дуговому режимі, що якнайкраще забезпечується при використанні високої робочої напруги. Проте високі показники плавки феросиліцію забезпечуються тільки у тому випадку, коли потужні електричні дуги горять глибоко під шаром шихти. Тільки в цьому випадку вищерозміщені шари шихти забезпечують повне уловлення і переробку з'єднань кремнію з газової фази, що утворюється при високій температурі горна печі.

У зв'язку з вказаним для плавки зазвичай використовують робочі напруги електропечі, що змінюються залежно від потужності, в межах 160-225 В. На відміну від виробництва кристалічного кремнію, що супроводжується надзвичайно інтенсивним пилоутворенням, при плавці феросиліцію цілого ряду марок пилоутворення незначне, тому для плавки феросиліцію використовують закриті печі.

Феросиліцій застосовують для розкислювання і легування сталі і як відновник при виробництві деяких феросплавів. У електричних печах виплавляють феросиліцій різних марок із змістом кремнію від 19-23 % (сплав ФС20) до 92-95 % (сплав ФС92). При змісті кремнію в сплаві в межах 50-60 % і при забрудненні його фосфором і алюмінієм сплав розсипається в порошок з

виділенням отруйних летких сполук. Тому сплав такого складу заводи не випускають. Окрім кремнію феросиліцій містить залізо і ряд домішок. У сплавах, що містять 41-47 % кремнію і більше, є до 0,1-0,2 % З, до 0,2- 0,6% Mn, до 0,05% P, до 0,02% S і до 1,5-2,5% Al. У малокрем'янистих сплавах (19-27 % Si) вміст вуглецю досягає 0,6-1,0 % [6]. Слід зазначити, що феросиліцій містить мало вуглецю, незважаючи на застосування вуглецевого відновника і вугільного футерування печі. Пояснюється це тим, що у присутності кремнію розчинність вуглецю в сплаві зменшується. Чим більше в сплаві кремнію, тим менше сплав містить вуглецю.

Найбільш поширені сплави ФС45 і ФС75, що містять кремнію відповідно близько 45 і 75 %.

1.2.1 Шихтові матеріали

Шихта для отримання феросиліцію складається з кварциту, коксика і сталевої стружки. Останніми роками замість коксика з успіхом застосовують напівкокс. При виплавці феросиліцію з 90-92 % кремнію як відновника використовують деревне вугілля. Для отримання заданого гранулометричного складу шихтові матеріали при підготовці до плавки дроблять і сортують: кварцит в межах 25-60 мм (для ФС 20- 45) або 50-100 мм (для ФС 65-90), коксик - 5-20 мм, стружку до 50 мм [7].

Для плавки феросиліцію використовують в основному кварцити крупністю 25-100 мм. При плавці сплавів з 20, 25 і 45 % Si на більшості заводів дозволяється використовувати кварцит в змозі поставки без спеціального розсівання. Для виробництва сплавів з вищим вмістом кремнію кварцит обов'язково розсіюється, при цьому вимоги до великості кварциту на різних заводах дещо розрізняються.

Шихту складають виходячи з того, що SiO_2 кварциту відновлюється на 98 % і усе залізо стружки переходить в сплав. Шихтові матеріали змішують в приблизно наступній пропорції:

Марка сплаву	ФС25	ФС75
Кількість матеріалу, кг		
кварциту	150	300
коксика	70-75	140-145
залізної стружки	200-220	30/35

У шихту для плавки сплавів ФС45 і ФС65 зазвичай використовують кварцит, кам'яновугільний кокс (дрібні фракції) і нелеговану залізну стружку. Шихта розраховується з умови витягання в сплав 97 (ФС45) і 95 % Si (ФС65) і має приблизно наступний склад:

Сплав	ФС45	ФС65
Витрата, кг:		
кварцит	300	300
кокс	140	138
залізна стружка	168	70

Рудної складової шихти являються кварцити, які містять не менше 95 % SiO_2, не більше 0,02 % P_2O_5, і можливі менше шлакотворних домішок (глинозему). Кварцит подрібнюють до шматків розміром 25-80 мм і відмивають від глини.

Для отримання заданого вмісту кремнію в сплаві в шихту вводять розраховану кількість заліза у вигляді подрібненої стружки вуглецевої сталі; залізо, крім того, полегшує відновлення кремнію.

Як відновник при виплавці феросиліцію застосовують металургійний коксик шматками розміром 10-25 мм (відсівання доменного коксу). Іноді для заміни частини коксу застосовують дешевші матеріали: напівкокс - продукт коксування вугілля при 700 ^oC і матеріали, що містять карборунд SiC (відходи електродного і абразивного виробництв).

1.2.2 Завантаження шихтових матеріалів до печі

Завалку шихти необхідно проводити безперервно або невеликими порціями у міру осідання шихти на окремих ділянках. В першу чергу шихту завалюють в найбільш гарячі ділянки колошника навколо електродів.

Завантаження зайвої шихти недопустиме, оскільки збільшення стовпа матеріалів викликає зміщення плавильної зони вгору і порушення теплового режиму в зоні реакції. Недостатня кількість шихти в печі призводить до збільшення втрат тепла з газами, що йдуть, і втрат кремнію у відліт.

Дозування шихти в більшості цехів, обладнаних печами потужністю 16,5- 60 МВ·А, безперервне. У старих цехах, обладнаних печами потужністю 12,5-27,0 МВ·А, дозування шихти порційне [4].

Ручна завалка шихти, що застосовувалася до останнього часу, забезпечуючи хорошу якість завалки, була трудомістка для обслуговуючого персоналу. Нині на вітчизняних заводах завалка шихти у відкриті печі здійснюється за допомогою машин завалок системи Плюйко. Відомі і інші конструкції машин завалок і механізмів для обслуговування колошника відкритих печей [3]. На печах великої потужності з ванною, що обертається, мабуть, буде доцільна завалка шихти по трубах, проведених з пічних кишень. Цей метод завалки стає єдино можливим для закритих печей. Кількість завалюваної за зміну шихти визначається виходячи з витрати електроенергії піччю і витратами її на кожну тонну завантаженого з шихтою кварциту [16920 МДж (4700 кВт-ч) при виплавці ФС55, 17280 - 17640 МДж (4800-4900 кВт-ч) при виплавці ФС20 і ФС75 і 19080-19548 МДж (5300-5430 кВт-ч) при виплавці ФС90].

Дозування і подача шихти до печей при вуглетермічнім процесі виплавки феросиліцію мають бути безперервними. На сучасних заводах застосовується централізована потоково-транспортна система шихтоподачі. При цьому використовують конвеєрний, скіповий, а за кордоном і елеваторний способи подачі підготовленої шихти в плавильний корпус.

1.2.3 Хід плавки

Сумарна реакція відновлення кремнезему кварциту вуглецем коксика у присутності заліза, що поступає із стружки, запишеться так: $SiO_2 + 2C + Fe = [Si]Fe + 2CO$.

Реальний процес відновлення кремнію включає утворення як проміжних продуктів монооксиду і карбіду кремнію за схемою $SiO2 \rightarrow SiO \rightarrow SiC \rightarrow Si$. На хід реакції відновлення благотворно впливає залізо, яке, розчиняючи кремній, виводить його із зони реакції і сприяє руйнуванню карбіду кремнію.

Відмітними особливостями процесу отримання феросиліцію є виділення значної кількості колошникових газів (близько 2500 м3/год), що містять 80-90 % З, і практична відсутність шлаку (2-4 % від маси металу).

Феросиліцій виплавляють безперервним способом в рудовідновлювальних печах потужністю 22,5-63 МВА. Феросиліцій марок ФС20, ФС25, ФС45, ФС65 отримують в закритих печах, а марок ФС75, ФС90 і ФС92 - у відкритих. Перспективною є виплавка багатих по кремнію марок феросиліцію в закритих печах.

Оскільки феросиліцієва шихта схильна до спікання на колошнику, то, щоб уникнути цього, застосовують печі з круглою ванною, що обертається. Ванна здійснює один оборот за 50-100 годин (при виплавці низькокремнистого феросиліцію ця швидкість має вище значення), обертання здійснюється реверсивно в секторі 60-120°.

Плавку феросиліцію ведуть безперервним процесом, при цьому основним завданням є забезпечення нормальної роботи колошника і льотки. Нормальний хід технологічного процесу (схема його показана на рис. 1.2) характеризується наступними показниками [6]:

1. Рівномірним газовиділенням по усій поверхні колошника, відсутністю спеклися ділянок, що потемніли, і місцевих сильних виділень газу - "свищів".

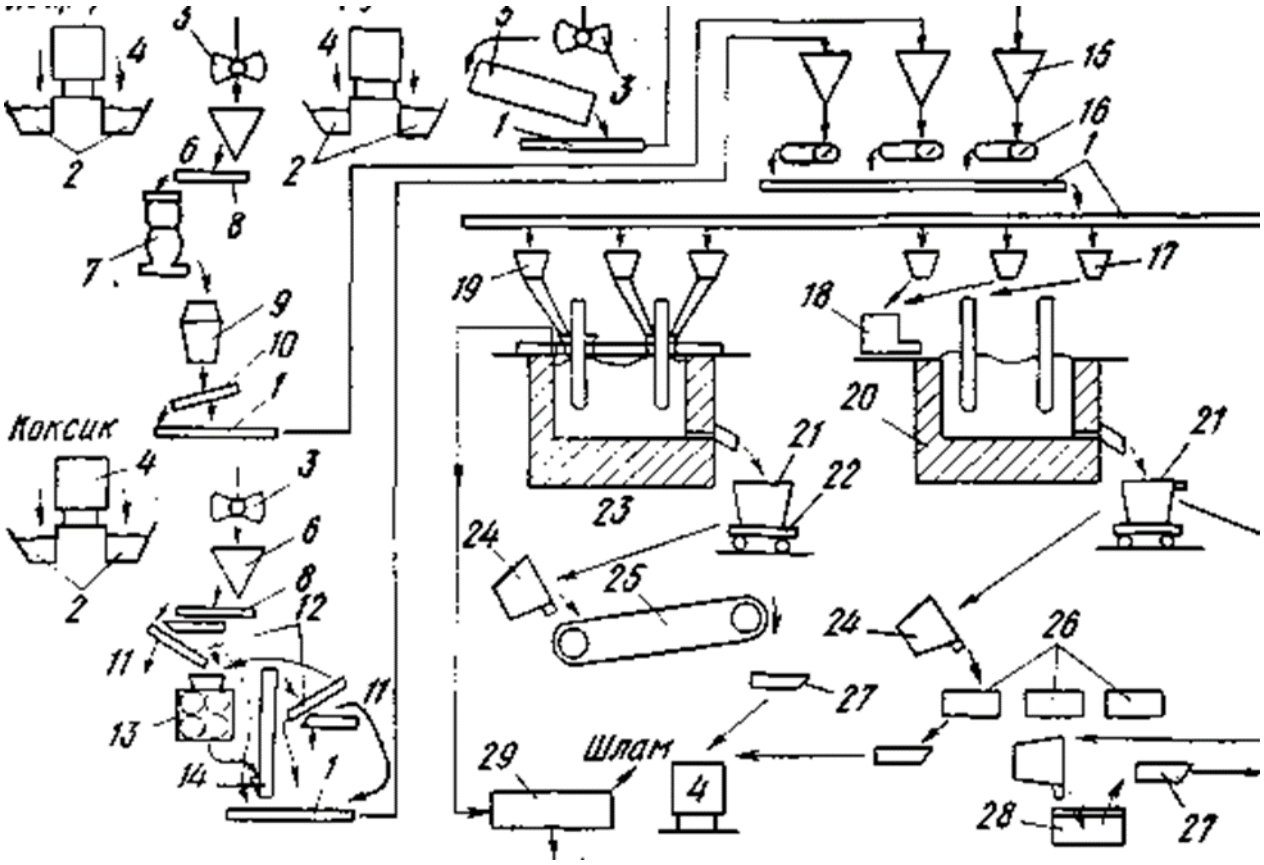
2. Рівномірним сходом шихти у електродів і в трикутнику між ними.

3. Стійкою глибокою посадкою електродів в шихті, що становить не менше 1400 мм при виплавці ФС20, ФС25 і ФС45 і не менше 1700 мм при виплавці ФС65, ФС75 і ФС90. Відстань від торця електроду до подини печі має бути 500-800 мм.

4. Регулярним виходом при кожному випуску сплаву, рідкого рухомого шлаку і вільним виходом газу.

5. Стійким навантаженням на електродах.

6. Рівномірною переробкою завантажуваної шихти при нормальній питомій витраті електроенергії.



1 - стрічковий транспортер; 2 - засіки; 3 - кран грейфера; 4 - залізничний вагон; 5 - барабан для розсівання стружки; 6 - бункер; 7 - конусна дробарка; 8 - пластинчатий живильник; 9-мийний барабан; 10 - зневоднюючий гуркіт; 11 - відсівання; 12 - гуркіт двохситний; 13 - дробарка коксу; 14 - елеватор; 15 - дозувальні бункери; 16 - дозатор; 17 - пічні бункери; 18 - завалочна машина; 19 - труботічка; 20 - відкрита рудновідновлювальна піч для виплавки ФС75 і ФС90; 21 - ківш для сплаву; 22 - візок; 23, 26 - закрита рудновідновлювальна піч для виплавки ФС20, ФС25, ФС45, ФС65 і ФС70; 25 - машина для розливання сплаву; 27 - короб; 28 - бак для грануляції сплаву; 29 - газоочистка

Рнс. 13. Технологічна схема виробництва феросиліцію

Глибина занурення електродів в шихту визначається напругою між електродом і подиною печі, робочим струмом на електроді, електричним опором шихтових матеріалів і особливостями внутрішньої будови ванни печі і регулюється зміною або електричного опору печі, або (що бажаніше) робочої напруги, або (рідше) діаметру розпаду електродів. Для зміни електричного

опору печі збільшують або зменшують електричну провідність шихтових матеріалів шляхом зміни складу шихтовою суміші або розмірів шматків шихти. При збільшенні в шихтовій суміші кількості вуглецевого відновника або його великості підвищується електрична провідність шихти, при зменшенні великості коксика, заміні частини рядового коксика коксиком або напівкоксом з підвищеним електричним опором, деревним вугіллям або додавання деревних відходів знижується її електрична провідність шихти.

Процес плавки в печі відбувається головним чином у електродів в тиглях. У верхній частині тигля холодна шихта утворює своєрідне зведення. Стінки і зведення тигля безперервно оплавляються і заміщаються новими порціями шихти, що поступає згори. Таким чином, тигель не можна розглядати як застигла посудину під електродом. Це швидше зона високих температур, що утворилася у кінця електроду. При гарячому ході печі нижні частини тиглів з’єднуються, утворюючи загальний тигель. Нижня частина тигля являє собою газову порожнину. Відстань між торцем електроду і поверхнею розплаву ("дном" тигля) складає 200-400 мм. Шихта, розташована у стін печі, прогрівається настільки слабо, що в цих місцях плавлення не відбувається і шихтові матеріали спікаються в щільний моноліт (гарнісаж). Швидке проплавлення шихти біля електроду сприяє підтримці рихлого стовпа матеріалів навколо нього. Оскільки реакції відновлення також відбуваються, головним чином, навколо електроду, гази, що утворюються внизу біля дуг, нагріті до високої температури і, проходячи через вищерозміщені шари шихти, нагрівають їх. Проходження гарячого газу через більше холодну шихту викликає конденсацію пари кремнію. Якщо гази проходять по більшій площі навколо електроду, їх швидкість мала і більша кількість пари конденсується на шихті. Звуження площі рихлих матеріалів навкруги електродів погіршує підігрівання шихти і збільшує втрати від випару. Для рівномірного розподілу по колошнику газів, що виходять з печі, запобігання спіканню колошника і утворення "свищів" при виплавці феросиліцію необхідно обертати ванну печі

і проводити періодичну прошивку шихти при виплавці високопроцентних сплавів

При веденні технологічного процесу можуть спостерігатися відхилення від нормального ходу печі [6]:

1. Недолік відновника веде до нестійкої посадці електродів і коливанням навантаження, за електродами тягнуться довгі кварцові волоски, тиглі звужуються, відбувається сильне спікання шихти, на колошнику спостерігаються часті "свищі", льотка сильно "газує", з льотки виходить густий шлак (чи, при тривалій роботі з недоліком відновника, вихід шлаку припиняється), робітники кінці електродів сильно стоншуються і швидко скорочуються. Температура в печі на глибині 500-600 мм від поверхні колошника при виплавці ФС45 підвищується до 1800- 2000 ^{0}С, що призводить до посиленого випару і втрат у відліт не лише монооксиду кремнію, але і відновленого кремнію. Роботу з недостачею відновника називають закварцуванням печі. У випадку тривалої роботи печі з недоліком відновника спостерігається розлад роботи льотки - льотка закривається насилу або взагалі не закривається, спостерігається просочування металу в будь-якому місці арочки і навіть прорив футерування печі сплавом. Це викликано розм'якшенням гарнісажу у передньої стінки через руйнування карбідів кислим шлаком. Для виправлення ходу печі слід додати відновник в шихту, давати коксик у вигляді добавок, посилити обслуговування колошника. Якщо ці заходи не дають позитивного результату, то слідує дещо проплавити тигель електроду над льоткою і при вимкненій печі дати в тигель 150-500 кг коксика.

