

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

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

(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) рівень _____

на тему Проект системи сухої очистки технологічних газів мартенівських печей з утилізацією тепла

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1832-0

Онишко О.С.

(ПІБ)

(підпис)

спеціальності

183 Технології захисту навколишнього середовища

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

Технології захисту навколишнього середовища

(шифр і назва)

Керівник Кожемякін Г.Б.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Запоріжжя - 2023 року

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 другий магістерський 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. Белоконь
" 07 " 05 2023 року

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

Онишко Олексію Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Проект системи сухої очистки технологічних газів мартенівських печей з утилізацією тепла

керівник роботи (проекту) доц., к.т.н. Кожем'якін Геннадій Борисович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "01" 05 2023 року № 614-с

2. Строк подання студентом роботи (проекта) 30.11.2023

3. Вихідні дані до роботи (проекта) Витрата технологічних газів - 125 тис нм³/год. Початковий вміст пилу - 4,0 г/м³, Температура газів - 850°C.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Технологія виплавки сталі в мартенівських печах. Джерела утворення викидів мартенівського виробництва. Обґрунтування способу очистки газів та утилізації тепла. Розрахунок споруджень систем очистки технологічних газів та утилізації тепла. Охорона праці. Техніко-економічне обґрунтування


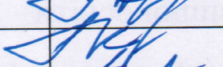
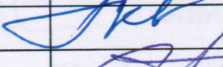
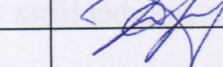
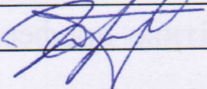
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Креслення, презентаційний матеріал: План та розріз мартенівського цеху.

Мартенівська піч. Технологічна схема очистки газу. План та розріз газоочистки.

Основні апарати схеми очистки газів. Охорона праці. Техніко-економічні показники

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

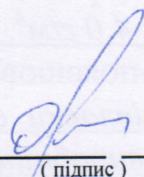
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
Розділ 1	Кожсякін Г.Б., доцент	
Розділ 2	Кожсякін Г.Б., доцент	
Розділ 3	Кожсякін Г.Б., доцент	
Розділ 4	Кожсякін Г.Б., доцент	
Нормоконтроль	Белоконь Ю.О. зав.каф.	

7. Дата видачі завдання 26.06.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Загальна частина	06.2023-06.2023	
2	Спеціальна частина	09.2023-10.2023	
3	Охорона праці	11.2023	
4	Організаційно-економічна частина	11.2023	
4	Креслення	10.2023-11.2023	

Студент

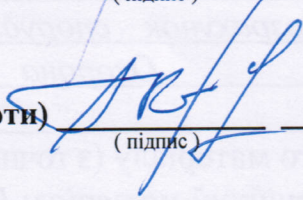


(підпис)

О.С. Онитко

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)



(підпис)

Г.Б. Кожсякін

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційного проекту: 98 с., 16 табл., 12 рис., 25 джерел.

МАРТЕНІВСЬКА ПІЧ, КОТЕЛ-УТИЛІЗАТОР, ЗАПИЛЕНІСТЬ, ЕЛЕКТРОФІЛЬТР, ДИМОВА ТРУБА, ОХОРОНА ПРАЦІ, СТРОК ОКУПНОСТІ

Об'єкт проектування – ділянка газоочищення мартенівського цеху.

Предмет проектування – система очищення газів, що відходять від мартенівської печі.

Мета проекту – проектування системи газоочищення мартенівського цеху з утилізацією фізичного тепла газів, що відходять.

За результатами аналітичного огляду, теоретичного аналізу та проведених розрахунків розроблена схема очищення мартенівських газів, яка включає: котел-утилізатор, електрофільтр, вентилятор, димову трубу. Димові гази, що відходять від печі містять дрібнодисперсний пил, діоксид вуглецю, пари води, азот і кисень, їх кількість змінюється залежно від періоду плавки. Запиленість газів після котла-утилізатора становить 4 г/м³. Кінцева запиленість газів, після електрофільтру становить 0,040 г/м³. В роботі передбачена утилізація пилу. Кількість утилізованого пилу 3742 т/рік.

В результаті розрахунку основних техніко-економічних показників обґрунтовано доцільність використання для охолодження газів котла-утилізатору. Строк окупності капіталовкладень в запроєктовану схему очищення становить 1,84 роки, а коефіцієнт ефективності капіталовкладень 0,54 грн/грн. ·рік.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ СТАЛІ МАРТЕНІВСЬКИМ СПОСОБОМ	9
1.1 Організація сталеплавильного виробництва у мартенівських цехах	9
1.2 Конструктивні особливості мартенівських печей	17
1.3 Особливості технологічного процесу отримання сталі в мартенівських печах	19
1.4 Продукція та відходи мартенівського виробництва	31
2 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ ВІД ВИКИДІВ МАРТЕНІВСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА	33
2.1 Визначення характеристик пилогазових викидів мартенівських печей	33
2.2 Аналіз технологій очистки газів мартенівських печей	38
2.3 Вибір та обґрунтування системи очищення технологічних газів агломераційного виробництва стрічки	44
2.4 Проектування основного та допоміжного обладнання технології очистки газів	45
2.4.1 Вибір та розрахунок котла-утилізатора	46
2.4.2 Вибір та розрахунок електрофільтру	59
2.4.3 Розрахунок агрегатів живлення	64
2.4.4 Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту	65
2.4.5 Розрахунок димової труби	69
2.4.6 Вибір тягодутевого обладнання	70
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА	73
3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів	73
3.2 Заходи з поліпшення умов праці	76

3.3	Виробнича санітарія	77
3.4	Електробезпека	78
3.5	Пожежна безпека	79
4	ОРГАНІЗАЦІЙНО - ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	81
4.1	Організація роботи на ділянці пиловловлювання та газоочищення	81
4.2	Розрахунок робочої програми ділянки газоочищення	81
4.3	Розрахунок чисельності основних робітників ділянки газоочищення	85
4.4	Оцінка економічної ефективності	88
4.4.1	Розрахунок капітальних вкладень	88
4.4.2	Розрахунок експлуатаційних витрат на очищення газу і уловлювання пилу	90
4.5	Техніко-економічне обґрунтування рішень, які прийняті у проекті	92
	ВИСНОВКИ	94
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	95

ВСТУП

Металургійна промисловість значно впливає на навколишнє середовище. Для металургії характерні великі енерговитрати, суттєві витрати сировинних матеріалів, утворення значної кількості викидів, скидів і твердих відходів [1].

На частку підприємств чорної і кольорової металургії припадає близько 20...25 % загальних шкідливих викидів в атмосферу, а в районах розташування великих металургійних заводів і комбінатів 50 % всієї кількості забруднень. У зв'язку з цим у галузі пророблена значна робота по збільшенню кількості газоочисних установок на металургійних підприємствах та поліпшення показників їх роботи. У результаті в деяких містах і промислових центрах вдалося зменшити або стабілізувати шкідливі викиди при одночасному зростанні обсягу і інтенсифікації промислового виробництва [2].

Незважаючи на суттєві зміни в технології виплавки, Україна продовжує залишатися найбільшим виробником мартенівської сталі у світі. У порівнянні з іншими металургійними переділами мартенівське виробництво має одні з гірших екологічних показників. Особливо це стосується викидів пилу в умовах інтенсифікації плавки за допомогою продувки ванни киснем [1, 2]. Для порівняння кількість газів, що відходять, від мартенівської печі становить 3700-4000 м³/т сталі, а з електросталеплавильної печі – 80-110 м³/т сталі із середньої запиленістю 15-30 г/м³ і 10-15 г/м³ відповідно [1].

Побічними продуктами мартенівського виробництва є гази, що відходять від мартенівських печей, пил та шлаки. Гази, що відходять, від мартенівських печей, можливо використовувати у якості теплових вторинних енергоресурсів [3]. Мартенівські шлаки є цінною сировиною для металургійного виробництва. В склад мартенівських шлаків входить близько 12 % Fe, а також такі компоненти як CaO, MgO, MnO, CaF₂, FeO, і може використовуватися в аглодоменному і ливарному виробництвах замість вапняку [1]. Мартенівські шлаки є також джерелом теплового вторинного

енергоресурсу. Крім шлаків, джерелом теплового вторинного енергоресурсу в мартенівському виробництві є готовий продукт – фізичне тепло сталі. Ефективне використання тепла мартенівського газу, сталі та шлаків дає значне скорочення використання енергоносіїв, які застосовуються в мартенівському виробництві. Питомий вихід мартенівських шлаків становить у середньому 180 кг/т сталі.

Завдяки очищенню викидів, перед їх надходженням в атмосферу, запобігається забруднення атмосферного повітря. Очищення повітря має важливе санітарно-гігієнічне, екологічне і економічне значення [4].

Таким чином, одним з напрямків підвищення екологічної безпеки мартенівського виробництва є найбільш повна утилізація побічних продуктів мартенівського виробництва та організація високоефективної системи очистки відхідних газів від сталеплавильних печей.

Метою магістерського проекту є підвищення екологічної безпеки мартенівського виробництва. Поставлена мета досягається за рахунок розв'язання наступних завдань:

- Розробка високоефективної системи очищення мартенівського газу;
- Розробка схеми утилізації фізичного тепла технологічних газів, що відходять;
- Обґрунтування використання котла-утилізатору;
- Розробка заходів з охорони праці;
- Оцінка основних техніко-економічних показників розробленої системи газоочищення мартенівських газів.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ СТАЛІ МАРТЕНІВСЬКИМ СПОСОБОМ

1.1 Організація сталеплавильного виробництва у мартенівських цехах

Сучасні мартенівські цехи за продуктивністю, що визначається ємністю використовуваних печей, поділяються на три типи [2]:

- 1) малої продуктивності - до 250 тис. т. злитків на рік з печами ємністю до 100 т;
- 2) середньої продуктивності - від 400 до 1000 тис. т злитків на рік з печами ємністю 100-185 т;
- 3) великої продуктивності - понад 1500 тис. т злитків на рік з печами ємністю 185-600 т і вище.

Структура мартенівських цехів обумовлюється їх продуктивністю, застосовуваними процесами плавки (скрап-процес, рудний або скрап-рудний процеси), способами підготовки та подачі шихти до печей, методами розливання сталі на зливки, а також іншими особливостями, пов'язаними з виконанням окремих операцій виробничого циклу.

Великий мартенівський цех має шихтовий двір, головний корпус, а також допоміжні відділення: міксерне, стриперне, нагрівальних колодязів, підготовки виливниць та шлаковий двір, які розташовані в самостійних будівлях поблизу головного корпусу. Нижче наводиться коротка характеристика відділень великого мартенівського цеху з урахуванням послідовності технологічних операцій виробничого циклу.

Шихтовий двір служить для приймання і зберігання твердих шихтових і заправних матеріалів (скрапу, руди, вапна, доломіту та ін.), що надходять на металургійне підприємство. Тут же шихтові матеріали готують до плавки (пакують стружку і листовий обріз, обробляють великий брухт і т. д.), для цього служить спеціальне обладнання (копри, пакувальні преси, ножиці для

різання металу та ін). Шихтовий двір зазвичай розташовують паралельно головному корпусу на висоті його робочого майданчика, що дорівнює 7 м. Матеріали доставляють на шихтовий двір по похилій естакаді, що дозволяє швидко розвантажувати сипучі матеріали з саморозвантажувальних вагонів в бункери і ями, що розташовуються рівня залізничної колії, подавати шихтові матеріали на робочий майданчик пічного прольоту.

Для навантаження та розвантаження матеріалів на шихтовому дворі передбачені мостові магнітні, грейферні та мульдо-магнітні крани. Металевий брухт на шихтовому дворі зберігають у скрапних ямах, а сипучі неметалеві матеріали - у залізобетонних бункерах. Для транспортування вагонів із шихтовими матеріалами, а також мульдових візків на шихтовому дворі передбачені залізничні колії. Мильди, завантажені шихтовими матеріалами, встановлюють на візки, які після виходу з шихтового двору зважуються на терезах і прямують у шихтовий відкриток головного корпусу, а потім до мартенівських печей.