2. Надлишок відновника, при якому посадка електрода стає високою, з-під самих електродів б'ють "свищі", тиглі звужуються, чутна робота дуг (характерний гул), шихта круто обвалюється у електродів, навантаження на електродах спокійне, з печі завершується вихід шлаку, вихід сплаву зменшується і його температура знижується. Тривала робота з надлишком відновника в шихті призводить до заморожування колошника печі і заростання печі шлаком при різкому зниженні продуктивності.

Для виправлення ходу печі необхідно зменшити кількість відновника в шихті, дати в піч декілька колош шихти з різко зниженою кількістю відновника ("важкі" колоші) або деяка кількість чистого кварциту і поліпшити обслуговування печі.

3. Робота на коротких електродах як по зовнішніх приз-накам, так і по результатах подібна до роботи з надлишком відновника. З-під електродів б'ють свищі, тигль звужується, чутна робота дуг, шихта круто обвалюється у електродів, на печі припиняється вихід шлаку, вихід металу зменшується.

4. Робота з надмірно довгими електродами при високій їх посадці викликає збільшення втрат електроенергії в самих електродах, а при глибокій посадці електродів часто призводить до того, що електроди "сідають" в шлак, втрачається дуговий режим роботи печі, пекти "не приймає шихту". Робота з надмірно довгими електродами, як правило, призводить до "закварцюванню" печі через спрямованість обслуговуючого персоналу "посадити" електроди. При скупченні в печі шлаку і його нерегулярного виходу в піч даються добавки вапна.

Виплавка кремнію і його сплавів в печах з ванною, що обертається, має ряд технологічних особливостей [5]. В цьому випадку змінюється будова робочого простору печі, об'єм газової порожнини під електродами зменшується в три-чотири рази в порівнянні з об'ємом при роботі з нерухомою ванною. Газова порожнина формується, в основному, з набігаючого боку електроду, а із збігаючого боку або зовсім відсутній, або розвинена дуже слабо. Асиметричність газової порожнини пояснюється переміщенням газового розряду до набігаючої сторони електроду внаслідок збільшення електродинамічної сили при підвищенні щільності струму в шихті з цього боку до 0,7-0,9 А/см^2, що в три рази вище, ніж на збігаючій стороні того ж електроду. Зниження частоти обертання ванни призводить до зменшення ущільнення шихти з набігаючого боку електроду. В цьому випадку газова порожнина отримує певний розвиток і на збігаючій стороні електроду. За даними [7], на печі потужністю 16,5 МВА для виплавки ФС75 при дуже

високій частоті обертання ванни радіальні розміри порожнин, оточенні електроди, вирівнюються і їх форми наближаються до форми порожнин в печі з нерухомою ванною, а при подальшому збільшенні частоти обертання порожнина формується в основному на збігаючій стороні електроду. Це може бути обумовлено сприятливішими умовами горіння дуг на збігаючій стороні електроду, де від нього відсовувалася шихта, що мала вищу температуру, а відповідно, і вищу електричну провідність.

При обертанні ванни печі шихта як би "спахується" нерухомими електродами, що забезпечує збільшення активної зони більш ніж в два рази, піч добре "приймає шихту", глибока посадка електродів забезпечує зменшення втрат кремнію у відліт і підвищення усіх техніко-економічних показників процесу.

Надлишок відновника в порівнянні з теоретично необхідним на печах з ваннами, що обертаються, має бути понижений приблизно на 30 % в порівнянні з прийнятим для тих, що знаходяться в аналогічних умовах печей із стаціонарною ванною, наприклад, при виробництві ФС75 з 8,0 до 5,5 %. глибша посадки електродів і прогрівання усієї площі поверхні печі забезпечують краще видалення шлаку і руйнування карбідів, що сприяє поліпшенню ходу процесу і збільшенню кампанії печі.

Найважливіше значення має правильний вибір режиму обертання ванни печі. Дуже висока частота обертання ванни призводить до погіршення роботи колошника, нестійкої посадки електродів, утруднень в роботі льотки, і, отже, зниженню техніко-економічних показників виробництва. При зменшенні частоти обертання ванни нижче оптимальною втрачається ефект обертання.

Першою особливістю плавки ФС75-ФС92 карботермічним процесом є те, що концентрація SiO в газах, що утворюються в горні печі, а для ФС90 і в газах, що покидають його, перевищує 50%. Другою особливістю виробництва цих сплавів є те, що кількість газів, що утворюються в Ш зоні горна печі, в 4-5 разів більше, ніж при плавці сплаву ФС45. І, нарешті, третьою особливістю плавки цих сплавів є те, що вуглецю, що вводиться в шихту відповідно до

стехіометрії SiO2 + 2C, на уловлювання SiO, що утворюється в III зоні, як правило, не вистачає.

Значна частина SiO конденсується і уловлюється шихтою в I зоні печі (зона колошника, де T<1800 К) або у вигляді пилу виноситься на колошник. Кількість цього технологічного пилу така велика, що плавка ФС75 і ФС90 в печі, закритій зведенням, практично неможлива.

Газоподібний SiO, зустрічаючись з вуглецем коксу, утворює карбід. Подібний процес теоретично можливий в усьому об'ємі печі, проте SiO при низьких температурах не стійкий. Він конденсується на шматках кварциту і коксу. Цей процес, на жаль, супроводжується диспропорціонуванням, в результаті якого виділяється так багато тепла, що шихта навіть на поверхні колошника інтенсивно розігрівається і спікається. Рідкий SiO, так само як і газоподібний, реагує з вуглецем коксу, утворюючи карбід. Тому в печах, що виплавляють висококремнисті сплави, практично завжди чітко обмежується тигель, по периферії він зазвичай має скелет з карбіду кремнію.

Показники виробництва сплавів з високим вмістом кремнію на різних заводах галузі приведені в табл. 1.1. Витягання кремнію підраховано по відношенню до кремнезему кварциту. Для тих заводів, де використовується відновник-напівкокс з високим вмістом золи дробом, в цьому стовпці наведені також відомості про витягання кремнію з урахуванням SiO_2 в золі напівкоксу.

З табл. 1.1 видно, що показники плавки висококремнистих сплавів дуже нестабільні. Витрата електроенергії при плавці ФС90, наприклад, коливається від 13 до 14 тис. кВт - ч. Ще сильніше коливається (в межах 2000 кВт-ч) витрата електроенергії при виробництві більше масового сплаву ФС75. Подібні коливання, як показали розрахунки, приведені в таблицю. 15 (вони, як і раніше, для наочності перераховані в кВт-ч/т), в основному пов'язані з більшими втратами тепла з газами, що відходять, випромінюванням з поверхні колошника, втратами тепла з металом, що втрачається, і втратами в короткій мережі, а при плавці ФС90 і внаслідок дисоціації кремнезему до оксиду, і винесення останнього з печі.

Таблиця 1.1 - Техніко-економічні показники виробництва висококремнистих сплавів у відкритих печах потужністю 21МВ – А

Марка сплаву	Завод	Витрата матеріалів, кг/т					Витрата електроенергії, кВт - ч/т	Витягання кремнію, %
		кварцит	Відновник	залізна стружка	Електродна маса	тріска деревинна		
ФС90	А	2505	1267	-	76,5	280	13239	79,4/75,7
ФС90	Б	2886	1351	-	139,4	-	14227	68,89
ФС75	А	1776	836	195	61,0	-	9069	93,3
ФС75	Б	1946	929	180	52	-	9333	85,14
ФС75	В	1845	917	197	-	58	9600	89,8/85,78
ФС75	Г	2051	995	284	63	-	1100	80,78/76,1
ФС75л	Б	2153	1020	198	55,2	-	9832	76,95
ФС70	В	1705	843	313	-	-	8183	90,7

З табл.1.2 видно, що при плавці ФС90 на дисоціацію SiO2 > SiO витрачається ~ 2200 кВт-ч, що майже дорівнює тій кількості хімічної енергії, яку вносить в процес відновник.

Таблиця 1.2 - Тепловий баланс плавки висококремнистого феросиліцію у відкритій печі потужністю 21МВ – А

Статті балансу	ФС90		ФС75	
	кВт-ч/т	%	кВт-ч/т	%
І. Прихід:				
Електроенергія	13239	78,61	9069	80,51
Тепло окислення С - СО	2629,2	15,61	1939,5	17,22
Екзотермічні реакції	974,0	5,78	255,9	2,27
Разом:	16842,2	100	11264,4	100,0
П. Витрата тепла :				
Дисоціація SiO_2 - Si	8108	48,14	6955	61,74
Дисоціація домішок (Al_2O_3, CaO, MgO; Fe_2O_3)	455	2,70	264,2	2,35
Теплота металу	610,5	3,62	580,7	5,15
Втрати металу	275,2	1,63	234,0	2,08
Дисоціація SiO_2 - SiO	2216,7	13,16	263,1	2,34
Фізичне тепло шлаку	35,0	0,21	30,0	0,27
Фізичне тепло пилу	122,8	0,73	10,5	0,09
Фізичне тепло газів, що відходять :				
СО	675,2	λ 4,01	450,5	4,00
H_2O + леткі	124,0	0,74	72,0	0,64
Дисоціація (H_2O)	353,0	2,10	229,6	2,04
Втрати через футерування	214,0	1,27	146,0	1,30
Випромінювання колошника	1812,0	10,76	672,0	5,97

Статті балансу	ФС90		ФС75	
	кВт-ч/т	%	кВт-ч/т	%
Разом:	15001,4		9907,6	
Втрати в короткій мережі (по різниці)	1840,8	10,93	1356,8	12,05
Разом:	16842,2	100,0	11264,4	100,0
Електричний ККД η_3		0,861		0,85

Слід зазначити, що розрахунки співпадали з виробничими спостереженнями. Зокрема, визначені по різниці між приходом і витратою втрати в короткій мережі дозволили визначити η_3 (0,86 і 0,85), значення якого дуже добре співпало з дослідними даними. Проте в балансі для плавки сплаву ФС90 для цього в приході довелося врахувати усе тепло, що виділяється при диспропорціонуванні SiO в I зоні печі (при плавці ФС75 > 50 % приходу від екзотермічних реакцій доводиться на утворення силіцидів і силікатів).

У зоні високих температур йде часткове відновлення алюмінію і кальцію з тих, що містяться в кварциті і золі коксу Al2O3 і CaO, тому феросиліцій містить до 2,5 % Al і до 1,5 % Ca. У відновних умовах плавки більше 60 % фосфору з шихтових матеріалів переходить в сплав. Сірка цілком випаровується.

З оксидів шихти, що не відновилися, формується шлак, його кількість дорівнює 2-6 % від маси сплаву. Типовий склад шлаку, %: 25-40 SiO2, 20-40 Al2O3, 10-25 CaO, 2-10 SiC, 3-8 BaO, менше 2 MgO і FeO. Шлаки мають високу температуру плавлення (1500-1700 °C) і в'язкість. Шлак виходить з печі через льотку разом із сплавом. При підвищеній в'язкості частина шлаку залишається в печі, що може вести до заростання ванни.

Газ, що утворюється у високотемпературних зонах відновлення, піднімається вгору, нагріваючи шихту, причому він прагне рухатися вгору над зонами відновлення у електродів. Щоб підвищити міру використання тепла газів, шихту завантажують у електродів, створюючи тут вищий шар розташованих конусом матеріалів. Високий шар шихти у електродів перешкоджає підйому тут газів і вони виділяються далі від електродів, нагріваючи більшу кількість шихти. При обертанні ванни нерухомі електроди

розпушують шихту, гази, що піднімаються, більше рівномірно розподіляються по перерізу ванни.

Нормальний хід печі характеризується повільним опусканням електродів у міру їх згорання і рівномірним осіданням шихти навколо цих електродів.

1.2.4 Випуск, розливання і оброблення сплаву

Випуск феросиліцію з печі виробляється періодично у міру його накопичення. Занадто часті випуски сплаву призводять до великих втрат тепла і пониження температури в районі випускного отвору, що утрудняє вы-ход сплаву і шлаку, а також до збільшення втрат сплаву при випуску і розливанні його. При занадто рідкісних випусках сповільнюється процес відновлення кремнезему, зменшується глибина посадки електродів в шихті і увели-чиваются втрати кремнію у відліт. Зазвичай при виплавці ФС20 і ФС25 виробляють шість - сім і при виплавці ФС45, ФС65, ФС75 і ФС90 - чотири - п'ять випусків в зміну через рівні проміжки часу. Розтин льотки робиться прострілюванням її із спеціальної рушниці, пропаленням електричною дугою або киснем, пробиванням залізною лозиною або за допомогою бура.

Тривалість операції випуску складає 15- 25 хв. Льотка має бути відкрита широко і періодично прошуровуватися залізною лозиною для того, щоб забезпечити повний вихід шлаку з печі. Після закінчення випуску очко льотки закривають можливо глибше конічною пробкою з суміші електродної маси і піску або з суміші вогнетривкої глини, коксика і дрібної електродної маси вручну або гарматою. Дрібно закрита льотка визиває розігрівання гарнісажу передньої стінки печі, що приводить до порушення нормальної роботи льотки і роз'їдання футерування печі в районі льотки. Феросиліцій випускають в ківш, футерований шамотною цеглиною або графітовою плиткою, і потім розливають в зливки, в чавунні виливниці або в чушки на розливній машині конвеєрного типу. Виливниці і мульди розливної машини окропляють вапняним молоком. Максимальна продуктивність такої машини

забезпечується при товщині, зливка 70-80 мм і складає для ФС45~80 т/добу. Температура сплаву перед розливанням повинна складати 1400°С. Втрати при розливанні на машині досягають 3 %. Для інтенсифікації процесу твердіння зливків був запропонований суспензійний метод, суть якого у введенні в розливаний сплав твердих часток сплаву того ж хімічного складу, що дозволяє збільшити продуктивність машини і утилізувати відходи, що утворюються при дробленні сплаву. Товщина зливка 75 %-но-го феросиліцію, розлитого в чавунні масивні виливниці, не повинна перевищувати 100 мм, оскільки при зливку завтовшки 180 мм відмінність змісту кремнію в окремих точках зливка може досягати 10 % (абс.). На дуже потужних печах рідкий сплав по жолобу спрямовується в збірні виливниці місткістю до 2000 т, де кожна пларка розливається в зливок завтовшки 70-100 мм, який устигає затвердіти до наступного випуску. Протягом тижня у виливниці наплавляється "листковий пиріг" сплаву, потім він остигає 5 діб (сплав розливають в іншу виливницю) і потім забирається за допомогою екскаватора. Таке розливання покращує якість сплаву і знижує витрати на її здійснення.

Склад промислових плавок феросиліцію приведений в таблиці 1.3 [8].

Таблиця 1.3 - Хімічний склад феросиліцію і кремнію промислових плавок

Марка сплаву	Масова доля, %									
	Si	Fe	AI	Ca	Mg	P	S	Mn	Cr	C
ФС20	21,11	76,52	0,55	0,12	0,19	0,05	0,02	0,6	0,44	0,76
ФС25	24,80	72,77	0,67	0,15	0,22	0,04	0,01	0,52	0,38	0,44
ФС45	45,6	52,35	0,67	0,41	0,40	0,025	Сл.	0,38	0,14	0,03
ФС65	65,48	32,18	1,02	0,38	0,56	0,03	0,01	0,240	0,04	0,05
ФС75	76,5	20,57	0,72	1,40	0,48	0,03	*Сл.*	0,19	0,06	0,05
ФС90	90,20	4,08	2,88	1,75	0,93	0,02	*Сл.*	0,03	0,09	0,02
Кр00	99,06	0,30	0,25	0,95	0,05	0,01	0,01	0,03	0,01	0,03

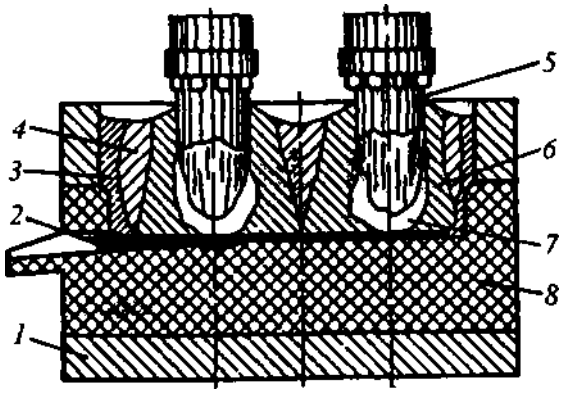
1.3 Конструкція відкритої руднотермічної печі для виплавки феросиліцію

Феросиліцій виплавляють в круглих печах різної конструкції -

обертаючих і стаціонарних, відкритих і закритих потужністю 16,5-115 МВА при робочій напрузі 130- 250 ст. Робочий шар футерування виконують з вуглецевих блоків. Піч має дві льотки, одну робочу і іншу резервну.

Плавку ведуть безперервним процесом. На колошник печі згори безперервно завантажують шихту, а сплав періодично випускають через льотку. Глибина занурення електродів в шихту має бути великою (від 800 мм на малих печах до 2700 мм на великих). Відстань від кінців електродів до подини повинна складати 300-600 мм. При завантаженні змішаних шихтових матеріалів в печі прагнуть створити і підтримувати навколо електродів шихту у вигляді конусів, що височіють, які утрудняють вихід газів тут і зменшують внаслідок цього втрати тепла і кремнію.

Процес плавки відбувається головним чином у електродів, під якими горять електричні дуги. Тут в зоні дуг в шихті утворюється (рис. 1.4) порожнина ("тигель") з дуже високою температурою.



1 - шамот, 2 - рідкий сплав, 3 - гарнісаж, 4 - область повільного сходу шихти, 5 - електрод, 6 - область швидкого сходу ших-ты, 7 - "тигель", 8 - вугільне футерування

Рис 1.4 - Розріз печі для виплавки феросиліцію

Стінки тигля безперервно оплавляються, кремнезем відновлюється, кремній розчиняється в рідкому залізі, рідкий сплав опускається на подину, а нові порції шихти - в зону реакцій. Кремній відновлюється твердим вуглецем по реакції $SiO_2 + 2C = Si + 2CO$ - 635096 Дж, що йде з великою витратою тепла,

теоретична температура її початку дорівнює 1554 °С. У присутності заліза відновлення кремнію полегшується і йде при нижчих температурах, оскільки залізо, розчиняючи кремній, виводить його із зони реакції, що зрушує рівновагу цієї реакції управо, у бік відновлення кремнію. Чим більше заліза в шихті, тим при нижчій температурі відбувається відновлення кремнію і утворення феросиліцію.

Руднотермічна електропіч РКО- 16,5 (далі - електропіч) призначена для виплавки висококремнистого феросиліцію.

За своєю конструкцією електропіч (рис. 1.5) є трифазним агрегатом, оснащеним трьома самоспікальними електродами, які розміщені у вершинах рівностороннього трикутника. Плавильна ванна має стаціонарне виконання та круглу форму.

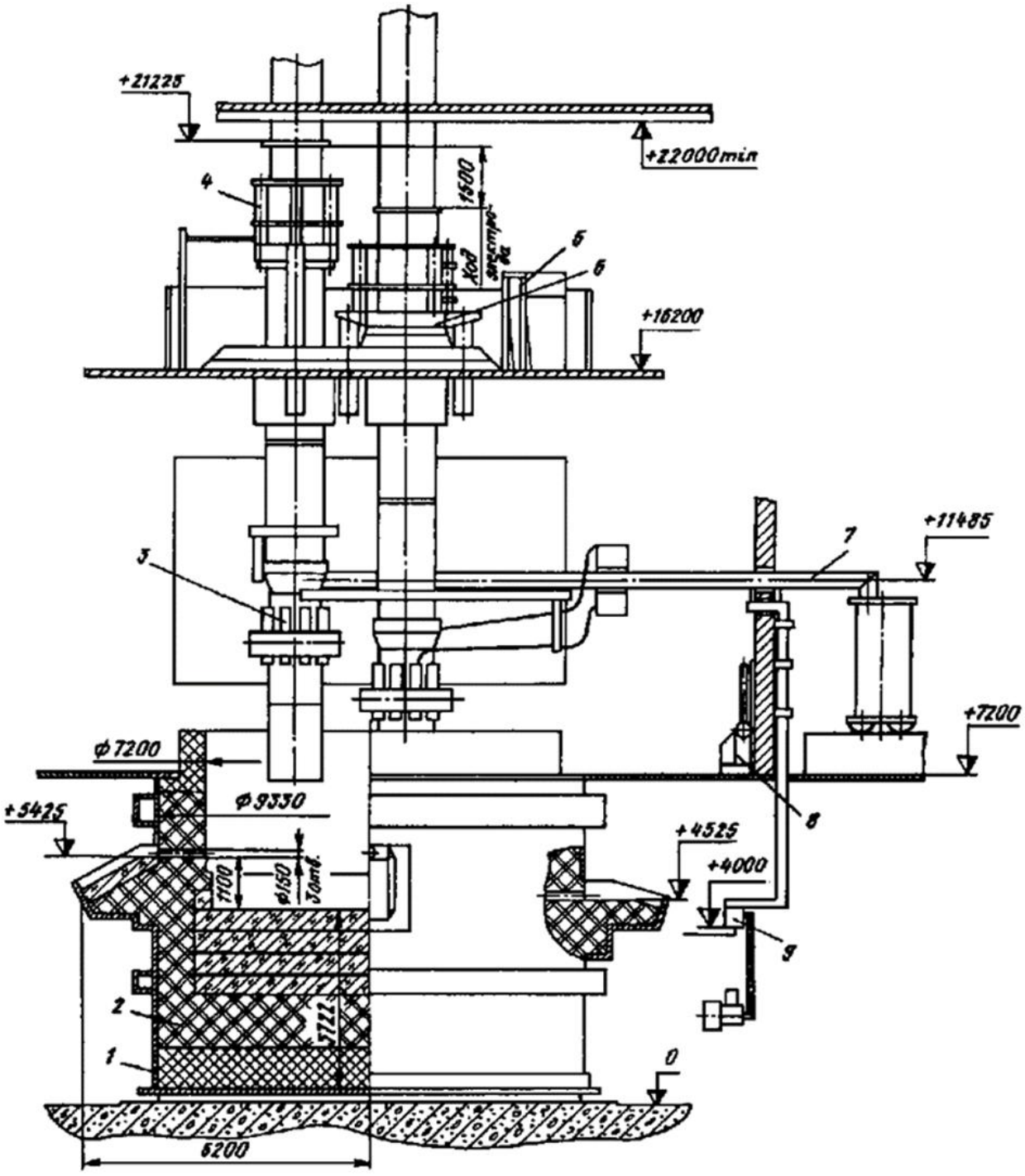
До складу електропечі входять такі основні елементи: кожух, футерована плавильна ванна, струмопідвідна система, механізм перепускання електродів, гідравлічний привід, пристрій підйому електродів, короткий електрична ятір, система водяного охолодження та установка для пропалювання льотки.

Кожух 1 являє собою циліндричну зварну металоконструкцію, виготовлену з листової сталі. У його нижній частині розташовано напірний колектор, призначений для подачі повітря та охолодження бокової футерівки плавильної ванни. У верхній зоні, під фланцевим з' єднанням кожуха, встановлено витяжний колектор, через який відводиться нагріте охолоджувальне повітря.

Необхідна жорсткість і механічна міцність конструкції забезпечуються системою сталевих обручів, рівномірно розміщених по всій висоті кожуха. На його поверхні передбачено три льоткові відчини: два з них використовуються для випуску шлаку, а один - для випуску готового феросплаву.

Днище кожуха має плоску форму та виконане у вигляді зварної конструкції. Для підвищення ефективності охолодження та збільшення надійності експлуатації кожух встановлюють на двотаврові балки. Утворені

між балками канали використовуються для подачі повітря примусового охолодження, що сприяє зниженню температурного навантаження на днищі агрегату.



1 - кожух; 2 - футерування; 3 - струмопідвод; 4 - пристрій для перепускання електроду; 5 - система гідроприводу;6 - гідропідйомник;
7 - ятір короткий; 8 - система водоохолодження;
9 - установка апарату для пропалення льотки
Рис 1.5 - Загальний вигляд електропечі РКО- 16,5

1.4 Кількісні та якісні характеристики газових викидів

Феросплавні електропечі - великі джерела пилогазових виділень. Кількість і склад цих виділень залежать від технології виплавки феросплавів, їх складу і конструкції феросплавних печей. Найбільша кількість пилогазовиых виділень доводиться на вуглетермічні процеси. Колошникові гази, що утворюються, містять 70-90 % оксиду вуглецю і велику кількість дрібнодисперсного пилу.

У відкритих печах гази згорають безпосередньо над колошником, а потім розбавляються повітрям. Продукти згорання уловлюються зонтами, підвішеними до балок перекриття над піччю, і евакуюються через патрубок, що газовідводить, сполучає верхню частину зонта з газоочисткою.

У відкритій печі відбувається майже стократне розбавлення технологічних газів повітрям. Загальна кількість газів, що викидаються піччю потужністю 16,5-21,5 МВА, складає 180-250 тис. $м^3$/год. Для печей потужністю 27 - 33 МВА ця величина досягає 250-300 тис. $м^3$/год. Температура газів, що відходять від зонта, залежить від міри розбавлення повітрям і досягає 200°С [11].

Газ, що виділяється з відкритих феросплавних електропечей, змішується з повітрям. При цьому горюча частина газу згорає. Газоповітряна суміш відводиться від печі через укриття-зонт, в живому перерізі якого за допомогою димососу створюють розрідження. Газ поступає на газоочистку, а потім викидається в атмосферу. Частина газу проникає в цех, звідки віддаляється через ліхтар. Зважаючи на велике розбавлення повітрям газ, що поступає на очищення, має запиленість 1-3 г/$м^3$. Температура газоповітряної суміші складає 200-300 °С. Пил має великий електричний опір (> 10^9 Ом-м) [10].

Кількість газу, що утворюється в печі на 1 МВ-А потужності, складає 130-260 $м^3$/год залежно від виду сплаву і потужності печі (табл.1.4). Вихід газу приблизно рівномірний.

Кількість газу, що утворюється, в печі складає 350- 900 $м^3$/т сплаву. Газ містить, %: 70-90 CO; 2-10 H_2; 2-20 CO_2; 0,5-5 CH_4; 2-4 N_2; 0,2-2 O_2, а також невелику кількість SO_2 (0,2-0,5 мг/$м^3$), який виділяється з коксика, що входить до складу шихти [16].

Таблиця 1.4 - Кількість газу, що утворюється

Показник	Виробництво феросиліцію		
Потужність печі, МВ-А	16,5	33	63
Витрата газу, 1000 м3/год	2,4-2,6	48	8,7

Нижче приведені дані, що характеризують питомий вихід газів при виробництві феросиліцію, $м^3/т$ [11]:

18-25 %-ий 350-540

45 %-ий 800

70 %-ий 750-900

С технологічними газами виноситься і пил (3-30 кг/т сплаву), SiO2, що містить, CaO, MgO, Al_2O_3, MnO, SiC і оксиди заліза. Хімічний склад пилу змінюється в широких межах залежно від виду сплаву.

З колошниковими газами виділяються також SO_2, основним джерелом утворення якого є коксик (50- 570 $мг/м^3$), і H_2S (до 7 $г/м^3$ при виробництві высококремнистих сплавів). У невеликих кількостях містяться і інші надзвичайно токсичні домішки: PH_3, AsH_3, HCN.

Теплота згорання феросплавного газу залежно від вмісту в ньому горючих компонентів складає 8500- 10500 $кДж/м^3$, а температура від 400 до 1100 °С. Максимальну запиленість і більший dміст СО мають гази, що утворюються при виплавці крем'янистих сплавів, найменші значення цих величин спостерігаються при виплавці вуглецевого ферохрому. Щільність пилу від 2300 до 4300 $кг/м^3$ залежно від виду сплаву [16].

Запиленість газу, що поступає на газоочищення, зазвичай в межах 15-30 $г/м^3$. Фракційний склад пилу залежить від виду сплаву, що виплавляється, і режиму роботи печі, проте в усіх випадках він характеризується значним змістом дрібнодисперсних фракцій, що утворюються в результаті возгонки металів і окислення пари. Зразковий розподіл пилу по розмірах приведений в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 - Дисперсний склад пилу, % по масі

Вид сплаву, що виплавляється	Зміст часток розміром, мкм		
	<1	1-5	>5
Феросиліцій	10	55	35
Вуглецевий передільний ферохром	34	56	10
Вуглецевий феромарганець	24	20	56
Силікомарганець	24	20	56

Обробка даних показує, що для феросиліцію dm= = 3,5 мкм при σ4=2,5.

У сталому технологічному режимі плавки гази виділяються стабільно; величина викидів, що утворюються при різних режимах виплавки основних марок феросплавів, характеризується даними, приведеними в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 - Технологічні викиди рудно-термічних печей для виплавки феросплавів

Сплав	Режим плавки	Кількість газу, $м^3$/т сплаву	Питомі викиди пилу, кг/т сплаву	
			з газами на газоочистку	через витяжну шахту в атмосферу
Феросиліцій				
30% -й	Відкритий			340-480
75% -й	Те ж	—	—	170
45% -й	»	—	—	40-55
>45% -й	Закритий	800	15-30	3,4-6,0

Аналізуючи приведені в таблиці 10 практичних даних про викиди рудно-термічних печей по виплавці феросиліцію, можна зробити висновок, що на газо-очистку поступає 620-800 $м^3$/т газу, що складається в основному з горючих компонентів (71-88 % CO, 2-11% H_2 і 0,3-5% CH_4). При цьому з технологічними газами з печей виноситься значна кількість пилу (5-60 г/$м^3$ або 3-30 кг/т сплаву), хімічний і дисперсний склад якого змінюється в широких межах залежно від виду сплаву і режиму роботи печі (відкритий або закритий). Проте в усіх випадках дисперсний склад пилу феросплавних печей характеризується значною масовою долею дрібних фракцій (менше 10 мкм - 40..90%), що утворюються в результаті сублімації металів і окислення пари.

Щільність і електропровідність пилу також визначаються тими ж

основними чинниками, що і склад пилу. Наприклад, при виплавці 75% -го феросиліцію в закритій печі щільність пилу змінюється від 2,1 до 2,3 г/см^3, а її ПЕО при 100% складає близько 100 МОм-см [12].

При роботі відкритих печей в результаті змішення з повітрям і догорання пальних кількість газу, що виділяється, збільшується в 20-50 разів. У газі міститься велика кількість CO_2 і водяної пари, що утворюється в результаті згорання горючих компонентів. Запиленість газу, що відводиться з колошника відкритої печі, зазвичай знаходиться в межах 0,2-2,4 г/м^3.

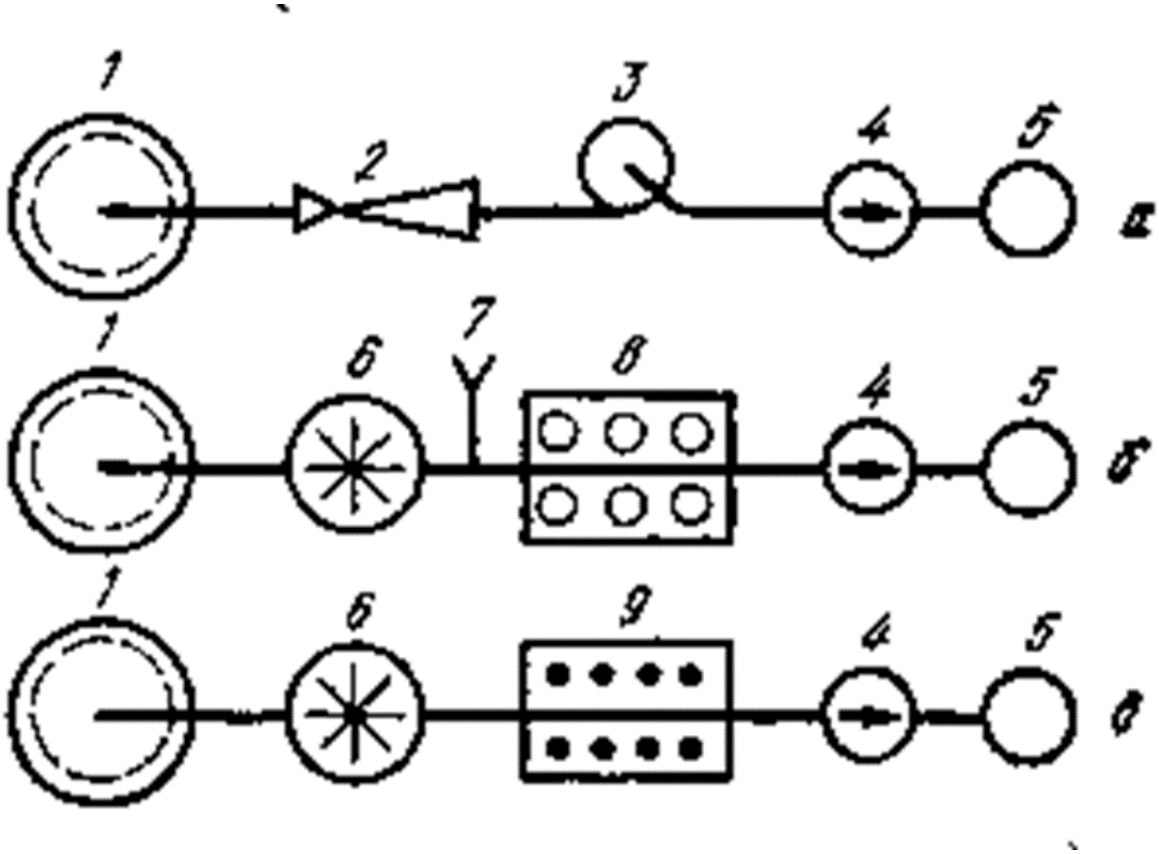
1.5 Очищення технологічних газів відкритих феросплавних печей

Для видалення пилу з газів, що відводяться з відкритих феросплавних печей, слід застосовувати високоефективні очисні пристрої. Для створення нормальних умов роботи в пічному прольоті цеху від кожної відкритої печі залежно від її потужності відводиться від декількох десятків тисяч до декількох сотень тисяч кубометрів газу за 1 ч. Тому очисні споруди мають значні розміри. Для очищення цих газів застосовують електрофільтри, тканинні фільтри і скрубери.

Газ, що утворюється при виробництві крем'янистих сплавів, забарвлений залежно від вмісту в нім пилу: при запиленості 0,05 г/м^3 він майже безбарвний або блідо-голубий; при 0,1 г/м^3 помітний в атмосфері у печі і, коли запиленість складає 0,15 г/м^3, газ сіро-білий і видний на відстані до декількох сотень метрів від джерела забруднення.