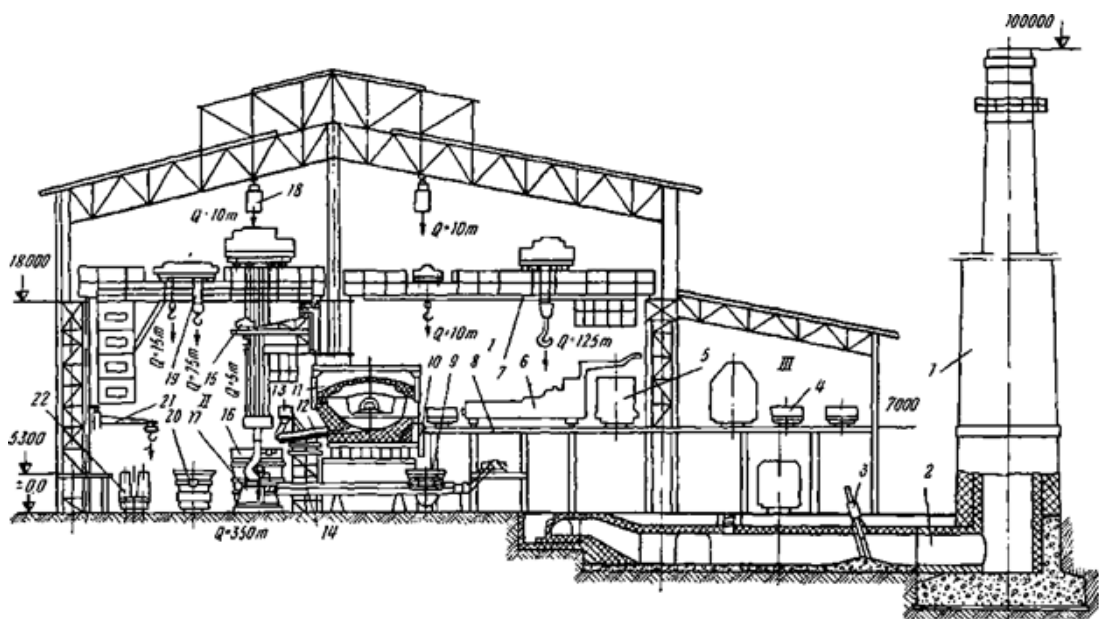
Головний корпус (рис. 1.1) складається з шихтового відкритка, пічного та розливного прольотів. Поблизу головного корпусу розташовані приміщення для котлів-утилізаторів та експрес-лабораторій.

Шихтовий відкриток є майданчиком з наскрізними паралельними шляхами. На майданчику розміщуються склади з навантаженими шихтою мульдовими візками, підготовленими для подачі в пічний проліт, а також для прибирання сміття. Під майданчиком шихтового відкритка передбачено наскрізну залізничну колію для подачі вогнетривких матеріалів. Там же розташовуються пристрої для механізованого ремонту печей. На стику пічного прольоту та шихтового відкритка на робочому майданчику знаходяться пости управління печами, засіки, ваги для зважування феросплавів тощо.

У шихтовий відкриток мартенівського цеху надходять:

- а) металеві шихтові матеріали: сталевий лом, його відходи, пакети легкового лома, скрап, розібрані «козли», пакетована або брикетована стружка, обрізки слябів і металевих листів, розібраний чавунний лом, тощо;
- б) окиснювачі: залізна руда, прокатна окалина, тощо;
- в) розкислювачі та легуючі добавки: феромарганець, феросиліцій, силікомарганець, феротитан, алюміній, кремневімісні відходи й т.п.;
- г) матеріали, що флюсують: вапняк, вапно, боксит;
- д) заправні матеріали: доломить сирий, доломіт, магнезитовий порошок, порошок для торкретування [7].

Пічний проліт, де знаходяться мартенівські печі, є основною ділянкою цеху. Для зручності обслуговування печей у прольоті передбачено робочий майданчик, розташований на висоті 7 м від рівня підлоги головного корпусу (рис. 1.1).



- I - пічний проліт, II - розливний проліт, III - шихтовий відкриток
- 1 - димова труба, 2 - борів; 3 - перекидні пристрої; 4 - мульдові візки; 5 - чавуновоз;
- 6 - підлогова завалочна машина; 7 - заливальний кран; 8-робочий майданчик;
- 9 - шлаковий ківш; 10 - жолоб для зливу шлаку; 11 - мартенівська піч;
- 12 - жолоб для випуску сталі, 13 - бункер для феросплавів;
- 14 - пристосування для збирання шлаку з-під печі; 15 - консольний кран,
- 16 - сталерозливний ківш, 17 - стенд; 18 - монорейковий візок; 19 - розливний кран;
- 20 - шлаковоз; 21 - велосипедний кран; 22 - склад візків з виливницями

Рис 1.1 - Поперечний розріз головного корпусу мартенівського цеху

великої продуктивності

У пічному прольоті здійснюють наступні операції: заправляють печі, завантажують у піч шихтові матеріали, спостерігають за ходом плавки сталі, подають у піч руду, флюси та феросплави при доведенні, відбирають технологічні проби сталі та шлаку для аналізу.

На робочому майданчику вздовж фронту мартенівських печей розташовані залізничні колії, які служать для подачі до печей електровозом ківшів (ємністю 100 т) з розплавленим чавуном з міксерного відділення, переміщення підлогових завантажувальних машин, установки перед печами складів візків мульдових з шихтою. Для завалки твердої шихти в печі використовують підвальні завалочні машини, а для заливки розплавленого чавуну - жолоби підвісного типу і ківші, що переміщуються кранами вантажопідйомністю 125/30 т. Для збирання шлаку від печей служить спеціальний пристрій 14, яке розташоване нижче робочого майданчика прольоту та з'єднане рейками з розливним прольотом.

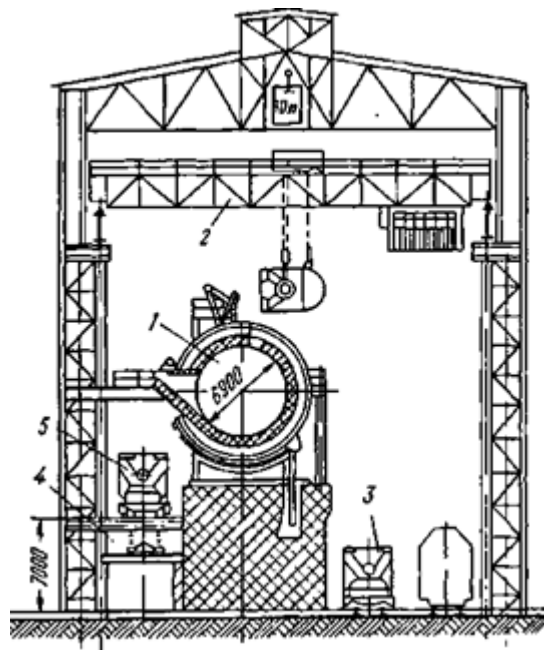
Розливний проліт призначений для розливання сталі у виливниці (металеві форми) для отримання злитків. Сталь, виплавлену в мартенівській печі, заливають у ківші ємністю 200 і 270 т, потім мостовим краном великої вантажопідйомності (до 350 т) перевозяться до спеціальних майданчиків біля зовнішніх стін прольоту. Тут сталь розливають у виливниці, встановлені на візках 22. Після закінчення розливання сталі і необхідної витримки для проведення процесу кристалізації зовнішніх шарів злитка склади з виливницями і злитками, що знаходяться в них, по спеціальному залізничному шляху направляють в стріперне відділення. Другий залізничний шлях передбачений для переміщення шлаковозу 20, який вивозить шлак з прольоту на шлаковий двір. На спеціальних ділянках розливного прольоту ремонтують вогнетривку кладку сталерозливних ківшів, набирають і сушать їх стопори, ремонтують кладку сталевипускних жолобів.

Приміщення для котлів-утилізаторів. Для безпеки парові котли-утилізатори розміщують в окремому приміщенні. Вони призначені для використання тепла продуктів згоряння, що відходять з мартенівської печі,

температура яких біля основи димових труб становить 450—700° С. Уловлюване при цьому тепло служить для отримання пари, яка використовується для різних загальнозаводських потреб (парова опалення будівель та ін.) [16].

Експрес лабораторії повинні забезпечувати проведення аналізів проб сталі і шлаку за ходом плавки, контроль якості вихідних матеріалів, що поступають на шихтовий двір, а також хімічного складу, що доставляється з міксерного відділення розплавленого чавуну.

Міксерне відділення (рис. 1.2). Для безперебійного постачання мартенівського цеху розплавленим чавуном усередненого складу його зберігають у спеціальних ківшах барабанного типу з опуклими днищами, які називаються міксерами.



1 - міксер; 2 - заливальний мостовий кран; 3 - чавуновоз; 4 - ваги;
5 - склад ковшів для доставки чавуну в пічний проліт

Рисунок 1.2 - Поперечний розріз міксерного відділення:

Місткість міксера в мартенівських цехах середньої та великої продуктивності становить 600-1300 т, а тривалість перебування в ньому чавуну 6-8 год. Щоб підтримувати температуру чавуну постійної (1250-1280°С), міксер періодично підігрівають, використовуючи для цього газові

горілки. Міксер спочиває на роликах, нахиляють його за допомогою електродвигуна [9].

Безперебійна подача чавуну до печей забезпечується установкою двох міксерів із боку торців головного корпусу. Для транспортування чавуну в міксерному відділенні є залізничні колії, а для скачування шлаку передбачена спеціальна машина.

Чавун, що надходить у чавуновозних ківшах (ємністю 100 т) з доменного заводу, переливається за допомогою 125-т заливального крана в міксер ємністю 1300 т (рис. 1.2). Після витримки, яка сприяє поліпшенню якості чавуну (усереднення хімічного складу та температури, зниження вмісту сірки), чавун на електровозі зі складом із чотирьох 100 ківшів подають у пічний проліт (рис. 1.1), де його заливають у мартенівські печі.

Стриперне відділення. У стриперному відділенні здійснюють роздягання зливків, що остигають, тобто знімають з них виливниці. Ця операція, що застосовується тільки для зливків окропу, проводиться за допомогою мостового стриперного крана, забезпеченого спеціальними кліщоподібними захопленнями. У стриперному відділенні є чотири залізничні шляхи передачі складів із заповненими сталлю виливницями з розливного прольоту, прийому порожніх складів, складів з виливницями і прибутковими надставками, і навіть складів під виливниці зі зливками зі спокійної стали. Виливниці, що звільняються після роздягання злитків, встановлюють на візки порожніх складів і направляють у відділення їх підготовки до подальшої експлуатації, а склади з роздягненими злитками - в будівлю нагрівальних колодязів.

Зливки зі спокійної сталі в стриперному відділенні не роздягаються, до нагрівальних колодязів їх подають у виливницях. Для отримання таких злитків сталь розливають у глуходонні виливниці, що розширюються догори з установкою на них прибуткових надставок. У стриперному відділенні з виливниць знімають прибуткові надставки, які укладають на спеціальні платформи для їх доставки у двір виливниць. Водночас у стриперному

відділенні перевіряють, чи не приварений злиток до виливниць. У разі приварювання злиток відривають від піддона або нижньої частини виливниці, використовуючи стріперний крап, який забезпечений спеціальним штовхачем. Виштовхує зусилля стріперного крана досягає 400 т.

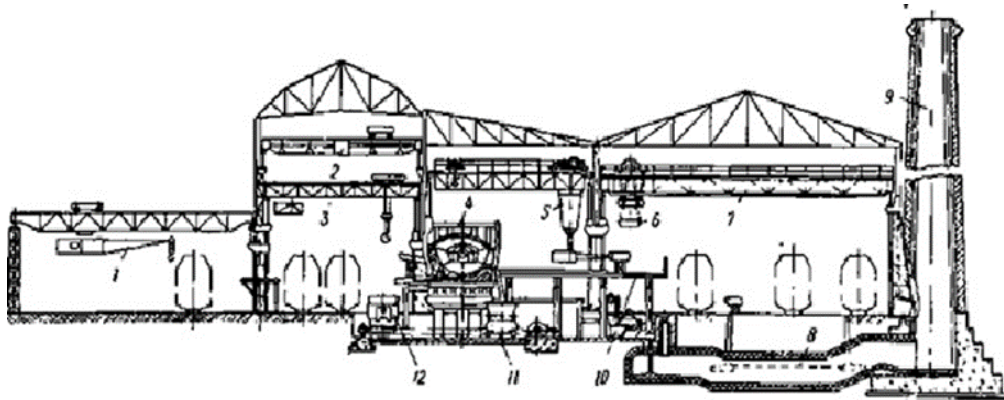
Відділення нагрівальних колодязів. Це відділення розташоване в окремій будівлі і призначене для створення певного температурного режиму нагрівання сталевих злитків, що забезпечує високу їх якість (відсутність внутрішніх напружень та ін). Тут же витягують зливки спокійної сталі з виливниць, які направляють у відділення їх підготовки до експлуатації.