При роботі відкритих печей в результаті змішення з повітрям і догорання горючих, що становлять об'єм газу, який виділяється, збільшується у багато разів і досягає 150-200 тис. м^3/год і більше. У газі міститься велика кількість CO_2 і водяної пари, що утворюється в результаті згорання пальних компонентів. З цієї ж причини гази мають температуру, яка не перевищує 200-300 °С, і знижену запиленість 1-3 г/м^3 [11].

Відведення газів від відкритих печей здійснюється з допомогою зонтів, що розташовані над піччю і мають діаметр, який перевищує діаметр печі. На печах невеликої потужності для очищення газів в більшості випадків використовують батарейні циклони, що мають ступінь очистки 60-80 %, що не забезпечує необхідної концентрації пилу в газах, що відходять. На печах середньої і великої потужності застосовують як мокре, так і сухе газоочищення в тканинних фільтрах і електрофільтрах (рис. 1.5) [17].



1 - піч; 2 - труба Вентурі; 3 - краплевловлювач; 4 - димосос;
5 - димова труба; 6 - порожнистий скрубер; 7 - підсос повітря;
8 - рукавний фільтр; 9 - електрофільтр
Рисунок 1.5 -. Схеми очищення газів відкритих феросплавних печей :
а - із скрубером Вентурі; б - з рукавним фільтром; у - з електрофільтром.

При організації системи очищення газів, що виділяються з відкритих феросплавних печей середньої потужності (16.5МВ-А), виходять з того, що кількість газу, що очищається, складає 200-220 тис. $м^3$/год, температура газу - 200..300°С, запиленість перед газоочищенням - 1..3 $г/м^3$. Тут можлива як мокре, так і сухе газоочищення в тканинних фільтрах і електрофільтрах.

При мокрому очищенні в більшості випадків застосовують високонапірні скрубери Вентурі, скомпоновані в групи. Так, на Єнакіївському заводі феросплавів за печами потужністю 16,5-21,0 МВ-А, які виплавляють 65% -й феросиліцій, введені в експлуатацію газоочисні установки мокрого типу. Кожна з, них складається з двох блоків, що включають трубу Вентурі з регульованим перерізом горловини і краплевловлювач. Зрошування газу здійснюється форсунками, температура газу при цьому знижується з 150-170 до 60-80°С. Для відведення газів за кожною піччю встановлений ексгаустер типа Н- 6500-11 продуктивністю 360 тис. м3/год, що створює розрідження 72,5 кПа [14].

При витраті води на один блок газоочищення, що становить 80-100 $м^3$/год, і початковій запиленості газу 0,6-0,8 г/$м^3$ вміст пилу в очищеному газі складає 0,05 г/$м^3$.

Як і зазвичай, основний недолік мокрого очищення - значна витрата води і утворення відкладень в газовідвідному тракті і на лопатках димососів.

Двоступінчаста система очищення, яка включає груповий циклон і електрофільтр, забезпечує кінцеву концентрацію пилу в газах печі на рівні 0,02- 0,03 г/$м^3$. При витраті газів близько 40 тис. $м^3$/год з температурою на вході 60-130 °С і початковою концентрацією пилу 4,0- 4,5 г/$м^3$ ефективність пиловловлювання в груповому циклоні складає 60-72%, а в електрофільтрі - близько 98% [13].

Гази відкритих феросплавних печей, що пройшли через систему очищення від пилу, виводять в атмосферу.

Показники роботи різних систем очистки наведені в табл. 1.7

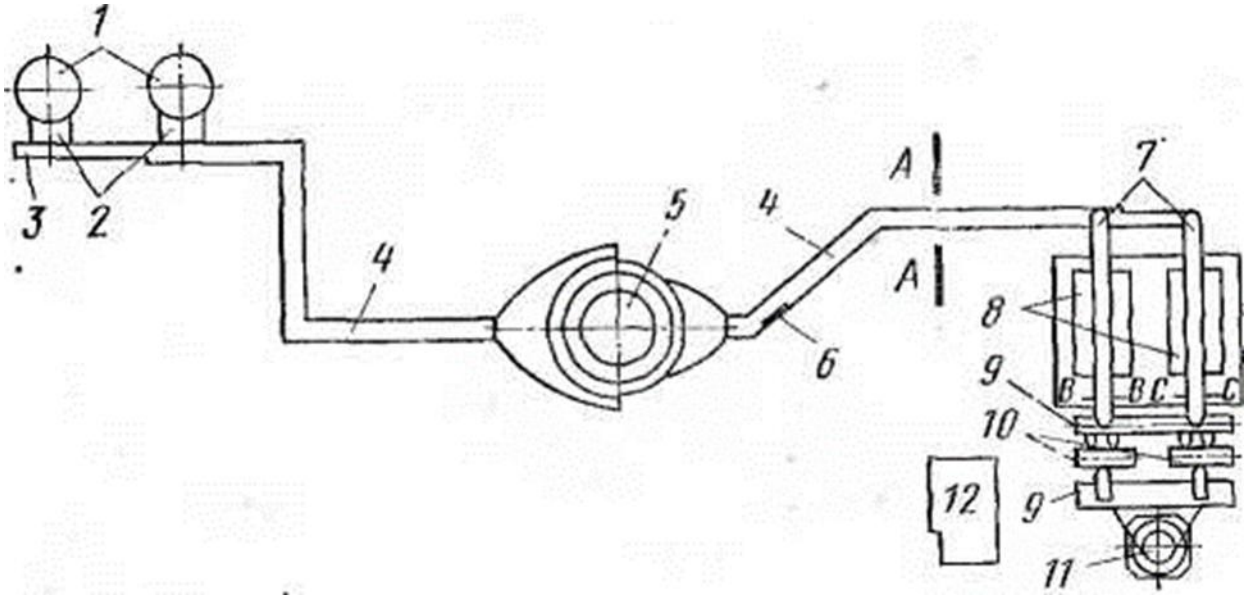
Таблиця 1.7 - Характеристика роботи мокрих газоочисних установок феросплавних печей

Показники	Феросплавні заводи		
	Єнакіївський	Запорізький	Нікопольський
Потужність печі, МВ-А	17,4-18,9	21,0	13,5
Що виплавляється сплав	18 - і 45% -й феросиліцій	25-45%-й і 65%-й феросиліцій	Вуглецевий ферохром

Кількість газів, що поступають на очищення, м3/год	1800-2500	2500	1350-1700
Схема газоочисної установки	Похилий газохід D426 мм, L 3280 мм; скрубер D 1400мм, H7890 мм; труба Вентурі з горловиною D90 мм; краплевловлювач	Похилий газохід D429 -мм, L4000 мм; скрубер D1200 мм, H4000 мм; труба Вентурі з горловиною D110 мм; краплевловлювач	Похилий газохід D426 мм L2500 мм, виконаний у вигляді низьконапірної труби Вентурі з горловиною D219 мм; замість скрубера - шламовідокремлювач D820 мм, H2450 мм; наклон-ная високонапірна труба Вентурі з регульованою горловиною; краплевловлювач
Температура тазів, °С			
перед газоочисною установкою	600-800	600-700	160-350
на виході	10-40	40-50	20-30
Концентрація пилу, г/м^3			
початкова	40-50	20-40	5-11
кінцева	0,003-0,019	0,003-0,035	0,003-0,010
Витрата води, м3/год	40 - 60	75-80	80-100
Гідравлічний опір, кПа			
труби Вентурі і краплевловлювача	17-25	18-23	19-20
вентиляційної установки	19-26	10-20	20-21
Спосіб зрошування	Форсунки	Форсунки	Форсунки

На одному з феросплавних підприємств Польщі для очищення газів двох печей потужністю 20 МВА, службовців для виробництва 75% -ного FeSi використовують дуже ефективну і сучасну очисну систему, повністю розроблену польськими спеціалістами (рис.1.6). Кожух цих печей складається з рухливих екранів, які закривають 8⁄10 поверхонь по периметру. Частина поверхні, що залишилася, залишається відкритою для забезпечення

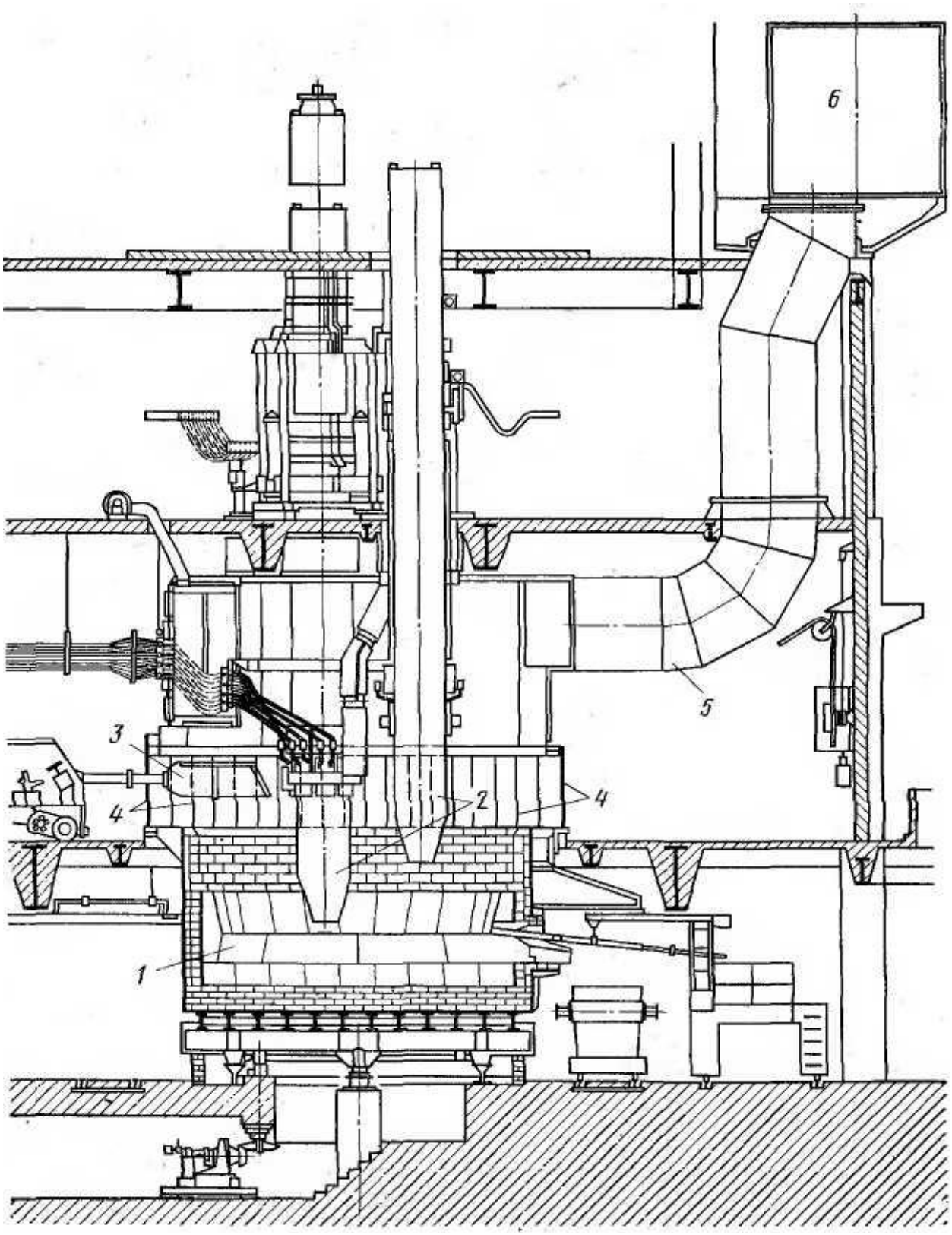
завантаження печі. Увесь кожух може обертатися навколо осі печі (рис. 1.7).



1 - печі; 2 - трубопроводи, що відводять газ з печей в колектор;
3 і 4 - газові канали перерізом 3,5х4 і 4х4, 5 м; 5 - скрубер;
6 - заборник холодного повітря; 7 - паралельні трубопроводи;
8 - тканинні фільтри; 9 - колектор; 10 - венти-ляторы; 11 - димар;
12 - контрольно-вимірювальна станція
(А- А, В - В, С - С - перерізу для здійснення вимірів)
Рисунок 1.6 - Система очищення газу, що утворюється при виробництві 75%-ного феросиліцію

Від кожної печі відводиться 160 тис. м^3/год. Середня температура газів за димовідвідним ковпаком складає 300^{o}С. По газопроводу 4 розміром 4х4,5 м запилений газ прямує в скрубер повного випару (стабілізатора температури) 5. Із скрубера газ, охолоджений до 140^{o}С, проходить по каналу перерізом 3,5х4 м до тканинних фільтрів 8, а з них в колектор 9, потім засмоктується вентиляторами 10 в трубопровід і виводиться в димар 11. У скрубер подається вода під тиском 2 МПа. Її максимальна витрата складає 45, середній 19 м^3/год. Перед стискуванням вода очищається в швидкісних фільтрах.

У газопроводі 4 за скрубером знаходиться автоматичний повітрозабірник 6. У разі аварії установки, що подає воду в скрубер 5, температура газу за ним зростає. В цьому випадку відкривається повітрозабірник і газ охолоджується до 130^{o}С. Повітрозабірник також потрібний в стартовому режимі роботи очисної установки.



1 - ванна; 2 - електроди Седеберга;
3 - пристрій для подачі шихти; 4 - корпус печі;
5 - трубопровід для відведення газу; 6 - колектор
Рисунок 1.7 - Схема печі фірми "Tagliaferri" для виробництва 75%-ого феросиліцію

У кожному фільтрі 8 є 2304 рукавів перерізом 2200х5380 мм. Таким чином, поверхня, що фільтрує, складає 15569 м^2. Кожен фільтр обладнаний вентилятором для продування продуктивністю 20 тис. м^3/год. На початку роботи фільтрів або при аварії забруднений газ прямує в димар по обвідних трубопроводах 7, минувши тканинні фільтри.

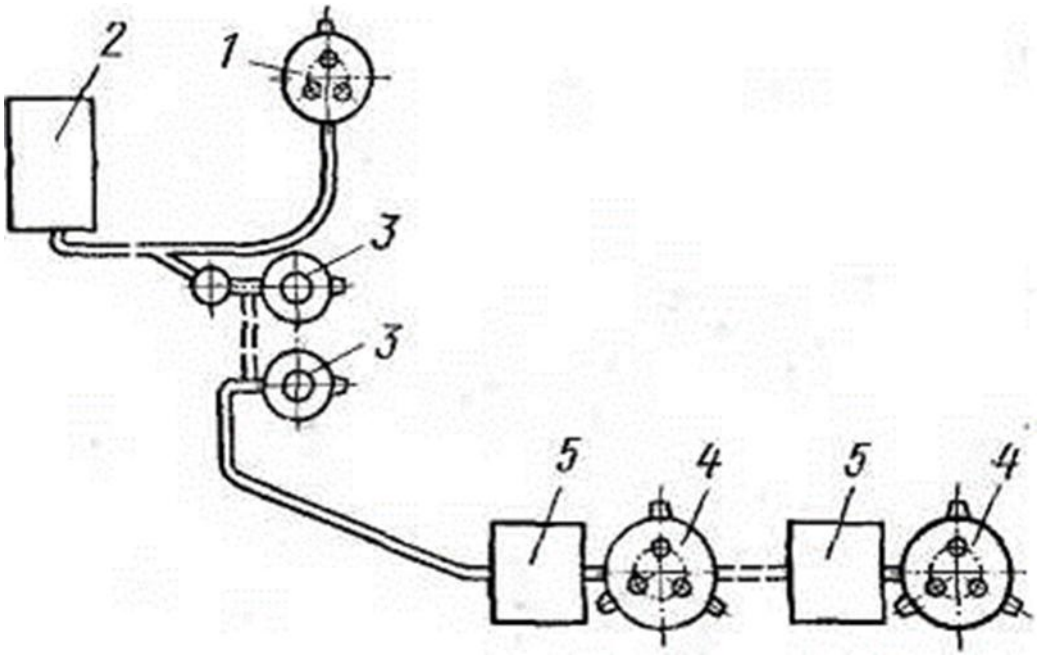
Тканинні фільтри обладнані трьома всмоктуючими вентиляторами продуктивністю 285 тис.м^3/год кожен. Сумарний тиск, що створюється вентиляторами, складає 6400 Н/м^2. Запиленість газу перед тканинними фільтрами в середньому складає 2,6, за ними <0,1 г/м^3[17].

На підприємстві С. Витторе в Швейцарії (фірма "Valmoesa") були встановлені дві печі потужністю 9 МВА для виробництва металевого кремнію, 75%-ого феросиліцію і силікокальцію, дві печі потужністю 25 МВА для виплавки сплаву заліза з кремнієм і алюмінієм і 45 - і 25% -ного феросиліцію, а також одна піч потужністю 4 МВА для виробництва сталі (рис 1.8) [20].

Запиленість газу, що відводиться із сталеплавильної печі, складає 2,5 г/м^3, а витрата газу 8 тис. м^3/год. Цей газ очищають в рукавному фільтрі. Через цей же фільтр пропускають газ, що відводиться з ще однієї печі потужністю 2,5 МВА. Газопроводи завдовжки 80 м є достатніми для охолодження газів до температури 120^{o}С перед фільтрами. Тканинний фільтр складається з 360 рукавів, виконаних із скловолокна, що допускає роботу при температурі 280°С. поверхня, що фільтрує, дорівнює 600 м^2. Рукавні фільтри періодично вимикаються з процесу фільтрації і протягом 30 с їх прочищають стислим повітрям.

Гази з печей 4 після охолодження водою, що упорскує, в похилій частині накопичувального трубопроводу проходять вгору через шар скляних кульок завтовшки 150 мм, що поливаються водою. Над кульками утворюється піна, в якій затримуються найбільш великі частинки пилу. У шарі скляних кульок газ охолоджується до 35°С і насичується водяною парою. Потім він прямує в мокрі електрофільтри. Споживання води для охолодження і очищення газу в

них досягає 68, а втрати води 6 м^3/год. Запиленість газу за електрофільтрами не перевищує 100 мг/м^3.



1 - пекчі потужністю 4000 кВА; 2 - тканинний фільтр;
3 - печі потужністю 2500 кВА; 4 - те ж, 9000 кВА;
5 - електрофільтр мокрого очищення
Рнсунок 1.8 - Приклад розміщення печей і очисних установок в цехах для виробництва феросплавів (Швейцарія)

У Влошех (Польща) три печі для виробництва феросиліцію обладнано сухими електрофільтрами. У Франції були проведені випробування по очищенню газів феросиліцієвих печей з допомогою рукавних тканинних фільтрів [18].

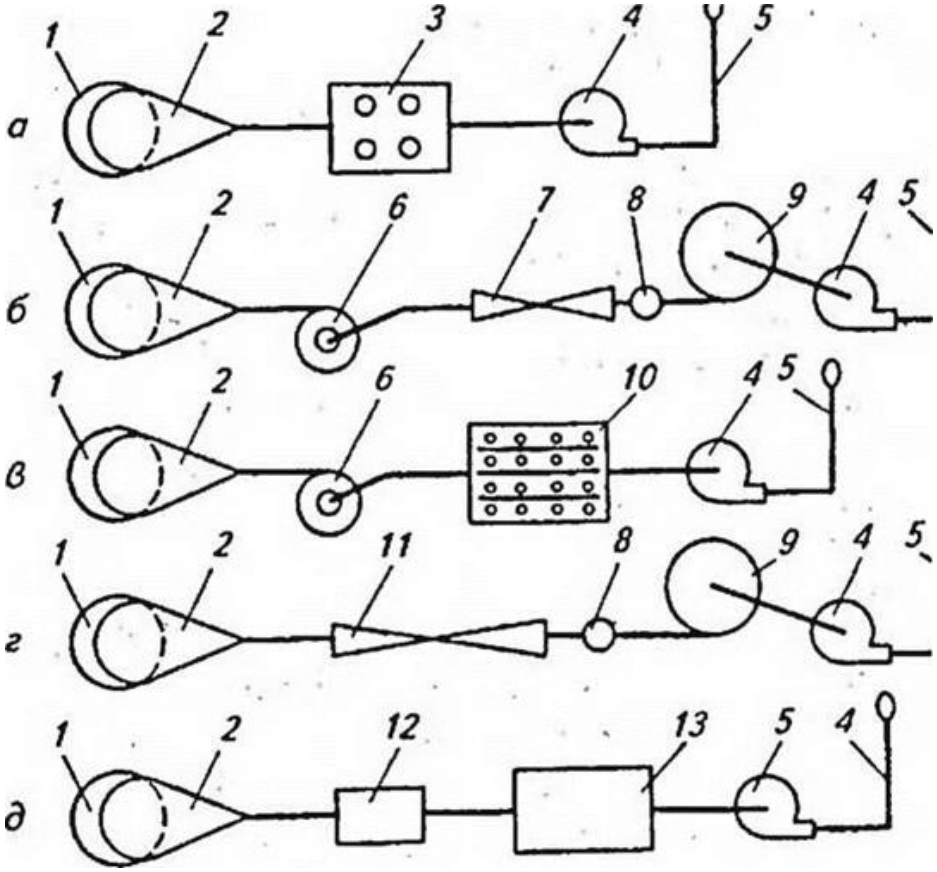
Тканинними рукавними фільтрами нині обладнані відкриті печі, що виплавляють високопроцентний феросиліцій, силікохром, силікокальцій, вуглецевий ферохром і різні марганцеві феросплави. Вони працюють ефективніше, ніж електрофільтри і забезпечують залишкову концентрацію пилу 10-15 мг/м^3. Найбільш перспективним способом газоочищення відкритих печей нині визнаний сухий спосіб в рукавних тканинних фільтрах.

Сучасні рукавні фільтри, встановлені на одному із заводів Швеції на відкритій печі потужністю 23 МВА, що виплавляє кристалічний кремній, мають

12 секцій по 168 рукавів із скловолокна завдовжки 10,2 і діаметром 0,3 м До вступу у фільтри гази охолоджуються в трубчастих холодильниках за допомогою розбавлення газу підсмоктуваним повітря і в охолоджувачах. Для виготовлення фільтрів використовують скловолокно, тканину, що фільтрує, - номекс; у Польщі, наприклад, застосовують поліефірні тканини під назвою "Елана". Уловлений пил повертається в початковий переділ після попереднього грудкування або використовується для інших потреб [16].

Основною перевагою сухого газоочищення є отримання зібраного пилу в сухому виді, що дозволяє використовувати її для грудкування без додаткової сушки, необхідної при мокрому газоочищенні. Проте сухий спосіб має ряд недоліків: низьку стійкість тканинних фільтрів, високі експлуатаційні і капітальні витрати. Якщо вартість мокрої системи газоочищення закритих печей складає близько 10% від витрат на усю пічну установку, то вартість системи сухого газоочищення відкритих печей - 30%. Проте, проблема очищення газів феросплавних печей сухим способом є дуже актуальною. У зв'язку з цим представляють інтерес дослідження шарових зернистих фільтрів, в яких запилені гази проходять через шар шихтових матеріалів, використовуваних при виробництві цього сплаву. Триває пошук тканинних фільтрів, що забезпечують високотемпературне очищення газів (металлоткани, графітові тканини та ін.).

На вітчизняних заводах газоочистки працюють за схемами, приведені на рис. 1.9. На більшості відкритих електропечей невеликої потужності працюють батарейні циклони з елементами діаметром 250 мм і ефективністю 50- 80 % (рис. 1.9, а). Більше удосканалену (по ефективності очищення газу) схему для таких же печей показані на рис. 1.9, б. Для печей великої потужності характерні схеми газоочисток, приведені на рис. 1.9, г, д [11]. Слід зазначити, що зважаючи на великий електричний опір пилу сухі електрофільтри працюють нестійко. За кордоном використовують і мокрі електрофільтри.



1 - електропіч; 2 - укриття-зонт; 3 - батарейний циклон; 4 - димосос; 5 - труба; 6 - груповий циклон; 7 - високонапірна труба Вентурі; 8 - інерційний шламовловлювач, 9 - відцентровий скрубер; 10 - електрофільтр; 11 - високонапірна труба Вентурі; 12 - трубчастий холодильник або випарний порожнистий скрубер; 13 - рукавний фільтр

Рисунок 1.9 - Схеми очищення газів від відкритих феросплавних електропечей

1.6 Обґрунтування та вибір схеми очищення газу

Слід зазначити, що в установках з тканинними фільтрами застосовують рукави з тканин, що витримують температуру до 250°С. Основними перевагами очищення фільтруванням є малі енерговитрати і відсутність водоспоживання.

Застосовують і електричне очищення, проте високий питомий опір пилу (>10^{11} Ом-см) ускладнює експлуатацію електрофільтрів.

Основні характеристики газоочисток, що працюють за феросплавними печами, приведені в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 - Показники роботи газоочисток різних типів за відкритими феросплавними печами

Показники	Пиловловлювачі Вентурі		Тканинні фільтри		Електрофільтри	
Вид сплаву	Феро-хром	Силіко-марганець	Фероси-ліцій	Силіко-марганець	Силіко-хром	Силіко-хром
Потужність печі, мВт	35	30	12	10,5	20	24
Об'ємна витрата газу, $м^3$/год	360 000	430 000	300 000	170 000	192 000	202 000
Температура газів, °С	250	250-290	180-230	205	78	84-95
Опір газоочистки, кПа	14,50	14,50	3,00-3,80	1,25-2,50		—
Витрата води, $м^3$/год	113	113	—	—	—	17,5
Витрата електро-енергії, мВт-ч	2,1	2,1	0,735	0,4		
Запиленість, г/$м^3$:						
початкова	2,55	3,0	2,53	—	—	1,05
кінцева	0,043	0,039	0,015	—	0,149	0,168

Систему газоочищення у кожному конкретному випадку слід вибирати з урахуванням місцевих умов.

В проєкті вибрана схема сухої очистки в рукавному фільтрі.

2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1 Визначення вихідних даних для проектування

У процесі проєктування газоочисної системи прийнято сухий спосіб очищення відхідних газів із застосуванням рукавних фільтрів, оснащених фільтрувальним матеріалом марки PFB/PTFE 523, який характеризується підвищеною термостійкістю. Експлуатаційна температура зазначеного матеріалу становить до 250 °C, при цьому допускається короткочасний вплив температур до 280 °C без погіршення його функціональних властивостей.

Використання такого типу фільтрувального обладнання дає можливість оптимізувати конструктивні параметри системи газовідведення, зокрема зменшити висоту встановлення витяжного зонта над пічним агрегатом. Це, своєю чергою, сприяє скороченню об'єму підсмоктуваного повітря та зменшенню кількості газового потоку, який надходить на очищення.

Температура газів, що відводяться від технологічного обладнання, становить 200 °C. За вказаних умов витрата газового потоку визначається таким чином:

$$Q_Г = \frac{Q_Г^{/} \cdot T_Г}{T_Г^{/}}, \tag{2.1}$$

де $Q_Г^{/}$ - витрата газу при високій посадці зонта, 400 тис.м^3;

$T_Г^{/}$ - температура газу при високій посадці зонта, 65^{o}C;

$T_Г$ - температура газу при низькій посадці зонта, 200^{o}C

$$Q_Г = \frac{420000 \cdot 65}{200} = 136500 \text{ м}^3/\text{год}, \tag{2.2}$$

Вміст пилу у газі, г/м^3:

$$C_П = \frac{Q'_Г \cdot C'_П}{Q_Г} = \frac{420000 \cdot 0{,}8}{136500} = 2{,}5, \quad (2.3)$$

Дисперсний склад пилу [11]:

Діаметр, мкм	0-1	1-3	3-5	5-7	7-10	10- 40	40-100	>100
Масова доля, %	35	15	12	8	8	5	5	2

Хімічний склад пилу, уловленого фільтрами [11]:

Компонент	Mn	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	P	C
Масова доля, %	27,0	1,5	35,0	3,4	7,5	6,5	3,0	0,03	5,0

Склад газу, що виходить з печі [16]: 80 % CO; 4% H_2; 10% CO_2; 2% CH_4; 4 %N_2; 2% O_2. Після розбавлення повітрям і допалювання горючих компонентів скла газу змінюється до наступного: 1% H_2O; 6% CO_2; 76% N_2; 17% O_2.

2.2 Проектування основного та допоміжного обладнання технології очистки газів

2.2.1 Розрахунок та вибір тканинного фільтру

Розрахунок проводиться по методиці, запропонованій в [21].

Щільність суміші газів при нормальних умовах, кг/м^3:

$$\rho_{ог} = 0{,}01 \, \Sigma \, \rho_i \, r_i, \quad (2.4)$$

де ρ_i – щільність компонента газової суміші, кг/м^3

r_i – об’ємний вміст кожного компонента газової суміші, %

З додатку 1 [21] $\rho_{оCO2}$ = 1,976 кг/м^3, $\rho_{оO2}$ = 1,43 кг/м^3, $\rho_{оH2O}$ = 0,804 кг/м^3, $\rho_{оN2}$ = 1,251 кг/м^3.

$\rho_{ог}$=0,01(6·1,976+17·1,43+1·0,804+76·1,251)=1,32 кг/м^3

Щільність газової суміші при робочих умовах, кг/м^3:

$$\rho_t = \rho_o \cdot (273 / 273 + t_г) \cdot (B + P_г / B_o) \quad (2.5)$$

де $t_г$ – температура газу, $t_г$ =200° С;

B – барометричний тиск, B = 101,3 кПа;

B_o - барометричний тиск при нормальних умовах, 101,3 кПа;

$P_г$ – розрідження перед фільтром, $P_г$ = -0,5 кПа;

ρ_o – щільність суміші газів, кг/м^3.

ρ_t = 1,32 · (273 / 273 + 200) · (101,3-0,5 / 101,3) = 0,57 кг/м^3

Газове навантаження розраховується по формулі, згідно [21]

$q_ф = q_н \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5$, м³/(м² · хв),

де $q_н$ – нормативне питоме навантаження, залежне від вигляду пилу і її схильності до агломерації, $q_н$ = 1,2 м^3/(м^3 · хв);

C_1 – коефіцієнт, що враховує спосіб регенерації, C_1 = 0,55;

C_2 - коефіцієнт, що враховує початкову запиленість газів, C_2 = 1,05;

C_3 - коефіцієнт, що враховує дисперсний склад пилу, C_3 = 1,0;

C_4 - коефіцієнт, що враховує вплив температури газу, C_4 = 0,7;

C_5 - коефіцієнт, що враховує вимоги до якості очищення газу

C_5 = 0,95.

$W_ф$ = 1,2 · 0,79 · 1,05 · 1,0 · 0,7 · 0,95 = 0,66 м^3/(м^3 · хв) = 0,011 м^3/(м^3 · с).

Площа необхідної активної поверхні, що фільтрує:

$$F_a = \frac{V}{W_\phi} = \frac{37,91}{0,011} = 3446 \text{ м}^2 \quad (2.6)$$

Приймаємо до установки рукавний фільтр ФРІР-3800 [19]:

Площа фільтрації – 3800 м^2;

кількість рукавів – 1792;

діаметр рукава – 135 мм;

довжина рукава – 5200 мм;

тканина – поліфторетиленова PFB/PTFE 523;

кінцева запиленість – не більше 20 мг/м^3.

Для очищення технологічних газових потоків та аспіраційних викидів від дрібнодисперсних твердих частинок передбачено використання рукавного фільтра з імпульсною системою регенерації фільтрувальних елементів. Даний тип пилогазоочисного обладнання забезпечує високий ступінь уловлювання пилу та характеризується надійністю експлуатації в умовах безперервних виробничих процесів.

Конструктивно рукавний фільтр являє собою металеву збірну споруду, до складу якої входять корпусні елементи, фільтрувальні вузли та допоміжне механічне обладнання. Основним робочим елементом фільтра є рукав, виготовлений із спеціального фільтрувального матеріалу та встановлений на металевому каркасі, який забезпечує збереження його геометричної форми під час експлуатації.

Корпус фільтра виконує функцію несучої конструкції та поділяється на дві технологічні зони: камеру забрудненого газу та камеру очищеного газу. Розмежування зазначених зон здійснюється за допомогою горизонтальної перегородки – рукавної дошки, в якій передбачені монтажні отвори для встановлення та герметичного закріплення фільтрувальних рукавів. Робочі рукави розташовуються в зоні забрудненого газу та кріпляться з боку камери очищеного газу.

Для забезпечення зручності технічного обслуговування та заміни фільтрувальних елементів верхня частина камери очищеного газу обладнана знімними кришками або люками доступу. Камера забрудненого газу виконана

у вигляді єдиного об’єму без внутрішніх перегородок, що сприяє рівномірному розподілу газового потоку по всій площі фільтрації.

Камера очищеного газу поділяється на окремі секції вертикальними перегородками відповідно до кількості відсічних клапанів. Таке конструктивне рішення дозволяє проводити регенерацію окремих секцій без припинення роботи фільтра в цілому. Відведення очищеного газу здійснюється через спільний вихідний колектор.

У нижній частині корпусу розташовані бункери для накопичення уловленого пилу, які можуть мати пірамідальну або щілинну конфігурацію. Бункери оснащуються приєднувальними фланцями для монтажу шлюзових живильників, гвинтових конвеєрів або інших пристроїв транспортування та видалення пилових відходів.

До складу основного технологічного та допоміжного обладнання рукавного фільтра входять фільтрувальні рукави, опорні металеві каркаси, система імпульсної регенерації, вузли підготовки та редукування стисненого повітря, відсічні клапани, газорозподільні пристрої, обладнання для вивантаження пилу, а також автоматизована система керування процесом регенерації та контролю режимів роботи фільтраційної установки.

Фактичне газове навантаження фільтру:

$$W_ф = \frac{V}{F_{a^1}} = \frac{37.93}{3800} = 0{,}01 \text{ , м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}.$$

Повний гідравлічний опір рукавного фільтру ΔР, Па, складається з опору корпусу апарату $\Delta P_к$ і опори фільтрувальної перегородки $\Delta P_ф$:

$$\Delta P = \Delta P_к + \Delta P_ф. \quad (2.7)$$

Гідравлічний опір корпусу фільтру, Па:

$$\Delta P_к = \xi \times \omega^2_{вх} \times \rho_г / 2 = 2 \times 10^2 \times 0{,}57 / 2 = 57 Па \quad (2.8)$$

де $\omega_{вх}$ швидкість газу при вході у фільтр; $\omega_{вх}$ =10 м/с;

ξ - коефіцієнт опору, приймаємо 2.