Відділення підготовки виливниць. Це відділення має двір з-ложниць, ділянки їх чищення та мастила. Робота двору виливниць полягає в центруванні виливниць на піддонах, встановленні металічних пробок в глуходонніе виливниці, ремонті й установці прибуткових надставок, заміні виливниць, що вийшли з ладу, продувці виливниць стисненим повітрям. Якщо в цеху є сифонне розливання сталі, то у дворі виливниць розчищають і набирають піддони сифонною цеглою, встановлюють центрові втулки, вставляють сифонні склянки в глуходонні виливниці та ін. Для механізації трудомістких робіт у дворі виливниць - 8 мостових кранів вантажопідйомністю 15-45 т, а для прискорення охолодження виливниць - водяний душ. Ділянки чищення і мастила виливниць розташовані в самостійному будинку. Після очищення механізованим гідравлічним способом з використанням спеціальних форсунок виливниці змащують смолою або лаком, який подається під тиском.

Шлаковий двір призначений для накопичення шлаку, який залізничною колією надходить у шлаковозах з розливного прольоту та міксерного відділення. У міру накопичення шлак періодично вивозять із території підприємства. Для використання в будівельних цілях (виготовлення цементу, шлакової цегли та ін.) шлак гранулюють, перетворюючи його на шлаковий пісок. Для цього шлак у рідкому стані обробляють водою у спеціальних басейнах.

Мартенівські цехи малої продуктивності (рис. 1.3) мають простішу

структуру. Їх характерні специфічні технологічні особливості під час виконання окремих операцій виробничого циклу, менше самостійних відділень (табл. 1.1).



- 1 - кран зі стрілкою для навантаження злитків на вагонетки, 2 - мостовий збиральний кран;
 3 - заливально-розливний кран; 4 - мартенівська піч; 5 - кранова завалочна машина;
 6 - мульда; 7 - мульдомагнітний край; 8 - борів; 9 - димова труба;
 10 - балкон робочого майданчика; 11 - шлаковий ківш; 12 - сталерозливний ківш

Рис 1.3 - Поперечний розріз мартенівського цеху малої продуктивності

Таблиця 1.1 Схеми роботи мартенівських цехів різної продуктивності

Показники	Особливості виробничого процесу та структури цехів	
	великої та середньої продуктивності	малої та середньої продуктивності
Розташування шихтового двору	Окремо від головного корпусу	Поряд з пічним прольотом головного корпусу
Метод подачі мульд із шихтою на робочий майданчик	На спеціальних візках	Мостовий мульдом гнітним краном
Тип завалювальної машини для подачі шихти в піч	Підлогова	Мостового типу
Місце заливання розплавленого чавуну в піч мостовим краном	З боку пічного прольоту	З боку розливного прольоту
Розташування виливниць при розливанні сталі	На візках	У стаціонарній канаві
Проведення операцій роздягання злитків, їх прибирання, підготовки виливниць до експлуатації	У двох окремих самостійних будівлях	У розливному прольоті

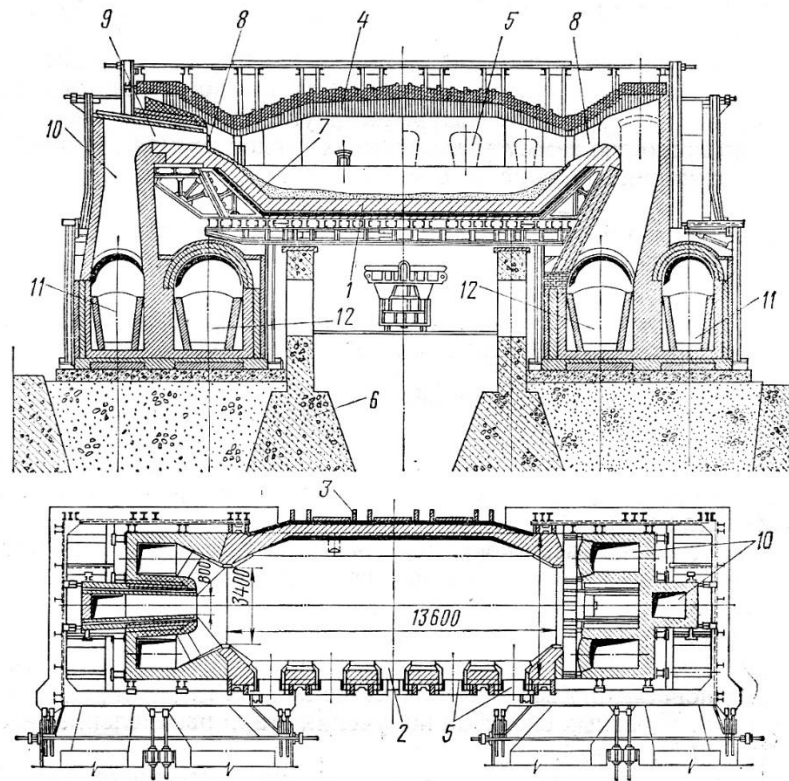
1.2 Конструктивні особливості мартенівських печей

Мартенівська піч (рис. 1.4) має у своєму складі дві основні частини: верхню будову, що включає робочий простір і голівки печі, і нижню будову, що складається зі шлаковиків, лежаків, обладнань, які регулюють, регенераторів і газопроводів.

Процеси горіння палива та сталеваріння відбуваються у робочому просторі мартенівської печі [9]. Основою робочого простору є під печі, зверху робочий простір обмежений головним склепінням, з торців – голівками, а з поздовжніх сторін – передньою та задньою стінками. Під печі разом з поперечними і поздовжніми укосами утворює ванну, призначену для нагромадження розплаву й шлаків.

Передня стінка печі звернена убік робочого майданчика, з якого проводять усі операції, пов'язані із процесом сталеваріння. Для завантаження печі й догляду за нею в передній стінці передбачені завалочні вікна, а в підстави стінки – отвору для спуска шлаків по ходу плавки. Задня стінка печі виконана похилою для більшої стійкості проти розмивання шлаками й кращого утримання заправних матеріалів. У основі задньої стінки в найнижчій подині, що розташована проти середнього вікна, улаштований випускний отвір.

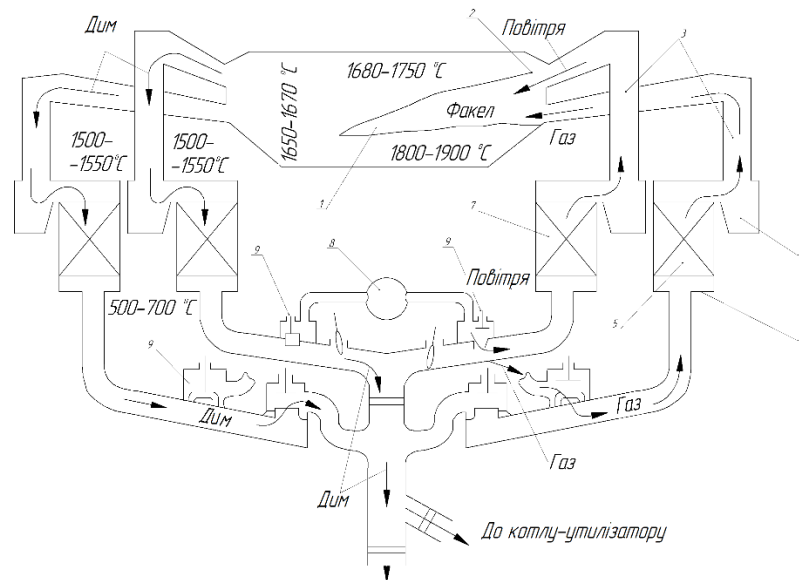
Паливо і повітря надходять із правої сторони печі, а продукти згоряння йдуть у ліву частину печі. Після проходження через насадки, які попередньо нагріваються, та регенераторів, повітря нагрівається до 1000-1200°C і в нагрітому стані через голівку попадає в піч. При згорянні палива утворюється факел з температурою 1800-1900 °C.



- 1 – під печі; 2 – передня стінка; 3 – задня стінка; 4 – склепіння; 5 – завантажувальні вікна;
 6 – бетонні опори; 7 – укіс; 8 – повітряний канал (головки); 9 – газовий канал;
 10 – вертикальні канали; 11 – шлаковики газового регенератора;
 12 – шлаковики повітряного регенератора.

Рисунок 1.3 – Мартенівська піч

На рис.1.4 наведена схема роботи мартенівської печі.



- 1 – робочий простір; 2 – головка; 3 – вертикальні канали; 4 – шлаковик;
 5 – газовий регенератор; 6 – насадка; 7 – повітряний регенератор;
 8 – вентилятор; 9 – перекидні клапани

Рисунок 1.4 – Схема роботи мартенівської печі

1.3 Особливості технологічного процесу отримання сталі в мартенівських печах

Технологічний процес одержання сталі в мартенівських печах включає кілька періодів: заправлення печі, завалку шихти, заливання чавуну, плавлення шихти, доведення плавки, розкислення, легування й випуск сталі з печі [4].

Заправлення. Після випуску печі оглядають і виправляють замічені неполадки. За час плавки ті частини задньої і передньої стінок, а також укосів печі, які стикалися зі шлаками, часто зазнають негативну дію шлаків і тому потребують профілактичного ремонту. За допомогою заправних машин на ці місця накидається заправний матеріал (доломіт або магнезит). Ця операція проводиться в обов'язковому порядку після кожної плавки. Заправку укосів ванни печі починають до випуску металу.

У більшості випадків заправка пов'язана з усуненням застоїв металу і шлаку на поду печі і пагорбів у сталевипускному отворі.

Під час плавки зношуються укоси задньої та передньої стін та інші елементи печі. Зношені елементи відновлюють заправкою обпаленим доломітом. Заправка печі при високій температурі робочого простору сприяє кращому приварюванню заправних матеріалів та зменшенню їх витрати. Швидка та якісна заправка дозволяє скоротити тривалість плавки та покращити стійкість печі. Заправку печі вище за рівень шлаку поєднують з періодом чистого кипіння; при цьому не допускається загушення шлаку заправними матеріалами. Ділянки, що знаходяться нижче рівня шлаку, заправляють у міру оголення стін та укосів під час випуску сталі. Стовпчики передньої стінки підмазують у другій половині періоду плавлення.

У період заправки остидження печі не допускається. Теплове навантаження печі в період заправки в більшості випадків підтримується так само, як і в період доведення — підведення тепла має становити 65-90% від максимального теплового навантаження. Після випуску плавки закладають

сталевипускний отвір, і пекти готова до прийому шихтових матеріалів для нової плавки.

Операція заправлення печі залежно від стану подини, розмірів печі та умов проведення операції триває від 10 до 30 хв [6].

Завалка шихти. Завалка шихти включає прогрів шихти та триває від початку завалки до початку зливу чавуну. Чушковий чавун, сталевий скрап, вапняк і руду завантажують порціями, пошарово з прогріванням кожного шару протягом 5-7 хв. На подіну найчастіше завалюють дрібний чистий лом або залізну руду, а потім вапняк, сталевий лом і чавун. Завалка твердої шихти виробляється завалочними машинами. Під час завалки в печі спалюють найбільше палива, щоб добре погріти і швидше розплавити шихтові матеріали. Слід мати на увазі, що в період завалки в робочий простір печі завантажують холодні шихтові матеріали і в піч потрапляє велика кількість холодного повітря через робочі вікна, що часто відкриваються в період завалки. Тому необхідно в піч подавати максимальну кількість тепла. Успішно проведена завалка і хороший прогрів шихти (у цей час теплове навантаження становить 85-93% від максимального) забезпечують нормальний перебіг плавки.

Порядок завалки сипучих матеріалів та режим їх прогріву, а також швидкість завалки брухту значною мірою визначають тривалість і характер перебігу наступних періодів плавки та в першу чергу періоду плавлення.

Тривалість прогріву шихти має бути такою, щоб не викликати "закозлення" або місцевого розплавлення шихти. Вона має забезпечити швидку заливку в піч чавуну. Недогрівання або перегрівання шихти може призвести до викиду на робочий майданчик металу та шлаку. При недогріві шихти викиди металу і шлаку через робочі вікна спостерігаються через 1,5-2 години після закінчення зливу чавуну, а при перегріванні через 10-15 хв після закінчення зливу чавуну або під час зливу [5].

Усі матеріали, що подаються в завалку, мають бути зважені. Одночасно з прибуттям шихти на печі сталеварам вручають накладні із зазначенням маси та сорту шихти для перевірки відповідності із заданою шихтівкою.

Подача металошихти та сипких матеріалів проводиться стандартними складами. Для печі ємністю 500 т завалку проводять трьома складами. При продувці ванни киснем завалка шихти проводиться в наступному порядку: на подину завалюється легковагий лом, потім вапняк, пакети, скрап і «козли», обрізь слябів і бій злитків. Шихта завалюється рівномірно по ванні.

Завалку всіх шихтових матеріалів необхідно проводити як можливо швидше при максимальному тепловому навантаженні без зниження температури зводу печі нижче 1500 °С.