Гідравлічний опір фільтрувальної перегородки:

$$\Delta P_ф = \Delta P - \Delta P_к = 1500 - 57 = 1443 \text{ Па}.$$

Розраховуємо постійні фільтрування А і В:

$$A = 670 \cdot 10^{-6} \frac{(1-\varepsilon_п)^2 \varepsilon_T^3 \cdot h^{2/3}}{\varepsilon_п^3 \cdot d_m^{1,75}}, \quad (2.9)$$

де $\varepsilon_п$ - пористість шару пилу; $\varepsilon_п = 1 - 79 d_m^{0,47} = 1 - 79(3{,}2 \cdot 10^{-6})^{0,47} = 0{,}79$

$\varepsilon_{тк}$ - пористість тканини, долі од.; $\varepsilon_{тк} = 0{,}55$

d - медіаний розмір часток пилу, d_m=3,2мкм=$3{,}2 \cdot 10^{-6}$ м

$$A = 670 \cdot 10^{-6} \frac{(1-0{,}79)^2 \cdot 0{,}55^3 \cdot (27 \cdot 10^5)^{2/3}}{0{,}79^3 \cdot (3{,}2 \cdot 10^{-6})^{1,75}} = 14{,}57 \cdot 10^8$$

$$B = 817 \frac{(1-\varepsilon_п)}{d_m^2 \cdot \varepsilon_п^3 \cdot \rho_ч}, \quad (2.10)$$

де $\rho_ч$ - щільність часток пилу, г/м^3

$$B = 817 \frac{(1-0{,}79)}{(3{,}2 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (0{,}79)^3 \cdot 3110} = 10{,}7 \cdot 10^9$$

Тривалість періоду фільтрування між двома регенераціями :

$$t_ф = \frac{(\Delta P_ф / \mu \times \omega_ф) - A}{B \times \omega_ф \times Z_1} = \frac{(1443/26 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}01) - 14{,}57 \cdot 10^8}{10{,}7 \cdot 10^9 \cdot 0{,}01 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3}} = 1364 с = 0{,}34 год$$

Вміст пилу на виході з фільтру складає 20 мг/м^3.

2.2.2 Вибір обладнання по видаленню вловленого пилу

Видалення пилу, уловленого рукавним фільтром у процесі очищення газових потоків, здійснюється періодично залежно від ступеня заповнення пилозбірного бункера. При цьому регламентом експлуатації передбачено проведення операцій з вивантаження пилу не рідше одного разу на 48 годин, що забезпечує стабільну роботу газоочисної установки та запобігає надмірному накопиченню пилових відкладень.

Проєктним рішенням передбачено можливість функціонування системи видалення пилу як у ручному, так і в автоматизованому режимах керування. Ручний режим використовується під час проведення налагоджувальних робіт, технічного обслуговування або в разі виникнення нештатних виробничих ситуацій. В автоматичному режимі робота механізмів пиловидалення здійснюється відповідно до сигналів від датчиків контролю рівня заповнення бункера. Пуск обладнання відбувається після досягнення пилом верхньої контрольної позначки, що свідчить про необхідність його вивантаження. Зупинка механізмів передбачена після зниження рівня накопиченого пилу до нижньої встановленої межі. Такий алгоритм керування дозволяє забезпечити безперервність роботи фільтраційної установки, підвищити надійність експлуатації обладнання та мінімізувати втручання обслуговуючого персоналу в технологічний процес.

Таблиця 2.1 - Продуктивність механізмів вивантаження пилу

№	Найменування	Кількість	Продуктивність	
			м3/год	т/год
1	Пристрій вивантаження пилу УВП- 4000-250-200	2	7,7	15,4
2	Живильник шлюзовий ЩЭ-ЭО-РНУ- 01	2	1,56-14,8	3,12-29,6
3	Конвеєр скребковий L=3680 КПС- 200	2	5	10
4	Конвеєр скребковий L=31445 КПС- 320	1	20	40

Пил, уловлений у процесі очищення газових викидів рукавними фільтрами, за допомогою системи транспортування спрямовується до центрального бункера-накопичувача, який виконує функцію тимчасового зберігання продукту до моменту його подальшого вивантаження та транспортування.

Проєктом передбачено застосування схеми пиловидалення із попереднім зволоженням пилу перед його завантаженням у залізничний транспорт. Такий спосіб обробки дозволяє суттєво знизити вторинне пиловиділення під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій, покращити санітарно-гігієнічні умови на виробничому майданчику та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Для реалізації процесу зволоження під центральним бункером-накопичувачем встановлено барабанний зволожувач, у якому відбувається інтенсивне перемішування пилового матеріалу з дозованою кількістю води. У результаті забезпечується отримання продукту з необхідними фізико-механічними характеристиками, придатного для безпечного транспортування та подальшого складування.

Подача пилу до барабанного зволожувача здійснюється за допомогою гвинтового живильника, який виконує функцію дозувального пристрою та забезпечує рівномірне надходження матеріалу в робочу зону апарата. Використання гвинтового живильника дозволяє стабілізувати технологічний процес зволоження та підтримувати задану продуктивність обладнання. Основні технічні характеристики барабанного зволожувача наведені в таблиці 2.2.

Система керування процесом вивантаження та завантаження уловленого пилу в залізничний вагон передбачає можливість роботи у двох режимах — автоматичному та ручному. Автоматичний режим забезпечує виконання технологічних операцій відповідно до заданого алгоритму без постійного втручання оператора, що сприяє підвищенню

ефективності та надійності функціонування системи. Ручний режим використовується під час пусконалагоджувальних робіт, технічного обслуговування обладнання або в разі необхідності оперативного втручання персоналу в технологічний процес.

Таблиця 2.2 - Технічна характеристика і габаритні розміри барабанного зволожувача.

Найменування показників, параметрів і характеристик	Значення номінальні
Продуктивність, т/год	до 15
Загальні розміри зволожувача, мм - довжна; - ширина (по рамі) - висота (загальна)	 5362 1940 2238
Барабан в зборі Розміри барабана, мм - діаметр обичайки (зовнішній) - діаметр по поверхні кочення (обіддю) - діаметр по зубчастому вінцю	 1220 1390 1356
Електродвигун, тип - потужність, кВт; - частота обертання, про/мін - напруга змінного струму, В	 АМУ160 L 8У2 7,5 750 380
Редуктор, тип Передавальне число	 1Ц2У-160-10-21-У1 10
Частота обертання барабана, об/мін	13,2
Маса, т (не більш)	5

У автоматизованому режимі функціонування системи зволоженого вивантаження пилу запуск технологічного процесу здійснюється оператором із центрального пульта керування за умови надходження сигналу про досягнення верхньої контрольної позначки рівня пилу в накопичувальному бункері. Такий алгоритм забезпечує своєчасне видалення накопиченого матеріалу та запобігає переповненню ємності.

Регулювання витрат води та стисненого повітря, які подаються до барабанного зволожувача для забезпечення необхідного ступеня зволоження пилу, виконується оператором у ручному режимі за допомогою запірно-

регулювальної арматури. Встановлення оптимальних параметрів подачі робочих середовищ дозволяє підтримувати стабільні умови перебігу процесу кондиціювання пилового матеріалу та забезпечувати необхідні експлуатаційні характеристики готового продукту.

Транспортування залізничних вагонів, призначених для приймання та подальшого вивезення зволоженого пилу, здійснюється за допомогою електричної лебідки. Керування роботою лебідкового механізму реалізується дистанційно з операторського пульта, що сприяє підвищенню безпеки виконання вантажно-розвантажувальних операцій та покращенню умов праці обслуговуючого персоналу.

Завершення циклу автоматичного вивантаження пилу відбувається після надходження сигналу від датчика нижнього рівня, встановленого у витратному бункері. Досягнення мінімально допустимого рівня матеріалу є підставою для автоматичної зупинки обладнання вузла зволоження та вивантаження, що забезпечує раціональне використання енергетичних ресурсів і запобігає роботі механізмів у неробочих режимах.

У режимі ручного керування запуск кожного елемента технологічного комплексу здійснюється безпосередньо за місцем встановлення відповідного обладнання. При цьому послідовність увімкнення механізмів відповідає прийнятому технологічному алгоритму роботи вузла переробки та вивантаження пилу, що гарантує узгоджене функціонування всіх складових системи та дотримання вимог технологічного регламенту.

2.2.3 Аеродинамічний розрахунок газового тракту

Ділянка №1

Довжина $l_{1\text{-}2}$ = 150 м;

Температура газу $t_г$ = 200 °С;

Р = - 200 Па;

Щільність газу при робочих умовах 0,57 кг/м^3;

Витрата газу за робочих умов 37,93 м^3/с;

Приймаємо швидкість в газопроводі $w_г = 20$ м/с.

Тоді площа перерізу газоходу визначається за формулою:

$$S = Q/w_г \tag{2.11}$$

$$S_1 = 37.93/20 = 1,9 \text{ м}^2$$

Діаметр газоходу:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_1}{\pi}} \tag{2.12}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,9}{3,14}} = 1,55 \text{ м}$$

Приймаємо стандартний діаметр газоходу 1,6м

Отже, фактична швидкість газу:

$$w_г = 4 \cdot 37,93/(3,14 \cdot 1,6^2) = 18,9 \text{ м/с}$$

Опір по довжині газоходу визначаємо за формулою:

$$\Delta P_{l1} = \lambda \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{w_1^2}{2} \cdot \rho \tag{2.13}$$

$$\Delta P_{l1} = 0,025 \frac{150}{1,6} \cdot \frac{18,9^2}{2} \cdot 0,57 = 419 \text{Па}$$

де λ_1 - коефіцієнт гідравлічного опору по довжині газоходу 0,025;

Місцевий опір ділянки визначаємо за формулою:

$$\Delta P_{M1} = \sum \xi_i \frac{w_i^2}{2} \cdot \rho \tag{2.14}$$

де ξ_1 - сумарний коефіцієнт місцевого опору [16];

поворот на 90^o 2 штуки $\xi_{90} = 1,1;$

поворот на 150^o 2 штуки $\zeta_i = 0,54$

$$\Delta P_{M1} = (1,1 + 1,1 + 0,54 + 0,54 + 0,54)\frac{18.9^2}{2} \cdot 0.57 = 389 Па$$

Загальний опір ділянки №1:

$$\Delta P_1 = \Delta P_l + \Delta P_м = 419 + 389 = 808 \text{ Па}$$

Аналогічно проводимо розрахунок ділянок №№ 2,3.

Загальний опір газового тракту складає:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_{АП} = 808 + 123 + 89 + 1500 = 2520 \text{ Па}$$

2.2.4 Підбір тягодуттєвого обладнання

Димосос вибираємо на основі аеродинамічного розрахунку газовідвідного тракту. Продуктивність Димососу $Q_д$ приймаємо з запасом 10% [21] незалежно від температури газів, але з поправкою на барометричний тиск $p_{бар}$ = 100 кПа:

$$Q_д = 1,1 \times Q_p \times \frac{101,3}{p_{бар}} \quad (2.15)$$

Q_p = 37,93 м^3/с = 136500 м^3/год при робочих умовах.

$$Q_д = 1{,}1 \times 136500 \times \frac{101{,}3}{100} = 152100 \text{ м}^3/\text{год}$$

де 1,1 – коефіцієнт запасу; Q_o - кількість газу перед димососом.

Створюваний димососом тиск приймаємо з урахуванням запасу 20%:

$$Р_д = 1{,}2 \cdot 2520 = 3024 \text{ Па}$$

Тиск (розрідження), що створюється димососом , приведене до умов каталогу, по якому вибирається димосос $\Delta p_{кат}$, приймається рівним [20]:

$$\Delta p_{кат} = \beta_2 \times \Delta p_р \times K_р = 1{,}2 \cdot 3024 \cdot 1{,}28 = 4645 \text{ Па} \qquad (2.16)$$

де β_2 – коефіцієнт запасу тиску. Приймаємо коефіцієнт запасу тиску β_2=1,2 [21].

$\Delta p_р$ – сумарний опір газовідвідного тракту, отриманий в результаті аеродинамічного розрахунку. $\Delta p_р$ = 4500 Па.

$K_р$ – коефіцієнт перерахунку.

Приймаємо до установки димотяг серії Дх2 15,5х2 з електродвигуном ДАО4-450Х-8МУ1 315 кВт 750 об./хв, виготовлений з вуглецевої сталі.

Загальні відомості про димотяги Дх2 15,5х2 [19]

- Двостороннього всмоктування
- Корпус спіральний поворотний
- Вперед загнуті лопатки
- Кількість лопаток: 32
- Напрямок обертання - праве і ліве

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики димососа Дх2 15,5х2

Параметр	Величина
Модель:	Дх2 15,5х2
Робоча точка вентилятора: Продуктивність, м3/год:	160000
Робоча точка вентилятора: Тиск, Па:	4700
Тип електродвигуна:	ДАЗО

Параметр	Величина
Продуктивність, м3/год:	91470-260500
Потужність двигуна, кВт:	630
Частота обертання робочого колеса, об/хв:	950
Частота обертання двигуна, об/хв:	1000
Макс. температура переміщуваного повітря, °С:	200
Мін. температура переміщуваного повітря, °С:	-30
Маса, кг:	9820
Робочий тиск (макс.), Па:	5220-4780

Таблиця 2.4 - Технічні характеристики електродвигуна ДАЗО4-450Y-6МУ1:

Параметр	Величина
Синхронна частота обертання, об/хв:	1000
Номінальний режим роботи:	тривалий S1
Спосіб охолодження двигунів:	ICA01A61
Клас захисту пристрою, IP:	54
Фазність:	3-фазний
Напруга, В:	6000
Конструктивне виконання двигуна:	IM1001
Потужність, кВт:	630
Частота струму, Гц:	50
Маса, кг:	3350
Модель:	ДАЗО4-450Y-6МУ1
Тип електродвигуна:	асинхронний
Серія двигуна:	ДАЗО4
Габарит (висота осі обертання), мм:	450
Діаметр вала, мм:	110
Кліматичне виконання:	У1
ККД, %:	94,7
Коефіцієнт потужності, cosφ:	0,85
Струм статора, А:	75
Ставлення пускового струму до номінального, $I_{пуск}/I_н$:	6,5
Ставл. макс. оберт-го момента сили до ном., $M_{max}/M_н$:	2,4
Ставл. пуск. оберт-го момента сили до ном., $M_{пуск}/M_н$:	1,3
Маховий момент ротора, кг $м^2$:	156
Допустимий маховий момент механізму, т.^{м2}:	3600

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

3.1 Характеристика потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів

У процесі металургійного виробництва працівники можуть зазнавати впливу низки небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які здатні негативно впливати на стан здоров’я, працездатність і безпеку персоналу.

Одним із найбільш поширених шкідливих факторів є виробничий пил. Його утворення супроводжує більшість технологічних операцій, зокрема завантаження та транспортування шихтових матеріалів, пересипання сировини й інші виробничі процеси. Потрапляння пилових частинок до організму людини переважно через органи дихання може спричиняти розвиток професійних захворювань, насамперед патологій бронхолегеневої системи.

Крім негативного впливу на здоров’я працівників, запиленість робочої зони погіршує умови праці, знижує видимість і ускладнює орієнтування в виробничому середовищі. Накопичення пилу також прискорює зношування рухомих елементів обладнання, а в окремих випадках може створювати вибухонебезпечні концентрації та бути джерелом виникнення електростатичних зарядів.

Суттєвим шкідливим фактором у феросплавному виробництві є наявність газових викидів. Частина відпрацьованих газів може проникати до робочої зони цеху, створюючи небезпеку для персоналу. Компоненти газових сумішей та наявні в них домішки здатні чинити токсичну й асфікуючу дію на організм людини.

Особливу небезпеку становить зниження концентрації кисню в повітрі робочої зони. За вмісту кисню близько 16 % у працівників можуть спостерігатися задишка та прискорене серцебиття. Подальше зниження

концентрації до 12 % призводить до значного утруднення дихання, а при рівні близько 8 % можлива втрата свідомості.

Серед газоподібних шкідливих речовин, характерних для металургійного виробництва, найбільш поширеним є оксид вуглецю (CO). Це безбарвний газ зі слабко вираженим запахом, який характеризується високою токсичністю. Ступінь його негативного впливу на організм визначається концентрацією в повітрі та тривалістю перебування людини в забрудненому середовищі.

Важливим фактором виробничого середовища є надлишкові тепловиділення. Температурні умови, що відрізняються від оптимальних значень, можуть несприятливо впливати на фізіологічний стан працівників. Формування мікроклімату в металургійних цехах залежить від температури нагрітих поверхонь обладнання та метеорологічних параметрів повітря.

Передача теплової енергії від джерел нагрівання до людини відбувається шляхом теплопровідності, конвекції та теплового випромінювання. Залежно від переважаючого механізму теплообміну розрізняють конвекційний, радіаційний та змішаний типи мікроклімату. Для гарячих металургійних цехів характерним є переважання радіаційної складової теплообміну.

Для підтримання сталої температури тіла організм людини використовує механізми терморегуляції, які реалізуються через теплове випромінювання, конвекцію, теплопровідність та випаровування поту. Інтенсивне потовиділення є найбільш несприятливим способом тепловіддачі, оскільки супроводжується значною втратою рідини та мінеральних солей, що може призводити до згущення крові та порушень діяльності серцево-судинної і нервової систем.

До фізичних шкідливих факторів виробничого середовища належать також шум і вібрація. Шум являє собою сукупність звукових коливань різної частоти та інтенсивності, які негативно впливають на орган слуху та загальний функціональний стан організму людини.

Основними джерелами шуму в цехах виплавки феросплавів є редуктори, вентилятори, компресорні установки, насоси, транспортні механізми, ручний ударний інструмент, а також рух газів і рідин трубопроводами [22]. Тривалий вплив підвищених рівнів шуму знижує концентрацію уваги працівників, ускладнює сприйняття мовних і попереджувальних сигналів та може спричиняти професійні захворювання органів слуху.

Вібрація виникає внаслідок коливальних рухів машин, механізмів, трубопроводів та іншого обладнання. Основними причинами її появи є динамічна неврівноваженість обертових деталей, робота транспортних систем та технологічного устаткування.

Тривалий вплив шуму та вібрації негативно позначається на здоров'ї працівників, викликаючи погіршення слуху та зору, підвищення артеріального тиску, порушення функціонування нервової та серцево-судинної систем, а також захворювання опорно-рухового апарату [23].

3.2 Заходи щодо поліпшення умов праці

Забезпечення безпечних і комфортних умов праці у виробничих приміщеннях досягається шляхом реалізації комплексу організаційних та технічних заходів, спрямованих на підтримання нормативних параметрів повітряного середовища робочої зони.

До основних заходів належать удосконалення технологічних процесів, впровадження автоматизованих систем керування виробництвом, механізація та дистанційне управління технологічними операціями. Такі рішення дозволяють мінімізувати безпосередній контакт працівників із небезпечними та шкідливими виробничими факторами, підвищують продуктивність праці та сприяють покращенню санітарно-гігієнічних умов на робочих місцях [24].

Важливу роль у забезпеченні нормативних умов праці відіграють системи вентиляції та опалення виробничих приміщень. Додатковим засобом

захисту працівників є застосування засобів індивідуального захисту органів дихання, а також використання відповідних захисних пристроїв і обладнання.

Одним із найбільш ефективних методів боротьби із запиленістю виробничого середовища є застосування місцевої витяжної вентиляції (аспірації). Для цього в місцях інтенсивного утворення пилу передбачаються аспіраційні укриття та локальні відсмоктувачі, що забезпечують уловлювання пилових частинок безпосередньо біля джерела їх виникнення. Загальнообмінна вентиляція використовується для подачі свіжого повітря в приміщення, видалення надлишкового тепла, вологи та забрудненого повітря.

Очищення аспіраційного повітря від пилу здійснюється за допомогою спеціалізованого пилогазоочисного обладнання. З цією метою застосовуються мокрі пиловловлювачі, зокрема циклони та скрубери, установки із зрошувальними ґратами або розпилювальними системами, рукавні фільтри з термостійких матеріалів, а також електрофільтри. Останні характеризуються високою ефективністю та використовуються для остаточного очищення повітряних потоків від дрібнодисперсного пилу, що утворюється під час роботи з нагрітими матеріалами.

Для запобігання негативному впливу шкідливих газів, таких як оксид вуглецю, сірководень та оксиди азоту, виробничі приміщення обладнуються ефективними системами видалення забрудненого повітря. У місцях можливого накопичення газів встановлюються витяжні зонти та локальні вентиляційні пристрої, що забезпечують безпечні умови перебування персоналу.

У виробничих цехах із значними тепловиділеннями широко застосовується природна вентиляція (аерація). Аераційні ліхтарі та вентиляційні шахти розміщують безпосередньо над основними джерелами тепла, що забезпечує ефективне видалення нагрітого повітря. У випадках, коли природний повітрообмін не забезпечує необхідних параметрів мікроклімату, передбачають установлення механічної загальнообмінної вентиляції.

Для локалізації надлишкових тепловиділень від окремих агрегатів і технологічного обладнання використовуються місцеві витяжні пристрої, зокрема витяжні зонти, бортові відсмоктувачі та інші системи локальної вентиляції. У приміщеннях невеликого об’єму або ізольованих робочих зонах (кабінах кранів, диспетчерських пунктах, операторських, кімнатах відпочинку) доцільним є застосування систем кондиціонування повітря з можливістю індивідуального регулювання температури та інтенсивності повітрообміну.

Для зниження впливу інтенсивного теплового випромінювання впроваджується комплекс теплозахисних заходів. До них належать теплоізоляція нагрітих поверхонь, використання захисних екранів, відбивних покриттів та інших технічних засобів, що обмежують передачу теплової енергії до робочої зони та сприяють підтриманню нормативних параметрів мікроклімату.

3.3 Виробнича санітарія

3.3.1 Мікроклімат, опалення, вентиляція та кондиціонування повітря

Забезпечення нормативних параметрів повітряного середовища у виробничих приміщеннях досягається шляхом організації ефективного повітрообміну, який передбачає видалення забрудненого та подачу свіжого повітря до робочої зони.

За способом переміщення повітря вентиляційні системи поділяються на природні та механічні. При одночасному використанні обох способів організовується змішана вентиляція. Природний повітрообмін відбувається за рахунок різниці температур внутрішнього та зовнішнього повітря, а також під впливом вітрового напору. Механічна вентиляція забезпечується роботою спеціального обладнання, зокрема вентиляторів та ежекторів.

Залежно від функціонального призначення вентиляційні системи можуть бути припливними, витяжними або припливно-витяжними. За характером обслуговування виробничих приміщень розрізняють загальнообмінну та місцеву вентиляцію. Загальнообмінна вентиляція забезпечує необхідний повітрообмін у всьому об’ємі приміщення, тоді як місцева призначена для локального видалення шкідливих речовин безпосередньо біля джерела їх утворення або подачі очищеного повітря до окремих робочих зон.

Для організації вентиляції повинно використовуватися повітря, що відповідає санітарно-гігієнічним вимогам. У разі наявності забруднень припливне повітря підлягає попередньому очищенню. Допускається неорганізоване надходження зовнішнього повітря для компенсації витяжки за умови дотримання нормативних параметрів повітрообміну.

У виробничих цехах значного об’єму широко застосовується аерація — організований природний повітрообмін, який забезпечує підтримання необхідних параметрів мікроклімату. Цей спосіб вентиляції є економічно доцільним для великих приміщень із суттєвими тепловиділеннями, оскільки не потребує значних експлуатаційних витрат [26].

Для ефективної аерації у виробничих будівлях передбачають спеціальні вентиляційні прорізи, розташовані на різних рівнях по висоті приміщення. Таке конструктивне рішення сприяє інтенсивному видаленню нагрітого повітря та надходженню свіжого повітря до робочої зони.

3.3.2 Природне та штучне освітлення

Раціональне освітлення виробничих приміщень є важливою умовою забезпечення безпеки праці та високої продуктивності персоналу. Природне освітлення характеризується значною мінливістю залежно від пори доби, погодних умов та сезону року. Рівень освітленості всередині будівлі, як правило, є нижчим за зовнішню освітленість.

Під час проєктування систем природного освітлення враховується розсіяне світло небосхилу, оскільки воно забезпечує найбільш стабільні умови освітлення робочих місць.

Для створення необхідного рівня освітленості в темний час доби або за недостатнього природного освітлення застосовується штучне освітлення. Його реалізують за допомогою світильників різних типів та конструкцій.

На промислових підприємствах використовують загальне та комбіноване освітлення [28]. Загальне освітлення забезпечує нормативну освітленість у всьому приміщенні шляхом рівномірного або локалізованого розміщення світильників. Комбінована система передбачає поєднання загального та місцевого освітлення, що дозволяє створити оптимальні умови безпосередньо на робочих місцях. Використання лише місцевого освітлення без загального не допускається через можливість виникнення значного контрасту яскравості та підвищення зорового навантаження.

Місцеве освітлення може бути стаціонарним або переносним залежно від особливостей технологічного процесу. За функціональним призначенням освітлення поділяється на робоче та аварійне. Аварійне освітлення передбачене для забезпечення безпечної евакуації працівників або продовження виконання критично важливих операцій у разі раптового відключення основного електропостачання.

Під час розрахунку освітлювальних установок враховується коефіцієнт запасу, який компенсує зниження світлового потоку в процесі експлуатації внаслідок забруднення світильників та старіння джерел світла.

3.3.3 Захист від шуму та вібрації

Захист працівників від шкідливого впливу шуму і вібрації здійснюється шляхом впровадження комплексу технічних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів, а також застосування засобів індивідуального захисту.

Зменшення рівня шуму досягається шляхом якісного монтажу обладнання, динамічного балансування обертових елементів, своєчасного технічного обслуговування та виконання планово-попереджувальних ремонтів [24]. Недотримання вимог експлуатації обладнання може призвести до значного підвищення шумового навантаження на працівників.

Ефективним методом боротьби з шумом є використання звукоізолюючих конструкцій: перегородок, кожухів, екранів, облицювальних матеріалів та інших інженерних рішень, які знижують поширення звукових хвиль у виробничому середовищі.

Основним колективним методом захисту від вібрації є віброізоляція джерел її виникнення. Для цього використовуються амортизатори, виготовлені з гуми, сталевих пружин та інших пружних матеріалів. Широке застосування знаходять комбіновані віброізолятори, пневматичні та гідравлічні системи демпфування коливань.

Підвищення ефективності віброізоляції досягається встановленням обладнання на масивні фундаменти або спеціальні віброгасильні конструкції. Зменшення рівня вібрацій також забезпечується використанням додаткових реактивних опор і демпфуючих пристроїв.

Для зниження коливань захисних кожухів та огороджувальних конструкцій застосовуються матеріали з високими демпфуючими властивостями, зокрема гума, полімерні покриття та спеціальні вібропоглинальні мастики.

У випадках, коли технічними засобами неможливо забезпечити нормативні рівні шуму та вібрації, працівники повинні бути забезпечені відповідними засобами індивідуального захисту органів слуху та віброзахисними пристроями.

3.3.4 Побутові та допоміжні приміщення

Для створення належних санітарно-побутових умов на підприємстві передбачаються спеціально обладнані приміщення, призначені для задоволення побутових потреб працівників під час виконання трудових обов’язків [24]. До таких приміщень належать гардеробні, душові, санітарні вузли, умивальні, кімнати для приймання їжі, приміщення для особистої гігієни жінок, кімнати відпочинку, пункти забезпечення питною водою та інші об’єкти соціально-побутового призначення.

Підлоги у санітарно-побутових приміщеннях повинні бути водонепроникними та обладнаними системами відведення стічних вод. Оздоблення стін виконується з матеріалів, стійких до впливу вологи та придатних для регулярного вологого прибирання й дезінфекції.

Санітарно-побутові комплекси розміщують безпосередньо біля виробничих корпусів або з’єднують із ними закритими переходами. Допоміжні виробничі дільниці, розташовані окремо від основного цеху, повинні бути забезпечені власними побутовими приміщеннями.

Розташування побутових будівель здійснюється з урахуванням переважаючого напрямку вітру та особливостей виробничого процесу. Планувальні рішення мають виключати перетинання потоків працівників і забезпечувати безпечне та зручне користування приміщеннями.

У гарячих металургійних цехах обов’язково облаштовуються місця короткочасного відпочинку працівників. Для цього використовуються спеціальні кабіни або павільйони, обладнані лавами, системами вентиляції чи кондиціонування повітря, а також пристроями для забезпечення працівників питною водою.

Питне водопостачання організовується за допомогою фонтанчиків, закритих баків або інших санітарно безпечних пристроїв. Температура питної води повинна відповідати встановленим санітарним нормам, а відстань від робочих місць до пунктів водопостачання не повинна перевищувати

нормативних значень, що забезпечує безперешкодний доступ працівників до питної води протягом робочої зміни.

3.4 Електробезпека

Забезпечення електробезпеки у виробничих умовах є одним із ключових напрямів охорони праці та передбачає комплекс технічних і організаційних заходів, спрямованих на запобігання ураженню працівників електричним струмом.

Внутрішньоцехові електричні мережі повинні виконуватися ізольованими проводами або кабельними лініями із захисною оболонкою, характеристики якої відповідають умовам експлуатації, механічним навантаженням та впливу виробничого середовища [30].

Для мереж загального освітлення допускається використання напруги до 250 В. У приміщеннях з підвищеною або особливою небезпекою ураження електричним струмом напруга місцевого та ремонтного освітлення, а також ручного електроінструменту повинна відповідати вимогам чинних нормативних документів і не перевищувати безпечних значень.

Під час проєктування електричних мереж нормуються мінімально допустимі відстані від струмопровідних частин до землі, будівельних конструкцій, транспортних шляхів та інших об’єктів. Крім того, визначаються допустимі перерізи провідників з урахуванням механічної міцності та надійності їх експлуатації.

Для унеможливлення випадкового контакту працівників зі струмовідними елементами електроустановок застосовують конструктивні рішення, які передбачають їх розміщення у важкодоступних місцях, за захисними огородженнями, у кабельних каналах, під підлогою або всередині будівельних конструкцій.

Струмовідні частини електрообладнання, доступ до яких можливий під час експлуатації, повинні бути надійно ізольовані або захищені спеціальними

огородженнями. Особлива увага приділяється обладнанню, що працює під підвищеною напругою, оскільки воно становить підвищену небезпеку для персоналу.

Додатковим заходом захисту є використання ізоляційних покриттів, лаків, емалей, полімерних плівок та інших матеріалів з високими діелектричними властивостями. Захисне фарбування електрообладнання також виконує сигнальну функцію та сприяє підвищенню рівня безпеки під час експлуатації електроустановок.

3.5 Пожежна безпека

Пожежна безпека виробничих об’єктів забезпечується комплексом організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання виникненню пожеж, обмеження їх поширення та створення умов для безпечної евакуації персоналу.

Ступінь пожежної небезпеки горючих рідин визначається такими показниками, як температура спалаху, температура самозаймання, концентраційні межі поширення полум’я та швидкість горіння. Для газоповітряних сумішей додатково враховуються межі вибуховості та особливості процесу займання.

У металургійному виробництві підвищена пожежна небезпека пов’язана з використанням горючих газів і високотемпературних технологічних процесів. Утворення вибухонебезпечних сумішей може бути наслідком витоків газу через нещільності технологічного обладнання, порушення герметичності трубопроводів, підсмоктування повітря або недотримання встановлених технологічних режимів.

Особливу небезпеку становлять аварійні витоки горючих газів, що перебувають під тиском. У таких випадках можливе підвищення температури газового потоку, що збільшує ризик займання та розвитку аварійної ситуації.

Пожежна небезпека зростає зі збільшенням температури виробничого середовища. Технологічні операції, пов’язані з нагріванням горючих речовин до температури, близької або вищої за температуру спалаху, потребують посиленого контролю та впровадження додаткових заходів безпеки.

Відповідно до класифікації виробництв за пожежною небезпекою цехи виплавки феросплавів належать до категорії Г, оскільки технологічний процес пов’язаний з обробкою негорючих матеріалів у гарячому, розжареному або розплавленому стані та супроводжується виділенням тепла, іскор і відкритого полум’я [31].

Для зниження ризику виникнення пожеж необхідно реалізовувати такі заходи:

- мінімізацію кількості горючих речовин і матеріалів у виробничих приміщеннях;
- обмеження можливостей поширення вогню між окремими виробничими дільницями;
- забезпечення надійності технологічного обладнання та попередження його руйнування;
- своєчасне виявлення та ліквідацію осередків займання;
- створення безпечних умов для евакуації працівників і матеріальних цінностей.

Для гасіння пожеж застосовуються речовини, які забезпечують ефективне припинення процесу горіння шляхом охолодження, ізоляції або розбавлення горючого середовища. До найбільш поширених вогнегасних засобів належать вода, інертні гази, піни різних типів, вуглекислота, пісок та спеціальні порошкові склади.

Система протипожежного водопостачання повинна забезпечувати безперебійну подачу необхідної кількості води до місця виникнення пожежі протягом нормативного часу. Для цього на зовнішніх мережах встановлюються пожежні гідранти, а всередині будівель — пожежні крани, оснащені рукавами та стволами.

Первинними засобами пожежогасіння є вогнегасники, які повинні постійно перебувати у справному стані та розміщуватися у доступних місцях. Залежно від виду вогнегасної речовини застосовують водяні, пінні, вуглекислотні та порошкові вогнегасники.

3.6 Засоби індивідуального захисту

У випадках, коли технічними та організаційними заходами неможливо повністю усунути або знизити вплив небезпечних і шкідливих виробничих факторів до нормативних значень, працівники забезпечуються засобами індивідуального захисту (ЗІЗ).

Комплект засобів індивідуального захисту визначається характером виконуваних робіт, умовами праці та рівнем виробничих ризиків.

Для працівників гарячих металургійних цехів передбачено використання спеціального теплозахисного одягу, виготовленого з вогнестійких матеріалів. Під час виконання робіт поблизу джерел інтенсивного теплового випромінювання або під час ремонту теплових агрегатів можуть застосовуватися системи індивідуального охолодження у поєднанні зі спеціальним захисним одягом [25].

Для виконання аварійно-рятувальних та ремонтних робіт використовуються комплекти теплозахисного спорядження з металізованих тканин, які забезпечують ефективний захист від теплового випромінювання та високих температур.