Для забезпечення швидкого заливання чавуну з наступним енергійним протіканням реакцій у ванні й спуском шлаків необхідний обов'язковий прогрів шихти без закозлення й місцевого її розплавлювання. Прогрів вважається закінченим при невеликому осіданні шихти, легкому оплавленні крайок і зникненні плям на поверхню лома.

Тривалість завалки та прогріву сипких шихтових матеріалів залежить від садіння печі та становить від 1 год до 1 год 30 хв. Скорочення тривалості завалки проти прийнятих раніше норм при необхідному розташуванні шихтових матеріалів печі призводить до зменшення сумарної тривалості періодів прогріву і плавлення, що зменшує тривалість плавки.

Заливання чавуну. Заливка чавуну триває від кінця завалки твердої шихти до кінця заливання заданої порції чавуну. Чавун заливають на прогріту часту тверду завалку шихти, що плавиться. При заливці чавуну в піч відбувається бурхливе окислення вуглецю чавуну, внаслідок чого з ванни виділяється велика кількість окису вуглецю, що згорає над поверхнею ванни з виділенням значної кількості тепла, що сприяє плавленню металеві шихти, полегшує прогрів і плавлення залізної руди вапняку. Тому в період плавки надходження палива скорочують до 55-65% від максимального теплового навантаження. Чавун необхідно заливати не більше ніж за 15 хв на 185 і менших печах і за 25 хв на 370 печах [8]. На печах ємністю 400 т і більше рекомендується заливати чавун двома ковшами. Після закінчення заливання чавуну в піч, коли відбувається інтенсивне шлакоутворення, теплові

навантаження повинні становити 65-80% від максимального. Це зумовлено тим, що при шлакоутворенні тепло значною мірою відбивається на склепіння і стіни печі, оскільки шлак внаслідок поганої його теплопровідності різко погіршує передачу тепла від факела до металу. Для забезпечення сприятливих умов плавки необхідно дотримуватися таких умов [4]:

1. У міксери слід заливати чавун, що відповідає вимогам внутрішньозаводських технічних умов. Періодично з міксера вибирають проби чавуну для хімічного аналізу.

2. У міксерному шлаку міститься багато сірки. Для запобігання попадання міксерного шлаку при зливі чавуну в ківші, а потім в печі шлак з міксера необхідно завантажувати в кожній зміні.

3. У міксерах має бути запас чавуну в кількості не менше 50% його ємності, для чого встановлюють обмежувачі зливу чавуну, які знімають лише в особливих випадках.

Плавлення шихти. Плавання шихти є тривалим періодом плавки, який починається після зливу чавуну в піч і завершується процесом розплавлення шихти. Продовжуючись 3 год - 3 год 20 хв, він значною мірою визначає продуктивність печі. Тривалість плавлення тим менша, чим більша кількість тепла вводиться в піч, чим вищий вміст вуглецю в шихті. Тривалість залежить також від способу розташування шихтових матеріалів печі. У період плавлення в піч слід вводити найбільшу можливу кількість тепла, яка може бути сприйнята шихтою і яка не призведе до оплавлення склепіння. Зазвичай у першій половині плавлення в піч вводять таку ж кількість тепла, як і при завалці шихти, а потім до кінця плавлення теплове навантаження знижують до мінімально допустимого (40-50% від максимального теплового навантаження), так як основна частина шихти розплавлена і потреба в теплі зменшилася.

Під час плавлення шихти має бути видалено максимальну кількість шлаку, що необхідно для успішної десульфурзації, дефосфорації та скорочення періоду плавлення. Спуск шлаку доцільно починати через 20-30 хв і

закінчувати через 1 год 20 хв після заливання чавуну.

До моменту розплавлення повинен сформуватися активний шлак з такою основністю, щоб витрати вапна для доведення становили 1,5%.

Перевищення вмісту вуглецю після розплавлення ванни над середньозаданим вмістом їх у готової сталі має бути щонайменше 0,5%. Для печей ємністю 185—250 т допускається перевищення не менше 0,4%, а печей ємністю 370 т і більше — щонайменше 0,3%. Різниця між нижньою та верхньою межами вмісту вуглецю після розплавлення ванни повинна бути не менше 0,3% [5].

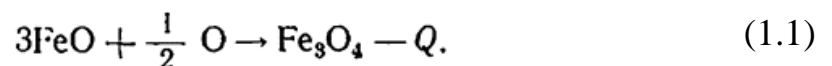
Слід мати на увазі, що під час завалки і плавлення звичайна вигоряє (стосовно початкового вмісту в шихті) 25-40% вуглецю, 80-90% кремнію, 50-60% марганцю, 40-50% хрому і 2-3% заліза. Крім того, в ці періоди видаляється з металу 30-40% фосфору і кілька сірки [4]. До утворення шлаку шматки шихти окислюються киснем, що у складі газів робочого простору печі. Дуже важливо запобігти утворюваній рідкій сталі від поглинання водню і азоту з атмосфери печі.

Тому слід вживати заходів до того, щоб поверхня ванни якомога раніше була покрита шаром шлаку. Шлак у процесі плавлення шихти утворюється з оксидів елементів шихти (заліза, кремнію, марганцю, хрому), шлакоутворюючих матеріалів, а також іржі, окалини, що знаходяться на поверхні шматків шихтових матеріалів. Крім того, в шлак переходить частина заправного матеріалу з футерування стін і склепіння печі. Процес утворення основного шлаку відбувається легше, якщо в шлаку є достатня кількість оксидів заліза, що проникають у шматки завантаженого вапна і прискорюють їх розчинення в шлаку в результаті утворення легкоплавких феритів кальцію.

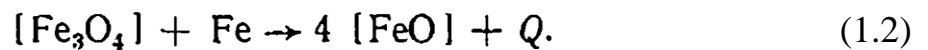
Для прискорення плавки рекомендується в завалку давати приблизно 5% вапняку (замість звичайних 6-7%) від маси металу і видаляти за 0,75-1 год до повного розплавлення шихти більшу частину кремнеземистого шлаку, що утворився. Після цього треба навести новий основний шлак присадками вапна,

прожареного бокситу і окалини (або залізняку), в якому буде не менше 12% оксидів заліза і основність якого буде близько 2,5 [8]. Подібний шлак, крім інших переваг, також сприятиме окисленню фосфору, що знаходиться в металі, переходу окису фосфору в шлак і зв'язування її в міцне з'єднання з окисом кальцію.

У процесі плавлення металеві шихти відбувається окислення заліза з утворенням оксидів FeO, Fe₃O₄ і Fe₂O₃. Закис заліза в шлаку окислюється киснем пічних газів до магнітного окису заліза за реакцією

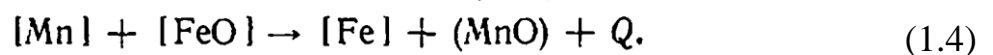
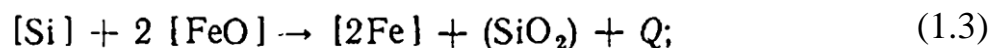


Магнітний окис заліза, в результаті дифузії та перемішування при кипінні, розподіляється по всій товщині шлаку, досягає металу, де окислює залізо за реакцією:



Вміст оксидів заліза по ходу плавки при скрап-рудному процесі змінюється: на початку плавки в шлаку міститься багато оксидів заліза, під час кипіння їх вміст у шлаку зменшується, а до кінця плавки зростає [5].

У процесі плавлення шихти відбувається окислення кремнію та марганцю за реакціями.



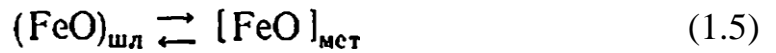
До моменту повного розплавлення шихти кремній окислюється майже повністю, а марганець залишається у металі у кількості 0,10 - 0,25% [4].

Окислення вуглецю. Окислення вуглецю в непрогрітій ванні викликає спінювання густого в'язкого шлаку окисом вуглецю. Це використовується видалення самопливом первинного шлаку через шлаковий отвір у задній стінці печі чи поріг завалочного вікна. При цьому з печі видаляється фосфор і кремній, що сприяє зменшенню витрати вапна для шлакування окисленого фосфору і кремнезему, зменшує товщину шлакового покриву, тому покращується прогрів металу. До кінця плавлення шихти досить прогрітий вапняк, що перетворився на вапно, спливає і розчиняється в шлаку, що

призводить до збільшення основи шлаку і зменшення вмісту оксидів заліза.

Після розплавлення всієї шихти починається кипіння ванни металу, обумовлене окисненням вуглецю, цей процес ділиться на три стадії:

1) перехід закису заліза із шлаку в метал



2) окислення вуглецю в рідкому металі та утворення бульбашок окису вуглецю



3) виділення бульбашок окису вуглецю через шар металу та шлаку в атмосферу печі.

Окиси вуглецю, що утворюються при окисненні вуглецю, перемішують металеву ванну і посилюють контакт між металом і шлаком. Перемішування сприяє кращому поглинанню тепла ванною, швидше нагрівання металу, виділенню з нього розчинених газів і неметалевих включень.

Наприкінці плавлення (коли ванна «сіла»), за 20-30 хвилин до повного розплавлення, відбирається попередня проба металу для визначення вмісту вуглецю й сірки. Якщо проба показує, що вміст вуглецю по розплавленню буде нижче встановленої межі для даної марки сталі, то допускається доливання рідкого чавуну в кількості, що не викликає перевантаження печі й сталерозливних ківшів (не більш 5% від ваги садки) [5].

Товщина шару шлаку, що залишився в печі до моменту розплавлення, перебуває в межах 60-100 мм. Після повного розплавлення ванни відбираються проби металу й шлаків. У пробі металу визначається вміст вуглецю, марганцю, сірки, фосфору й, при необхідності, нікелю, хрому й міді; у пробах шлаків – закис заліза та основність.

Доведення плавки. Доведення плавки триває від моменту повного розплавлення шихти до розкислення сталі і ставить завдання доведення сталі до необхідного вмісту вуглецю. Характерним технологічним прийомом цього періоду є полірування плавки, а специфічним процесом - кипіння ванни.

Полірування або рудне кипіння здійснюють у період від взяття першої проби розплаву (після повного розплавлення шихти) до чистого кипіння ванни металу. Для цього в піч завантажують відповідні порції залізняку, необхідної для окислення домішок. З урахуванням необхідності встановлення швидкості вигорання вуглецю та інших домішок проби металу та шлаку під час полірування відбирають приблизно через кожні 20 хв.

В основній мартенівській печі розрізняють два види кипіння ванни - рудне та чисте. Рудне кипіння відбувається на межі шлак-метал, тому її часто називають верхнім кипінням. Період рудного кипіння починається після розплавлення шихти і присадки першої порції залізняку і триває до закипання ванни рівним безпіністим міхуром не менше ніж на дві третини її поверхні. До моменту присадки руди метал має бути досить нагрітий.

У період рудного кипіння повинен бути наведений шлак необхідного складу та повністю закінчена дефосфорація та в основному десульфурація при енергійному окисленні вуглецю. Швидкість вигорання вуглецю повинна бути 0,35-0,45% / год для печей ємністю до 100 т, 0,25-0,35% / год для 200 печей і 0,17-0,22% / год для 400 печей. Верхня межа - для печей з магnezітохромітовим склепінням [8].

Рудне кипіння характерне зародженням величезної кількості дрібних поверхневих бульбашок окису вуглецю, що спричиняє утворення стійкої шлакової піни. Утворення на поверхні ванни пінистого шлаку з низьким коефіцієнтом теплопровідності супроводжується підвищенням рівня шлаку в печі, коли теплопередача через шар такого шлаку до металу значно зменшується. При кипінні ванни під пінистим шлаком бульбашки окису вуглецю перемішують шлак, не впливаючи на перемішування металеві ванни, що і обумовлює виникнення значних температурних і концентраційних перепадів по глибині металеві ванни.

Чисте кипіння відбувається всередині ванни на межі металу-подина, тому його часто називають донним. Цей період характерний енергійним кипінням ванни на дві третини її поверхні під сформованим шлаком, під час

якого бульбашки окису вуглецю при своєму підйомі перемішують метал і шлак, в результаті чого температурні і концентраційні перепади стають незначними. Ознакою нормального перебігу процесу чистого кипіння служить відновлення марганцю зі шлаку при вмісті вуглецю у ванні більше 0,2%. Мінімальна тривалість періоду чистого кипіння встановлюється для кожної марки сталі технічними інструкціями і зазвичай коливається в межах від 30 хв до 1 год 30 хв для печей ємністю до 220 т. на 10 хв. У період чистого кипіння, але не пізніше ніж за 20-30 хв до початку розкислення дозволяється розріджувати шлак бокситом [6].

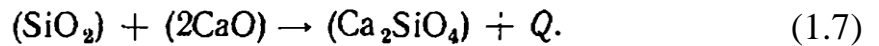
Період кипіння ванни має важливе значення для отримання сталі високої якості, тому що при правильному його проведенні може бути значно знижено вміст сталі водню і азоту, а також зменшено кількість неметалічних включень, що знаходяться в ній. Бульбашки окису вуглецю, що піднімаються у ванні знизу вгору, представляють для інших газів сильно розріджений простір (вакуум), що забезпечує винесення з металу водню та азоту. Неметалічні включення при зіткненні з поверхнею бульбашок газу піддаються дії сил поверхневого натягу і утримуються цими силами під час підняття бульбашок газу в шлак.

Щоб здійснити необхідне кипіння ванни, вміст вуглецю в ній після розплавлення має бути на 0,4-0,7% більше верхньої межі вмісту вуглецю в готовій сталі. При цьому 0,25-0,5% вуглецю окислюється під час рудного кипіння і 0,15-0,2% - під час чистого кипіння [6]. Під час кипіння необхідно мати високі температури металу, що досягається підведенням 65-90% тепла від макс Розкислення стали проводять після того, як сталь доведена до необхідного вмісту вуглецю. Воно проводиться для звільнення сталі від кисню.

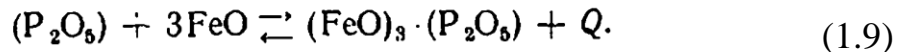
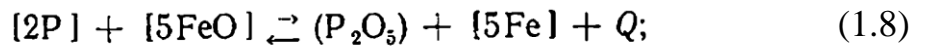
У результаті скачування шлаків з ванни видаляється фосфор, по ходу полірування внаслідок посадок вапна поступово формується високоосновний шлак й підвищується температура ванни. Це створює сприятливі умови для видалення сірки.

Також для поліпшення умов видалення сірки й фосфору з металу в період доведення необхідно спустити шлаків у кількості не менш $\frac{1}{4}$ часті.

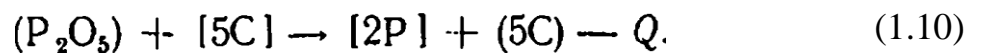
Кремнезем, що виходить при цьому, вступає в реакцію з окисом кальцію і утворює в шлаку основної мартенівської печі кальцієвий силікат Ca_2SiO_4 :



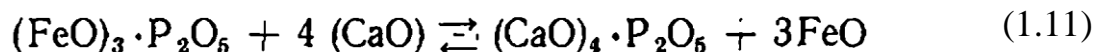
Окислення фосфору відбувається за реакціями



Обидві реакції протікають з виділенням тепла і відповідно до принципу Ле-Шатальє найбільш повно розвиваються в менш нагрітій ванні, тобто в період плавлення та на початку доведення плавки. Фосфат заліза $(\text{FeO})_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$, що утворюється в шлаку, є неміцним з'єднанням - при підвищенні температури фосфор може відновлюватися і переходити назад в метал по реакції



Щоб перешкодити перебігу цієї реакції, тобто зв'язати фосфор і перевести його в шлак, необхідно мати в ньому надлишок вапна. При надлишку вапна фосфат заліза перетворюється на фосфат кальцію по реакції

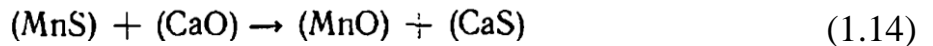
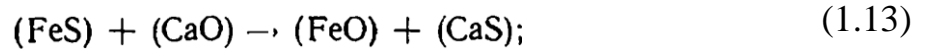


Оскільки ця реакція оборотна, для запобігання відновленню фосфору з шлаку в метал і досягнення мінімального вмісту фосфору в готовій сталі необхідно підтримувати високу плинність і основність шлаку, тобто мати в ньому надлишок окису кальцію над окисом кремнію, видаляти значну частину первинного шлаку з високим вмістом P_2O_5 і наводити новий, домагаючись зниження P_2O_5 в шлаку до 0,3-0,5%. Процес дефосфорації вважається закінченим при вмісті в пробі металу (після скачування шлаку) 0,01-0,02% P [8].

Окислення сірки. При високій основності шлаку відбувається часткове видалення сірки до залишкового вмісту 0,05-0,02%, яка переходить з металу в шлак у вигляді сульфідів марганцю та заліза за рівняннями



Ці реакції оборотні, тому сульфіди потрібно зв'язувати вапном шлаку:



В результаті цих реакцій утворюється сірчистий кальцій, який не розчиняється в металі і переходить у шлак.

Після завершення окислювальних процесів, коли знижується вміст вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору та сірки, повністю або частково видаляють шлак, наводять новий, сталь розкислюють і, якщо потрібно, легують. Потім, якщо хімічний склад і температура сталі знаходяться відповідно до технічних вимог, метал випускають із печі.

Розкислення. Кипіння ванни припиняється в момент введення в неї розкислювачів і легуючих добавок. Порядок їх уведення й тривалість витримки металу в печі оговорюються спеціальною інструкцією.

Випуск сталі. До заливання чавуну на піч встановлюється жолоб для випуску сталі. Також за 30 хвилин до початку випуску під жолоб встановлюються ківші. Випускний отвір до моменту випуску плавки ретельно обробляють і очищають від заправних матеріалів.

Розкислення спокійної сталі проводять два прийоми: спочатку ведуть попереднє розкислення ванни, а потім остаточне розкислення в ківші. При попередньому розкисленні знижується забрудненість сталі неметалевими включеннями, що спливають і переходять у шлак. Спочатку у ванну вводять найбільш слабкий розкислювач - феромарганець, а потім, через 5-10 хв, - нагрітий до червоного гартування 10-12%-ний феросиліцій у кількості 10-18 кг на 1 т сталі з розрахунку на введення у ванну 0,08-0,12%. Враховуючи можливість відновлення марганцю зі шлаку, через 8-12 хв часто вводять додаткову порцію феромарганця, після чого плавку випускають в ківш для остаточного розкислення [5]. Для попереднього розкислення рекомендується використовувати комплексні розкислювачі: силікомарганець, силікошпигель, сплав АМС та ін. Можна проводити розкислення і одним 12-18%-ним феросиліцієм, підсаджуючи феромарганець в струмінь металу при випуску

плавки в ківш. Цей метод дозволяє скоротити витрати марганцю внаслідок меншого чаду.

Остаточне розкислення починають після наповнення ковша сталлю на 0,3-0,5 його висоти: на жолоб - в струмінь сталі з бункера рівномірно зсипають шматками розміром не більше 50 мм розжарений 45 - або 75% феросиліцій, що становить 30-40% загальної кількості розкислювача . Слідом за феросиліцієм в ківш присаджують шматковий алюміній ~ 0,5 кг. При виплавці деяких конструкційних сталей вводять феротитан, який додатково дегазує сталь і надає їй спеціальні властивості [6].

Киплячу сталь розкислюють феромарганцем у печі або ківші. Розкислення печі ведуть протягом 5—10 хв. Кількість феромарганцю, що вводиться, встановлюють з урахуванням температури і ступеня окисленості металевої ванни, вмісту марганцю перед розкисленням та інших факторів. Розкислення в ківші ведуть при високій температурі розплавленої сталі та вміст у ній не менше 0,2% Mn. Розкислення має передувати чисте, інтенсивне кипіння протягом 30-50 хв. Кількість феромарганця, що присаджується в ківш, для малих печей не повинно перевищувати 3 кг на 1 т сталі, а для печей ємністю 200 т і більше має становити 3-6 кг на 1 т [8].

Феромарганець у ківш слід сідати невеликими порціями у міру наповнення ковша сталлю починаючи з моменту наповнення кіша на 1/4 висоти і закінчуючи до появи шлаку на жолобі. Вміст кремнію у феромарганці не повинен перевищувати 1,5%, оскільки підвищений вміст призводить до більш повного розкислення сталі і надмірного зниження вмісту FeO. При цьому сталь виходить густою, у виливниці кипить слабо, а підкоркові бульбашки, що утворюються, розташовуються близько до поверхні зливка.

При проведенні процесів розкислення слід мати на увазі, що після випуску плавки в ківш, під час витримки та наступного розливання відбуваються реакції взаємодії між металом та шлаком, а це призводить до зміни їх хімічного складу.

Щоб послабити зміну хімічного складу металу в процесі розливання,

необхідно всі розкислювачі та легуючі елементи вводити рівномірно в міру наповнення ківша металом і закінчувати цей процес за 1-2 хв до появи шлаку. При цьому кількість пічного шлаку в ковші не повинна перевищувати 2-3% від маси металу. Для зменшення реакційної здатності пічного шлаку необхідно на дзеркало металу в ківші присаджувати вапно в суміші з пилом доломітовим.

Легування. Легування проводять для отримання сталей із спеціальними властивостями. При розрахунку маси легуючих присадок, що вводяться по ходу плавки, необхідно знати масу оброблюваної сталі до моменту введення легуючих присадок, вміст даного елемента у ванні до введення відповідних присадок, передбачуваний вміст елемента в готовій сталі, можливість відновлення даного елемента, необхідний вміст елемента в готовій сталі.

Випуск сталі. Випуск сталі з печі здійснюють після операцій розкислення та легування. Сталь перед випуском з печі нагрівають з таким розрахунком, щоб понад потрібну температуру розливу був запас на охолодження її при випуску в ківш (в середньому 40-60 ° C) і на подальше охолодження в процесі розливання (2-4 град / хв). Забезпечення високих температур досягається підведенням 65-90% тепла від максимального теплового навантаження. Розкислена ванна перед випуском не повинна закипати. Якщо помічено кипіння, необхідно повторно присаджувати доменний феросиліцій з розрахунку 10— 12 кг на 1 т сталі [6].

Зазвичай при випуску сталі в ківш в її струмінь дається алюміній (0,5-1,5 кг/т) для додаткового розкислення і запобігання її окислення в процесі розливу по виливницях та мінімального теплового навантаження.

1.4 Продукція та відходи мартенівського виробництва

У мартенівському цеху випускаються різні види сталі:

- а) вуглецеві киплячі сталі;
- б) вуглецеві напівспокійні сталі;
- в) вуглецеві нестаріючі сталі з «киплячою» скоринкою;

г) вуглецеві спокійні сталі;

д) низьколеговані сталі:

При заливанні чавуну в міксери утворюється так званий графітовий пил. Він уловлюється й може бути утилізований.

У ході плавки утворюється велика кількість шлаків. Їх важко використовувати, тому що вони мають непостійний хімічний склад через різні добавки. Приблизний склад мартенівського шлаку наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Хімічний склад мартенівського шлаку [8]

Елементи	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	S
Вміст, %	19,18	3,66	36,72	11,92	8,12	13,36	4,25	4,25	0,31	0,17	0,57

2 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ ВІД ВИКИДІВ МАРТЕНІВСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

2.1 Визначення характеристик пилогазових викидів мартенівських печей

Технологічні гази мартенівських печей мають на виході температуру 1100-1400°C і містять в собі більше 50% загальної кількості тепла мартенівського процесу. Таким чином, вирішення задачі утилізації цього тепла дозволить значно знизити енергоємність виробництва.

На першому етапі вирішення цієї задачі здійснюється за рахунок регенераторів для підігріву повітря, що подається до печі. Далі гази з температурою 800°C поступають у боров, де за рахунок підсосу атмосферного повітря допалюється CO, та частково охолоджуються до 650-750°C.

Таким чином, перед очищенням температура газів, що відходять, близько 700 °C. Утилізація цього тепла дозволяє підвищити показники роботи печі, для цього за мартенівськими печами встановлюють котли-утилізатори, де гази остигають до 220-250 °C, віддаючи своє тепло у вигляді пари (350...450 кг на 1 т сталі) [16].

Тепло відхідних газів від сталі та шлаків також являє собою джерело вторинної енергії. При обладнанні печі системою випарного охолодження також можливе використання теплоти охолоджувача елементів конструкції мартенівської печі [9]. Як правило, мартенівська піч має у своєму складі систему випарного охолодження, що містить 25 елементів печі, а саме: кесони газових прольотів, п'ятові балки головного склепіння печі, стовпчики передніх стінок, рами завалочних вікон та інше.

На систему випарного охолодження припадає близько 85% теплоти, яка відводиться через системи охолодження печі [9].

При виплавці сталі в мартенівській печі димові газу утворюються в результаті згорання палива, нагрівання й розкладання сипучих матеріалів і окиснення вуглецю шихти.

За результатами промислових досліджень, на сучасних мартенівських печах кількість продуктів згорання перед газоочищенням через підсмоктування по газовому тракту виявляється в 1,5-2,0 рази більше кількості газів, що утворюються в печі, тобто близько 140-200 тис. м³/год [10].

Відхідні газу рухаються в робочому просторі печі зі швидкістю, 1,5-2,0 м/с, і при температурі близько 1750 °С [12].