Захист ніг від дії нагрітих поверхонь, іскор та бризок розплавленого металу забезпечується спеціальним шкіряним взуттям, призначеним для експлуатації в умовах гарячих виробництв.

Для захисту рук від термічних опіків застосовуються рукавиці та краги з вогнестійких матеріалів, зокрема сукна, брезенту та комбінованих матеріалів зі шкіряними накладками.

Захист голови здійснюється за допомогою захисних касок із термостійких матеріалів, обладнаних підшоломниками. Для додаткового захисту від теплового випромінювання можуть використовуватися спеціальні теплозахисні головні убори.

Для захисту очей та обличчя від дії яскравого випромінювання, іскор, окалини та бризок металу працівники забезпечуються захисними щитками, масками та окулярами зі світлофільтрами відповідного ступеня затемнення.

Своєчасне забезпечення працівників сертифікованими засобами індивідуального захисту та контроль за правильністю їх використання є важливою складовою системи управління охороною праці на підприємстві.

3.7 Розрахунок аерації цеху виплавки феросплавів

Температура робочого простору печі - 1250 °С; площа бічної поверхні печі - 162 м^2; площа бічних стін пічного відділення - 1100 м^2; температура повітря в робочій зоні - 41°С.

Кількість повітря, необхідного для асиміляції надмірних тепловиділень в будівлі цеху:

$$G = \frac{4{,}15 \cdot \alpha (m \cdot Q - Q_P)}{c \cdot (t_{P.З.} - t_H)}, \quad (4.1)$$

де а - коефіцієнт, що враховує висоту розташування припливних отворів; оскільки відстань від підлоги до припливного отвору 2м, тоді α=1,04 [27];

m - коефіцієнт, що враховує вплив площі, займаної тепловиділяючим устаткуванням; оскільки F_1/F_2 = 0,3 (F_1 - площа, займана устаткуванням,

F_2 - площа приміщення), отже m = 0,62 [27];

$Q_р$ - втрати теплоти через зовнішні огорожі в межах робочої зони, Вт;

Q - кількість теплоти, яка виділяється в цеху від різних джерел, Вт;

с - середня теплоємність повітря, кДж/(кг·К); ***с***-1,256 кДж/(кг·К) [27]);

$t_{РЗ}$ - температура повітря в робочій зоні, °С;

$t_Н$ - розрахункова температура зовнішнього повітря, °С.

$$Q = \Sigma Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \tag{4.2}$$

де Q_1, Q_2,Q_3,Q_4 - тепловиділення від поверхні міксера, рідкого чавуну, нагрітого устаткування, сонячної радіації через світлові отвори, Вт.

$$Q_1 = \left(2{,}2\left(T_B/10 + 32\right)^{5/4} + 4\left(\left(T_B/1000 + 3.23\right)^4 - 2{,}91\right)\right)\cdot 1{,}163 \cdot F_П, \tag{4.3}$$

де $T_В$ - внутрішня температура міксера, К;

$F_П$ - площа бокової поверхні міксера, м^2.

$$Q_1 = \left(2{,}2\left(1250 + 273/10 + 32\right)^{5/4} + 4\left(\left(1250 + 273/1000 + 3.23\right)^4 - 2{,}91\right)\right)\cdot$$

$$\cdot 1{,}163 \cdot 162 = 663887{,}34\,Вт = 663{,}887\,кВт.$$

Оскільки міксерів у відділенні два, то тепловиділення будуть рівні:

$$Q_1 = 663{,}887 \cdot 2 = 1327{,}774\,кВт,$$

$$Q_2 = 33{,}17 \cdot C \cdot G_M \cdot t_M, \tag{4.4}$$

де С - питома теплоємність металу, кДж/(кг К); С= 0,5 кДж/(кг-К) [27];

$G_М$ - маса нагрітого металу, що знаходиться одночасно в цеху в процесі транспортування, т;

$t_М$ - температура нагрітого металу °С.

$$Q_2 = 33{,}17 \cdot 0{,}5 \cdot 700 \cdot 1250 = 14511875\ \text{Вт} = 14511{,}875\text{кВт}.$$

$$Q_3 = 58{,}15 \cdot C \cdot G_{УСТ} \cdot t_{УСТ}, \tag{4.5}$$

де $G_{уст}$ - маса устаткування що контактує з гарячим металом, т;

$t_{уСТ}$ - температура до якої нагрівається устаткування, °С.

$$Q_3 = 58{,}15 \cdot 50 \cdot 45 = 130837{,}5\,Вт = 130{,}837\,кВт.$$

$$Q_4 = 9653 \cdot F_C, \tag{4.6}$$

де $F_с$ - площа світлових отворів виробничих приміщень [27], м ;

$$Q_4 = 9653 \cdot 150 = 1447950\ Вт = 1447,95 кВт.$$

Отже

$$Q = 1327774,6 + 14511875 + 130837,5 + 1447950 = 17418436\ В.$$

$$Q_Р = 6978 \cdot F_{Б.С.}, \tag{4.7}$$

де $Q_р$ - втрати теплоти через зовнішні огорожі в межах робочої зони, Вт.

$F_{Б.Сс.}$ - площа бокових стін цеху, м^2.

$$Q_р = 6978\ 1100 = 7675800 \text{ Вт} = 7675,80 \text{ кВт}.$$

$$t_Н = t_{р.з.} - \Delta t, \tag{4.8}$$

де А t = 5-8 (для теплого периода года At = 5; для холодного At = 8).

$$t_Н = 40,5\text{-}5 = 35,5\ °C.$$

Визначаємо кількість повітря, необхідного для асиміляції надмірних тепловиділень в будівлі цеху:

$$G = \frac{4,15 \cdot 1,04(0,62 \cdot 17418436 - 7675800)}{1,256 \cdot (40,5 - 35,5)} = 2146750 м^3 / год.$$

Знаходимо площі припливних отворів і витяжних отворів, м:

$$F_{пр} = \frac{G}{3600 \cdot \mu_1 \sqrt{2gh_n \rho_n (\rho_n - \rho_b)}}, \tag{4.9}$$

$$F_в = \frac{G}{3600 \cdot \mu_2 \sqrt{2gh_в \rho_в (\rho_n - \rho_b)}}. \tag{4.10}$$

де μ_1, μ_2 - коефіцієнти витрати, приймаються відповідно 0,56; 0,57 [26];

h_n, h_e - відстань від нейтральної зони до центрів відповідно припливних і витяжних отворів, м:

$$h_n = H - h_в, \tag{4.11}$$

$$h_в = \frac{H_1}{0,64\frac{\rho_в}{\rho_n} + 1}, \tag{4.12}$$

де H_1 - відстань по вертикалі між центрами припливних і витяжних отворів, м; Ні - 35,1 м;

$p_в$, $p_п$ - щільність повітря, що відповідно видаляється і зовнішнього (припливного) повітря, кг/м:

$$p_в = 1{,}293 + 3{,}7\cdot 10^{-3}\cdot a_в, \quad (4.13)$$

$$p_п = 1{,}293 + 3{,}7\cdot 10^{-3}\cdot a_п, \quad (4.14)$$

де $a_в$ - коефіцієнт (для теплого періоду року рівний 10) [27];

$a_п$ - коефіцієнт (для теплого періоду року рівний 13) [27].

$$p_в = 1{,}293 + 3{,}7\cdot 10^{-3}\text{-}10 = 1{,}33 \text{ кг/м}^3;$$

$$p_п = 1{,}293 + 3{,}7\cdot 10^{-3}\text{-}13 = 1{,}341 \text{ кг/м}^3.$$

Знаходимо відстань від нейтральної зони до центру витяжного отвору:

$$h_в = \frac{35{,}1}{0{,}64\dfrac{1{,}33}{1{,}341}+1} = 21{,}5.$$

Визначаємо відстань від нейтральної зони до центру припливного отвору:

$$h_п = 35{,}1 - 21{,}5 = 13{,}6 \text{ м}.$$

Площі припливних і витяжних отворів, м^2:

$$F_{пр} = \frac{2146750}{3600\cdot 0{,}56\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 3{,}16\cdot 1{,}341(1{,}341-1{,}33)}} \approx 537 м^2,$$

$$F_в = \frac{2146750}{3600\cdot 0{,}57\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 21{,}5\cdot 1{,}33(1{,}341-1{,}33)}} \approx 422 м^2.$$

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз технології виплавки феросиліцію у відкритих руднотермічних печах.

Визначені джерела утворення та показники технологічного процесу, що впливають на кількісний та якісний склад забруднень.

Виконаний аналіз кількісного та якісного складу забруднень довкілля при виробництві феросплавів. Виявлені напрями зменшення шкідливих викидів феросплавного виробництва технологічним шляхом.

Проведений аналіз ринку технологій захисту атмосфери при виробництві феросиліцію.

Встановлено, що найбільш перспективною технологією очищення газів відкритих феросплавних печей є очищення газів в рукавних фільтрах з використанням термостійких перфторетиленових тканин.

Розроблена схема сухого очищення газів відкритих феросплавних печей при виплавці феросиліцію, що включає: витяжний зонт, рукавний фільтр, димосос і димар

Проведений розрахунок основного та допоміжного обладнання очищення газів. Прийнятий фільтр ФРІР-3800 та система вивантаження вловленого пилу, яка включає пристрій вивантаження пилу УВП- 4000-250-200, живильник шлюзовий ЩЭ-ЭО-РНУ- 01, конвеєри скребкові КПС- 200 та КПС- 320.

Виконаний аеродинамічний розрахунок тракту, що газовідводить, і підібрано тягодуттєве устаткування - димосос серії Дх2 15,5х2 з електродвигуном ДАО4-450Х-8МУ1.

Розглянуті основні шкідливі і небезпечні чинники феросплавного виробництва і запропоновані заходи щодо їх усунення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Теоретичні основи охорони навколишнього середовища / І.А. Василенко, М.І. Скиба, О.А. Півоваров, В.І. Воробйова. Дніпро: Акцент ПП, 2017. 204 с.
2. Самойленко Н.М., Аверченко В.І., Байрачний В.Б. Системи технологій та промислова екологія. Металургійний та енергетичний комплекс Ч. І.: навч. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», Лідер, 2020. 212 с.
3. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: підручник для металург. спец. вищ. навч. закл./Д. Ф. Чернега та ін. Київ: Вища шк., 2006. 503 с.
4. Бережний М.М., Чубенко В.А. Основи проектування технологічних ліній і комплексів металургійних цехів: монографія. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2009. 430 с.
5. Проектування і обладнання електросталеплавильних і феросплавних цехів [Текст] : підруч. для внз / В. А. Гладких, М. І. Гасик, А. М. Овчарук, Ю. С. Пройдак ; Нац. металург. акад. України. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2004. – 692 с.
6. Казачков, Олег Ігорович Теорія і технологія феросплавного виробництва [Текст] : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА спец. 7.090401 "Металургія чорних металів" / Олег Ігорович Казачков, Юрій Вікторович Мосейко, Ольга Анатоліївна Позднякова ; ЗДІА. – Запоріжжя : ЗДІА, 2013. – 154 с.
7. Кириченко, О. Г. Особливості застосування печей постійного струму у феросплавному виробництві [Текст] / О. Г. Кириченко, І. В. Шайтанов // Металургія. – 2022. – Вип. 1. – С. 67-74.
8. Дослідження можливості інтенсифікації процесу виробництва феросплавів [Текст] / В. І. Нежурін, С. В. Башлій, В. Л. Коваленко, Р. Г. Тугуши // Металургія. – 2025. – Вип. 2. – С. 135-142.
9. Підвищення ефективності процесу виплавки феросплавів в електродугових печах шляхом вдосконалення контролю та керування

технологічними режимами [Текст] / А. Ніколенко, В. Нежурін, В. Куваєв [та ін.] // Сучасні проблеми металургії. – 2025. – № 28. – С. 44-70.

10. Герасимов О.І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища: навч.посіб. / Одеськ.держ.екол.ун-т. Одеса: ТЕС, 2018. 228с.

11. Екологічні аспекти металургійних технологій (1 ч.): навч. посібник/Грес Л.П. та ін. Дніпро: Україн. держ. ун-т науки і технол., 2022. 106 с.

12. Природоохоронні технології. Частина 1. Захист атмосфери: навчальний посібник/Северин Л.І. та ін. Вінниця: ВНТУ, 2012. 388 с.

13. В.В. Шаравара. Охорона атмосферного повітря: теорія і практикум. Навчальний посібник. − Кам'янець-Подільський, 2012. 356с.

14. Теоретичні основи охорони навколишнього середовища / І.А. Василенко, М.І. Скиба, О.А. Півоваров, В.І. Воробйова. Дніпро: Акцент ПП, 2017. 204 с.

15. Ратушняк Г.С., Лялюк О.Г. Технічні засоби очищення газових викидів. Навч.посіб. – Вінниця: ВНТУ, 2005. 158с.

16. Самойленко Н.М., Аверченко В.І., Байрачний В.Б. Системи технологій та промислова екологія. Металургійний та енергетичний комплекс Ч. І.: навч. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», Лідер, 2020. 212 с.

17. Природоохоронні технології. Частина 1. Захист атмосфери: навчальний посібник/Северин Л.І. та ін. Вінниця: ВНТУ, 2012. 388 с.

18. Крусір Г.В., Мадані М.М., Гаркович О.Л. Техніка та технології очищення газових викидів: навчальний посібник. Одеса: ОНАХТ-Одеса, 2017. 207 с.

19. Каталог пилогазоочисного обладнання: Каталог. Запоріжжя: УкрНДІОГаз, 1990. 238 с.

20. Процеси та апарати природоохоронних технологій. Підручник : Т.2 / Л. Д. Пляцук, Р. А. Васькін, В. П. Шапорев та ін. Суми : Сумський державний університет, 2017. 521 с.

21. Технології захисту атмосфери : метод. вказівки до практ. занять / Кожемякін Г.Б., Прутцьков Д.В., Вагін А.В. – Запоріжжя : ЗНУ, 2023. – 73 с.

22. Полєтаєв В.П., Крюковська О.А. Охорона праці в галузі (для спеціальності «Металургія чорних металів») : навчальний посібник/під ред. д.т.н., проф. А. П. Огурцова. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2015. 363 с.

23. Охорона праці на гірничо-металургійному підприємстві: навч. посібн. ч.4: Енергетичний комплекс/В.О. Шеремет та ін. Дніпропетровськ: Ліра ЛТД, 2004 256с.

24. НПАОП 27.0-7.04-21 Мінімальні вимоги щодо безпеки та здоров'я на роботі в металургійній промисловості: Наказ Мінекономрозвитку від 19.03.2021 № 569 «Про затвердження Мінімальних вимог щодо безпеки та здоров'я на роботі в металургійній промисловості» // База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0606-21#Text

25. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: Постанова МОЗ України №42 від 01.12.99 / База даних «Законодавство України»/ВР України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text

26. Системи опалення, вентиляції і кондиціювання повітря будівель [Електронний ресурс]: навч. посіб. / М.Ф.Боженко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 36,087 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 380 с

27. ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування": Наказ Мінрегіонбуду України від 25.01.2013 № 24 Про затвердження ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування"/ База даних «Законодавство України»/ВР України. URL:https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0024858-13#Text

28. ДБН В.2.5.-28-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. Мінбуд України, 2006 76 с.

29. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова МОЗ України №37 від 01.12.99/ База даних

«Законодавство України»/ВР України. URL:https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Text

30. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»: Наказ Мінсоцполітики № 4 від 09.01.98/ База даних «Законодавство України»/ВР України. URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text

31. НПАОП 27.35-1.01-09. Правила охорони праці у феросплавному виробництві : затв. наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 15.10.2009 № 173, зареєстр. в Міністерстві юстиції України 05.11.2009 за № 1039/17055. Київ, 2009. 72 с.

32. Румянцев, В. Р. Охорона праці в металургійному виробництві [Текст] : метод. вказівки до практ. занять для здобувачів ступеня вищ. освіти магістра спец. 263 "Цив. безпека" освіт.-проф. програми "Охорона праці" / В. Р. Румянцев ; ІННІ ЗНУ. – Запоріжжя : ЗНУ, 2024. – 44 с

33. Clarke, P. Functional Safety from Scratch: A Practical Guide to Process Industry Applications [Текст] / P. Clarke. – Amsterdam : Elsevier, 2023. – 324 p.

34. Охорона праці в галузі [Текст] : навч. посіб. для студентів вищ. навч. закл. / Петро Сергійович Атаманчук, Вадим Владиславович Мендерецький, Олег Петрович Панчук, Роман Миколайович Білик. – Київ : ЦУЛ, 2017. – 322 с.

35. Основи охорони праці [Текст] : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА всіх спец. ден. та заоч. форм навчання / К. В. Бєлоконь, В. Г. Рижков, Ю. В. Куріс, Є. А. Манідіна ; ЗДІА. – Запоріжжя : ЗДІА, 2015. – 180 с.

36. Зеркалов, Д. В. Охорона праці в галузі. Загальні вимоги [Текст] : навч. посіб. / Д. В. Зеркалов. – Київ : Основа, 2011. – 551 с.

37. Атаманчук П. С., Мендерецький В. В., Панчук О. П., Білик Р. М. Охорона праці в галузі : навч. посіб. Київ : ЦУЛ, 2017. 322 с.