Середній хімічний склад відхідних продуктів згорання печей, які працюють на збагаченому кисневому дутті наведено у табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Середній хімічний склад відхідних продуктів згорання печей, які працюють на збагаченому кисневому дутті

Елемент	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
Вміст, %	10,5...15,1	16...16,5	62,3...66,1	6,5...7,1

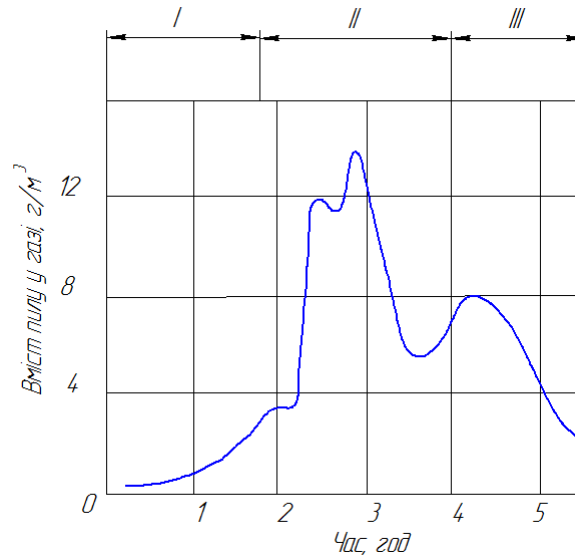
При роботі мартенівської печі на природному газу в димових газу може міститися до 110 мг/м³ окислів сірки [2,6,10]. У газу утримується також 200...400 мг/м³ оксидів азоту.

Газу, що відходять від мартенівських печей містять значну кількість пилу, виділення якої по періодах плавки – прогрів шихти, розплавлювання й доведення – нерівномірно (рис. 2.2.).

Фізико-хімічний склад пилу. % : 5,65 FeO, 84,63 Fe₂O₃, 0,7 Al₂O₃, 5,0 CaO, 1,45 MgO, 1,14 SiO₂, 2,65 S, 1,0 MnO, 0,78 C.

В пилі мартенівського виробництва також міститься 0,09-1,19% свинцю та 0,36-4% цинку, при цьому основна маса цинку представлена феритом (ZnO₂·Fe₂O₃), а свинцю – церусситом (PbCO₃) [2,6,10].

Фізико-хімічна характеристика пилу у викидах мартенівського виробництва наведена у табл. 2.3.



I - прогрів (без кисню); II - плавлення (продувка киснем); III - доведення (без кисню).

Рисунок 2.1 - Зміна вмісту пилу в газах мартенівської печі [13].

Дисперсний склад пилу в період плавлення наведено в табл. 2.4.

Щільність мартенівського пилу 4,5-5 г/м³, насипна щільність 1,5 г/м³ [2,6,10].

Таблиця 2.4 - Дисперсний склад пилу в період плавлення

Розмір часток, мкм	<0,07	0,07-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	>1
Масова частка, %	3,2-5,7	2,8-3,5	12,8-16	16-18	15-16	14-18	10-11	7-8	11-12

Запиленість газів, що надходять на очищення, залежить від операції виконуваної на міксері. При заливанні чавуну концентрація пилу становить 0,370-1,029 г/нм³, при зливі її вміст збільшується до 1,095-1,187 г/нм³ [2,6,10].

Таблиця 2.3 - Фізико-хімічна характеристика пилу у викидах мартенівського виробництва.

Вид агрегату, плавки, ділянка димового тракту	Питома витрата кисню, м ³ /(т·год)	Хімічний склад пилу, %											
		Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe _{мет}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SO ₄	інші
Мартенівські печі після котла-утилізатора:													
Завалка	-	61,00	1,85	83,90	0,35	1,20	1,00	2,35	1,85	0,75	0,27	5,50	PbCO ₃ 0,09- 1,19
Прогрів	-	62,50	0,90	87,40	0,40	1,35	1,20	1,20	0,90	0,90	0,28	5,10	
Плавлення	10	64,63	1,46	90,19	0,38	0,78	1,08	1,04	0,92	1,01	0,18	3,20	
Доведення	-	62,80	0,60	88,45	0,50	1,10	1,25	1,30	0,95	0,98	0,25	4,0	
Двованні печі перед газоочищенням при продувці ванни киснем													
	-	62,1	3,42	84,9	-	3,82	-	3,07	1,09	0,87	0,68	SO ₃ 1,46	

Збільшення концентрації пилу під час зливу металу пояснюється тим, що в початковий момент відбувається інтенсивне дроблення струменя рідкого металу в ковші й утворення великої кількості дрібних крапель. При цьому збільшується площа активної поверхні взаємодії рідкого металу з киснем повітря й інтенсифікується процес пилоутворення.

Температура газів при заливанні чавуну в міксер 30-40 °С, при зливі чавуну з міксера-50-120 °С.

Склад газу, %: CO₂ – 14; CO – 0,2; N₂ – 65,8; O₂ - 18; H₂, O₂ – 2; SO₂ – 80 мг/м³; NO_x–70 мг/м³ [13].

Хімічний склад графітового пилу, %:

SiO₂ – 3,8; Al₂O₃ – 1,66; Fe₂O₃ – 20,55; CaO – 1,92; MgO – 0,87;

FeO–18,9; C – 52,3

Таблиця 2.5 - Дисперсний склад пилу від міксера

Розмір фракції, мкм	Вміст, % по масі
< 0,5	2
0,5-1	7
1-2	16
2-5	37
5-10	22
10-20	12
20-40	3,4
> 40	0,6

Фізичні параметри пилу наведені в табл.2.6.

Таблиця 2.6 - Фізичні параметри пилу

№	Параметр	Значення
1.	Дійсна щільність, г/см ³ Середня проба	2,84
2.	Об'ємна щільність, г/см ³ Без струшування З струшуванням	0,6 0,8
3.	Кут природного укусу, град.	38
4.	Медіанний розмір часток, мкм. Вхід Вихід Середній медіанний діаметр, мкм	3,75 1,0 2,4

2.2 Аналіз технологій очистки газів мартенівських печей

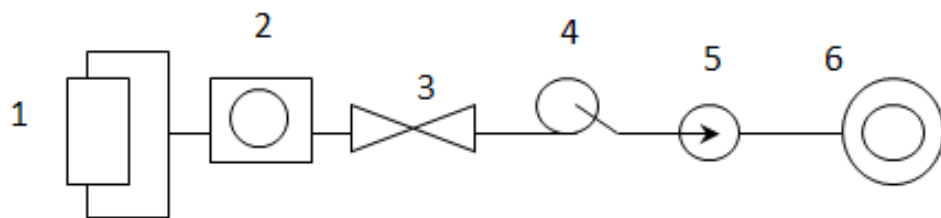
Практично за усіма великими мартенівськими печами встановлені котли-утилізатори, в яких за рахунок вироблення водяної пари температура газів, що відходять, знижується з 650 – 750°C до 213 – 250°C. Котли-утилізатори мартенівських печей типізуються і виготовляються в серійному порядку котлобудівельними заводами.

Гази в шлаковику охолоджуються з 1400 – 1500 °С до 900 – 1000 °С. В регенераторах їх температура знижується до 800-900°C. Потім в боріві гази охолоджуються до 750-800°C при допаленні СО та розбавленні повітрям, що подається вентилятором через спеціальне сопло діаметром 700 мм, встановлене на вході в борів. Охолоджені гази прямують в котел-утилізатор марки КУ, після чого з температурою 210–250 °С поступають на газоочищення [16].

Переважає більшість систем очистки технологічних газів мартенівського виробництва від пилу використовує три варіанти газоочистного обладнання:

1. Очистку газів в електрофільтрах;
2. Очистку газів у тканинних фільтрах;
3. Очистку газів у скруберах Вентурі.

Принципові технологічні схеми очистки представлені на рис. 2.2-2.4.



1 - мартенівська піч; 2 - котел-утилізатор; 3 - труба Вентурі;
4 - краплевловювач; 5 - вентилятор; 6 – димова труба

Рисунок 2.2 - Схема очистки мартенівського газу з використанням скрубера Вентурі

Використання «мокрих» систем очищення дозволяє досягти високої ефективності при очищенні газів від дрібнодисперсного пилу і деяких газоподібних компонентів. Скрубери Вентурі знайшли широке застосування завдяки малим габаритам, простоті виготовлення, монтажу і обслуговування. Даний скруббер включає власне трубу Вентурі і прямоочний циклон - краплевловлювач.

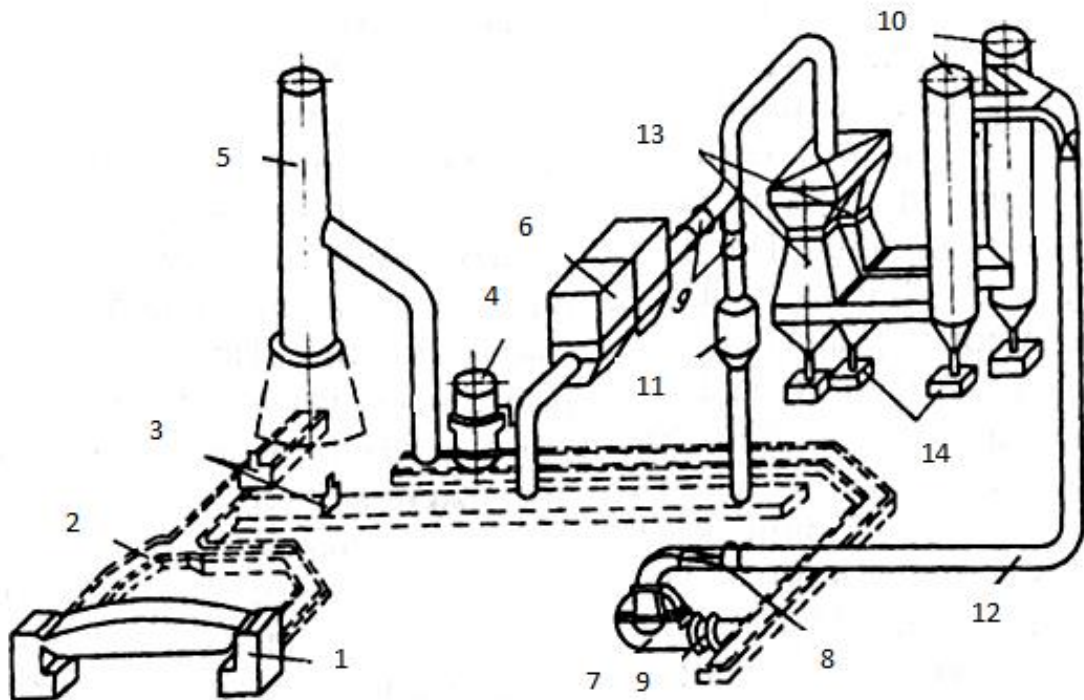
Оскільки мартенівські гази мають великий об'єм, то для очищення такої кількості газів застосовують групове компонування з декількох труб Вентурі - по декілька труб в два ряди.

Система газоочищення представлена десятьма паралельно працюючими трубами Вентурі круглого перетину. Пиловловлююча апаратура виготовлена з корозійностійкої сталі X18H10T, яка стійка до дії високої температури і агресивного середовища. Після труб Вентурі гази поступають в циклоні-краплевловлювачі діаметром 3100 мм для виділення з них краплинної вологи і потім димотягами ВМ-100/1200 і ВМ – 20А виводяться в димар. Для захисту краплевловлювачей від корозійно-ерозійного зносу передбачена футерівка діабазовою плитою.

Шлам через затвори зливається в лоток, звідки самопливом поступає в шламову насосну. Стічні води краплевловлювачей поступають по загальному шламовому лотку на оборотний цикл газоочищення мартенівських печей.

Також окрім труб Вентурі з круглим перетином застосовуються труби з прямокутним перетином горловини, яка дає можливість здійснювати оптимальний режим роботи системи очищення газу протягом плавки шляхом регулювання перетину горловини (рис. 2.3).

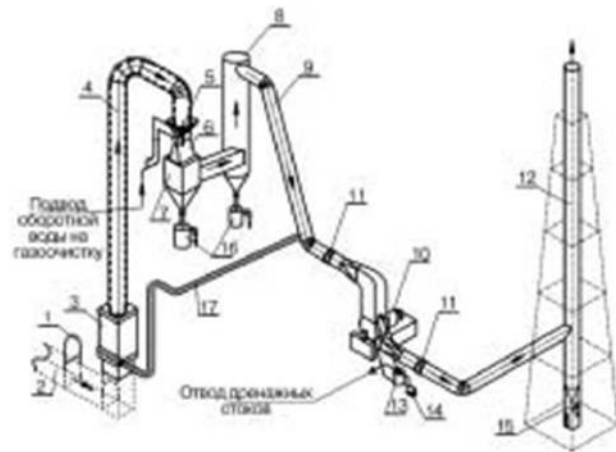
При швидкостях газу в горловині труб Вентурі в межах 100–120 м/с і витраті води на кожену батарею труб Вентурі 120–150 м³/год і перепаді тиску в трубах Вентурі 8830–9810 Па мокра система забезпечує високу ступінь очищення газу від пилу - 98,5% [12]. У разі виходу з ладу котла-утилізатора гази, що відходять, з температурою 700 – 800 і навіть 900 °С прямують прямо на газоочищення в труби Вентурі.



- 1 – мартенівська піч; 2 – борова; 3 – шибер обвідний газохід;
 4 - пристрій для підігріву газу; 5 - димар; 6 – котел-утилізатор; 7 – димотяг;
 8 – направляючий апарат димотягів; 9 - дросель - клапан; 10 – відцентровий скруббер;
 11 – зрошувальна камера; 12 – газопровід очищеного газу; 13 – блок труб Вентурі;
 14 - гідрозатвор

Рисунок 2.3 - Схема відводу та очищення мартенівських газів в скруберах Вентурі

Для мартенівських сталеплавильних агрегатів розроблені вдосконалені системи мокрого очищення (рис. 2.4), що включають теплообмінник-повітропідігрівач, вузол попереднього форсункового охолодження газів, регульовану прямокутну трубу Вентурі з горловиною перетином 3,5x0,5 м, центр 7500-11-3 з електродвигуном потужністю 2500 кВт [13].



- 4 - футерований газохід; 5 - вузол попереднього охолодження форсуночного;
 6 - регульована прямокутна труба Вентурі; 7 – бункер труби Вентурі;
 8 - відцентровий краплеуловлювач; 9 - газохід очищеного газу; 10 - нагнітач;
 11 - дросель-клаван м; 12 – димова труба; 13 – дренажний бак;
 14 – дренажний насос; 15 – дренаж димової труби; 16 - бак-гідрозатвор;
 17 - газохід гарячого повітря для підігріву очищеного газу

Рисунок 2.4 - Схема газоочищення сталеплавильної печі
 мартенівського цеху

У протиточному трубчастому теплообміннику-повітропідігрівачі гарячими димовими газами нагрівається атмосферне повітря, що підключається до всмоктувальних партубак нагнітач для підвищення температури охолоджених вологих очищених газів, вище температури точки роси. Це технічне рішення дозволило виключити необхідність встановлення спеціальних топкових підігрівних пристроїв, що застосовувалися до останнього часу, з постійною витратою природного газу 400-500 нм³/год.

Вузол швидкісного форсуночного охолодження газів у газоході перед трубою Вентурі виключає застосування великогабаритних порожнистих скрубєрів.

Замість раніше застосовуваних на газоочищеннях у мартенівському виробництві двох труб Вентурі і двох краплеуловлювачів встановлюється

один блок великогабаритних одиночних пиловловлюючих апаратів - одна регульована труба Вентурі і один відцентровий краплевловлювач.

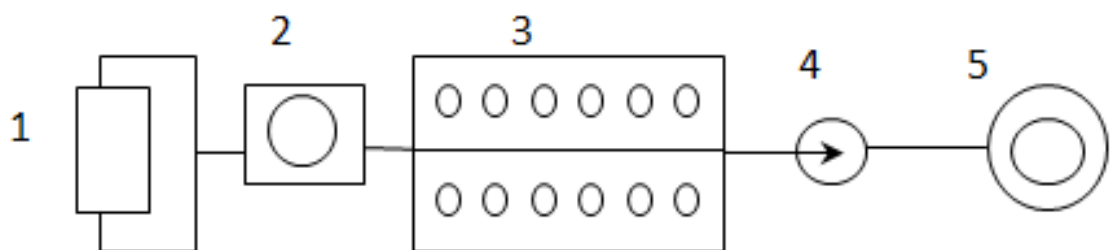
Нові технічні рішення значно зменшують габарити установок, капітальні та експлуатаційні витрати, спрощують схему та обслуговування газоочищення. Зазначені газоочищення працюють ефективно, надійно, забезпечують залишкову запиленість очищених газів у межах 50-80 мг/м³.

У трубах Вентурі встановлені дворядні системи форсуночного зрошення, що забезпечили повне перекриття прохідного перерізу труб Вентурі та збільшення витрати води на очищення.

При електричній очистці технологічних газів (рис. 2.5) експлуатуються наступні типи електрофільтрів:

- у більшості схем пластинчасті горизонтальні (димові) з С-подібними осаджувальними та багнетовими коронуючими електродами;
- Відмінні тим, що штикові електроди замінені стрічковими голчастими.

При швидкості руху газів у фільтрі 1,3 м/с забезпечують ефективність очищення 98-99% незалежно від методу опалення печей. При цьому перепад тиску у фільтрі 0,2-0,3 кПа [15].



1 - мартенівська піч; 2 - котел-утилізатор; 3 - електрофільтр;

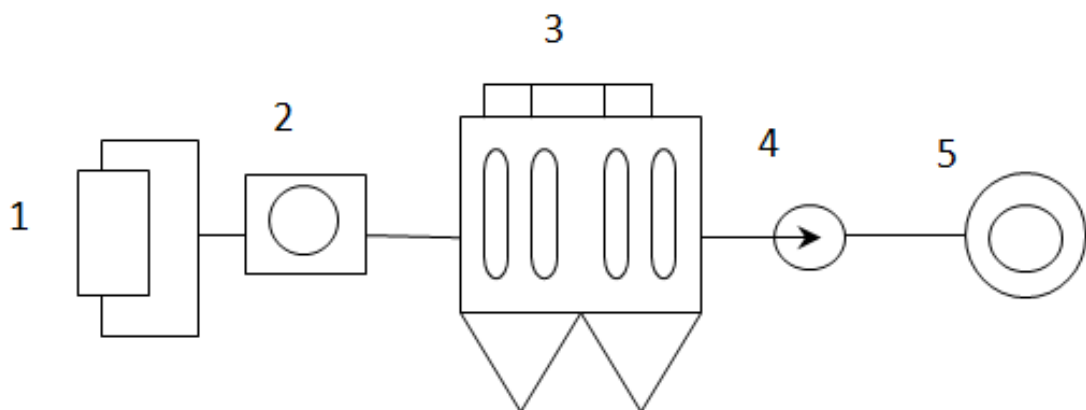
4 - димоцяг; 5 – димова труба

Рисунок 2.5 – Схема очистки мартенівського газу з використанням електрофільтра

Застосовують індивідуальні і централізовані системи очищення с використанням електрофільтрів; по-перше фільтр обслуговує одну піч, в других - групу печей. Перевагами централізованої системи є менша займана площа і більше рівномірний відбір тепла в часі; недолік - необхідність герметизації частини газоходу за вентиляторами, що знаходиться під тиском, оскільки встановлені шиберні заслінки працюють ненадійно. У індивідуальній схемі немає таких заслінок. Вона зручна тому, що ремонт електрофільтру можна поєднати з ремонтом печі, проте при використанні цієї схеми за кожною піччю потрібно власну систему газоходів, причому електрофільтрів треба мати стільки ж, скільки печей.

Електричний режим роботи електрофільтру є одним з основних чинників, що визначають ефективність очищення газів, тоді як спосіб опалювання печі не чинить на неї істотного впливу. Чим вище струм, що проходить через фільтр, і напругу його живлення, тим краще очищення.

В останній час для очищення пічного газу мартенівських печей почали застосовувати тканинні фільтри.



1 - мартенівська піч; 2 - котел-утилізатор; 3 – рукавний фільтр;
4 - вентилятор; 5 – димова труба

Рисунок 2.6 – Схема очистки мартенівського газу з використанням тканинного фільтра

Таке обладнання має ККД 99% або навіть вище, незалежно від вмісту пилу пічного газу. Проте це обладнання вимагає особливо точного проектування та ретельного вибору технічних параметрів через нестабільність фільтрувальних матеріалів при температурах вище 200°C [14]

2.3 Обґрунтування вибору технології очистки технологічних газів мартенівського виробництва

Як відзначалося вище, обидва способи очищення технологічних газів мартенівських печей (сухий і мокрий) забезпечують високий ступінь очищення від дрібнодисперсного пилу.

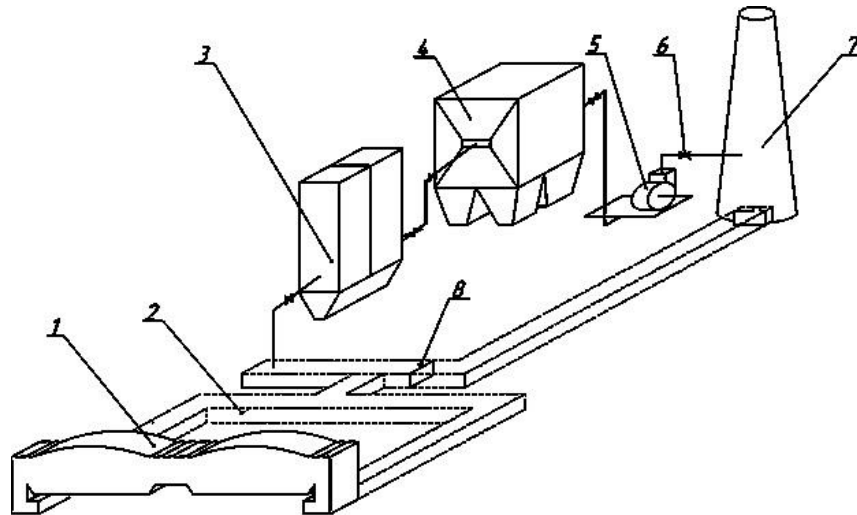
При виборі апаратів газоочищення перевага віддається сухим методам. Вони не вимагають спорудження дорогих систем водопостачання й шламової каналізації, полегшують утилізацію вловленого продукту, знижують корозійне спрацювання устаткування й комунікацій, характеризуються меншим споживанням електроенергії й води, поліпшують умови розсіювання шкідливих викидів в атмосфері [10]

Хоча «мокрі» апарати мають переваги: простоту конструкції й порівняно не високу вартість; менші габарити в порівнянні з електрофільтрами; можливість використання при підвищеній температурі й підвищеній вологості газів; вловлювання разом зі зваженими твердими частками пар і газоподібних компонентів, їх експлуатація потребує наявності громіздких зворотних циклів по очистці шламової води

Таким чином, найбільше доцільно застосовувати сухий спосіб очищення з використанням електрофільтра.

Пил, уловлений в рукавному фільтрі, сухий й немає необхідності зневоднювання й підсушування вловленого продукту при утилізації. Електрофільтри, на відміну від ткананих фільтрів, малочутливі до стрибків температури.

Таким чином пропонується система очищення газів, що відходять від мартенівської печі, від пилу «сухим» способом з використанням електрофільтра (рис. 2.7). Для утилізації фізичного тепла газів передбачено застосування котла-утилізатора.



1 – мартенівська піч; 2 – боров; 3 – котел-утилізатор; 4 – рукавний фільтр;
5 – вентилятор; 6 – засувка; 7 - димова труба; 8 – аварійне гавовідведення

Рисунок 2.7– Схема очищення мартенівських газів

2.4 Проектування основного та допоміжного обладнання технології очистки газів

Початкові дані:

Об'ємна витрата вологих газів за нормальних умов: $V_0=125000 \text{ м}^3/\text{ч}$;

Щільність газів за нормальних умов: $=1,26 \text{ кг}/\text{м}^3$;

Температура газів : $T_r=380 \text{ }^\circ\text{C}$;

Барометричний тиск: $P_{\text{бар}}=101,3 \text{ кПа}$;

Розрідження газів в газоході: $P_r = -2 \text{ кПа}$;

Вміст пилу в газоході: $Z_1=4 \text{ г}/\text{м}^3$;

2.4.1 Вибір та розрахунок котла-утилізатора

Котли-утилізатори для вироблення пари (гарячої води) за рахунок утилізації тепла відхідних газів різного технологічного обладнання мають велику кількість типів і модифікацій. Для утилізації тепла димових газів за мартенівськими та нагрівальними печами розроблені парові пакетно-конвективні водотрубні однобарабанні котли типу КУ [17].

Розрахунок продуктивності котла

Ентальпія повітря, кДж/м³:

$$I_{вз} = V_{пр}c(T_{вз} - T^0) = 0,05 \cdot 40 = 2 \text{ кДж/м}^3 \quad (2.1)$$

де $V_{пр}$ - теоретичний об'єм повітря;

T_0 - температура продуктів згорання перед котлом; $T_0 = 1123 \text{ К}$;

Кількість теплоти, переданої продуктами згорання, що відходять, кВт:

$$Q = (I_{н.с}^0 - I_{н.с}^{yx} + I_{пр}^0)V_{н.с}^0 = (1280 - 362 + 2) \cdot 22,22 = 20,44 \cdot 103 \text{ кВт}; \quad (2.2)$$

де $I_{н.с}^0$ - ентальпія продуктів згорання перед котлом (продукти згорання, що йдуть), кДж/м³;

$I_{н.с}^{yx}$ - ентальпія продуктів згорання на виході з котла; кДж/м³;

$I_{пр}$ - ентальпія повітря, кДж/м³;

$V_{н.с}^0$ - витрата продуктів згорання, м³/с.

Кількість теплоти продування, кДж/кг:

$$I_{пр} = 0,01P(i_{кип} - i_{п.с}) = 0,01 \cdot 8(1135 - 423) = 56,8 \text{ кДж/кг}; \quad (2.3)$$

де $i_{кип}$ - ентальпія рідини в барабані $i_{кип} = 1135 \text{ кДж/кг}$ (при p_6);

$i_{п.с}$ - ентальпія продуктів згорання, кДж/кг;

P - продування котла для видалення солей, що вносяться в нього під час роботи, і шламу, %.

Кількість теплоти, сприйнятої в котлі 1 кг пари, кДж/кг:

$$\Delta i = i_{п.п} - i_{п.с} + i_{пр} = 3175 - 423 + 56,8 = 2809 \text{ кДж/кг}; \quad (2.4)$$

де $i_{п.п}$ - ентальпія перегрітого пару; $i_{п.п} = 3175 \text{ кДж/кг}$ (при $p_{п.п}$);

$i_{п.у}$ - ентальпія поживної води; $i_{п.у}=423$ кДж/кг (при p_6).

Розрахункова продуктивність котла, кг/с:

$$D_k = \frac{Q\varphi}{\Delta i} = \text{кг/с}; \quad (2.5)$$

де φ - коефіцієнт, яким враховують тепловідвід через обгороджування; $\varphi = 0,98$.

Розрахунок першого випарного пакету

Розрахунковий температурний натиск, К:

$$\Delta T = \frac{(T_{n.c}^0 - T_{н.н}) - (T_{n.c}'' - T_{н.н})}{2,31g \frac{\Delta T_{\delta}}{\Delta T_m}} = \frac{(1123 - 532) - (1045 - 532)}{2,31g \frac{591}{513}} = 551 \text{ К}; \quad (2.6)$$

де $T_{н.н}$ - температура продуктів згорання з пакету (попередня), $T_{н.н} = 1045$ К.

Розрахункова температура потоку, К:

$$T_{nom} = T_{н.н} + \Delta T = 532 + 551 = 1083 \text{ К}; \quad (2.7)$$

Витрата продуктів згорання, м³/с:

$$V_{n.c} = \frac{V V_{n.c}^0 T_{nom}}{273} = \frac{1 \cdot 22,22 \cdot 1083}{273} = 88,2 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (2.8)$$

де V - середній об'єм продуктів згорання, $V = 1$ м³/м³.

Середня швидкість продуктів згорання, м/с:

$$\omega_{n.c} = \frac{V_{n.c}}{F} = \frac{88,2}{8,63} = 10,2 \text{ м/с}; \quad (2.9)$$

де F - площа живого перерізу для проходу продуктів згорання, $F = 8,63$ м².

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією (по номограмі 12 [17]), Вт/(м²·К) :

$$\alpha_k = C_z C_s C_\phi \alpha_n = 0,98 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 84,2 = 103 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (2.10)$$

Сумарна поглинаюча здатність трьохатомних продуктів згорання, м·Мпа :

$$\rho_n S \rho = (r_{H_2O} + r_{RO_2}) S \rho = r_n S \rho = (0,105 + 0,12) \cdot 0,741 \cdot 0,1 = 0,0167 \text{ м} \cdot \text{Мпа} \quad (2.11)$$

Сумарна сила поглинання продуктів згорання (K_r по номограмі 3 [16]) :

$$KPS = K_r r_n S \rho = 14 \cdot 0,225 \cdot 0,741 \cdot 0,1 = 0,234. \quad (2.12)$$

Температура забрудненої стінки, К:

$$T_3 = T_{n.n} + \varepsilon \frac{Q_1 V_{n.c}^0}{H_1} \cdot 10^3 = 532 + 0,0043 \cdot \frac{127 \cdot 22,22}{60} \cdot 10^3 = 735 \text{ К}; \quad (2.13)$$

де ε – коефіцієнт забруднення = 0,0043 (м²·К)/Вт.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_{\text{л}} = \alpha_{\text{н}} a C_{\text{r}} = 158 \cdot 0,21 \cdot 0,96 = 31,8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (2.14)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згорання до стінки, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_1 = \omega \alpha_{\text{k}} + \alpha_{\text{л}} = 1 \cdot 103 + 31,8 = 134,8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}; \quad (2.15)$$

де ω – коефіцієнт обмивання, = 1.

Коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К) :

$$K = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \alpha_1} = \frac{134,8}{1 + 0,0043 \cdot 134,8} = 85,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} \quad (2.16)$$

Кількість теплоти, сприйнятою поверхнею нагріву, кДж/м³:

$$Q_1 = \frac{H_1 K \Delta T}{V_{n.c} \cdot 10^3} = \frac{60 \cdot 85,3 \cdot 551}{22,22 \cdot 10^3} = 127 \text{ кДж/м}^3. \quad (2.17)$$

Теплота, присосання з повітрям, кДж/м³:

$$\Delta I_{\text{вз}} = 0$$

Ентальпія продуктів згорання на виході з пакету, кДж/м³:

$$I'_{n.c} = I_{n.c}^0 - \frac{Q}{\varphi} = 1280 - \frac{127}{0,98} = 1150 \text{ кДж/м}^3. \quad (2.18)$$

Температура продуктів згорання на виході з пакету $T = 1045 \text{ К}$.

Розрахунок пароперегрівача

Температура перегрітої пари $T_{\text{п.п}} = 658 \text{ К}$.

Кількість теплоти, сприйнятої пароперегрівачем, кДж/м³:

$$Q_{n.n} = \frac{D(i_{n.n} - i_{n.c})}{V_{n.c}^0} = \frac{7,16(3175 - 2800)}{22,22} = 120,5 \text{ кДж/м}^3; \quad (2.19)$$

де $i_{\text{п.п}}$ - ентальпія перегрітої пари, $i_{\text{п.п}} = 3175 \text{ кДж/кг}$

Ентальпія продуктів згорання за пароперегрівачем, кДж/м³:

$$I''_{n.c} = I'_{n.c} - \frac{Q_{n.n}}{\varphi} = 1150,3 - \frac{120,5}{0,98} = 1020,5 \text{ кДж/м}^3. \quad (2.20)$$

Середня логарифмічна різниця температур, К:

- прямоток

$$\Delta T_{пр} = \frac{(T'_{н.с} - T_{н.п}) - (T_{н.с} - T_{н.п})}{2,31g \frac{\Delta T_{\delta}}{\Delta T_{м}}} = \frac{(1045 - 532) - (970 - 658)}{2,31g \frac{513}{312}} = 404 \text{ К}; \quad (2.21)$$

-протівоток

$$\Delta T_{про} = \frac{(T'_{н.с} - T_{н.п}) - (T''_{н.с} - T_{н.п})}{2,31g \frac{\Delta T_{\delta}}{\Delta T_{м}}} = \frac{(1045 - 658) - (970 - 532)}{2,31g \frac{438}{387}} = 412 \text{ К}; \quad (2.22)$$

де $T''_{н.с}$ - температура продуктів згорання за пароперегрівачем, =658 К.

Розрахунковий температурний натиск, К:

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{пр} + \Delta T_{про}}{2} = \frac{404 + 412}{2} = 408 \text{ К}; \quad (2.23)$$

Середня температура пари, К:

$$\bar{T}_p = \frac{T_{н.п} + T_{н.п}}{2} = \frac{658 + 532}{2} = 595 \text{ К}; \quad (2.24)$$

Розрахункова температура потоку, К:

$$T_{пот} = \bar{T}_p + \Delta T = 595 + 408 = 1003 \text{ К}; \quad (2.25)$$

Витрата продуктів згорання, м³/с:

$$V_{п.с} = \frac{VV_{п.с}^0 T_{пот}}{273} = \frac{1 \cdot 22,22 \cdot 1003}{273} = 81,7 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (2.26)$$

де V - середній об'єм продуктів згорання, м³/м³.

Середня швидкість продуктів згорання, м/с:

$$\omega_{п.с} = \frac{V_{п.с}}{F} = \frac{81,7}{6,34} = 12,9 \text{ м/с}; \quad (2.27)$$

де F - площа живого перерізу для проходу продуктів згорання, F=6,34 м².

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_k = C_z C_s C_{\phi} \alpha_n = 0,96 \cdot 1,12 \cdot 0,96 \cdot 96,6 = 103,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.28)$$

Сумарна поглинаюча здатність трьохатомних продуктів згорання, м·Мпа :

$$\rho_{\text{п}} S \rho = (r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{RO}_2}) S \rho = r_{\text{п}} S \rho = (0.105 + 0.12) \cdot 0.238 \cdot 0.1 = 0.0054 \text{ м} \cdot \text{Мпа}.$$

Сумарна сила поглинання продуктів згорання :

$$KPS = 25,9 \cdot 0,225 \cdot 0,238 \cdot 0,1 = 0,1387 \quad (2.29)$$

Температура забрудненої стінки, К:

$$T_3 = \bar{T}_n + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{\text{п.п}} V_{\text{п.с}}^0}{H_{\text{п.п}}} \cdot 10^3 = 595 + \left(0,0043 + \frac{1}{1460} \right) \cdot \frac{120,5 \cdot 22,22}{87} \cdot 10^3 = 751 \text{ K}$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_{\text{п}} = \alpha_{\text{н}} a C_{\text{r}} = 142 \cdot 0.129 \cdot 0.95 = 17.4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (2.31)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згорання до стінки:

$$\alpha_1 = \omega \alpha_{\text{н}} + \alpha_{\text{п}} = 1 \cdot 103,9 + 17,4 = 121,3. \quad (2.32)$$

Середній питомий об'єм пари, м³/кг:

$$\bar{v}_{\text{п}} = \frac{v_{\text{п}}'' + v_{\text{п}}'}{2} = \frac{0,0642 + 0,0425}{2} = 0,0534 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.33)$$

Середня швидкість пари, м/с:

$$\bar{\omega}_{\text{п}} = \frac{D v_{\text{п}}}{f_{\text{п}}} = \frac{7,16 \cdot 0,0534}{0,0202} = 19 \text{ м/с}; \quad (2.34)$$

де $f_{\text{п}}$ - площа живого перерізу для проходу пари, м².

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до пари, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_2 = C_{\text{д}} \alpha_{\text{н}} = 1,03 \cdot 1420 = 1460 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (2.35)$$

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К) :

$$K = \frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \alpha_1} = \frac{121,3}{1 + \left(0,0043 + \frac{1}{1460} \right) \cdot 121,3} = 75,8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}; \quad (2.36)$$

де ε - коефіцієнт забруднення, =0,0043 м²·К/Вт.

Розрахункова площа поверхні нагріву пароперегрівача, м²:

$$H_{\text{п.п}} = \frac{Q_{\text{п.п}} V_{\text{п.с}}^0}{K \Delta T} = \frac{120,5 \cdot 22,22 \cdot 10^3}{75,8 \cdot 408} = 86,5 \text{ м}^2. \quad (2.37)$$

Площа поверхні нагріву пароперегрівача, що приймається, складає 87 м² (двохпетельний).

Розрахунок другого випарного пакету

Розрахунковий температурний натиск, К:

$$\Delta T = \frac{(T'_{п.с} - T_{н.в}) - (T''_{п.с} - T_{н.в})}{2,31g \frac{\Delta T_6}{\Delta T_M}} = \frac{(970 - 532) - (800 - 532)}{2,31g \frac{438}{268}} = 346 \text{ К}; \quad (2.38)$$

де - температура продуктів згорання, T=800 К;

Розрахункова температура потоку, К:

$$T_{пот} = T_{н.в} + \Delta T = 532 + 346 = 878 \text{ К}; \quad (2.39)$$

Витрата продуктів згорання, м³/с:

$$V_{п.с} = \frac{V V_{п.с}^0 T_{пот}}{273} = \frac{1,005 \cdot 22,22 \cdot 878}{273} = 71,9 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (2.40)$$

де V - середній об'єм продуктів згорання, м³/м³.

Середня швидкість продуктів згорання, м/с:

$$\bar{\omega}_{п.с} = \frac{V_{п.с}}{F} = \frac{71,9}{6,34} = 11,3 \text{ м/с}; \quad (2.41)$$

де F - площа живого перерізу для продуктів згорання, м².

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_k = C_z C_s C_\phi \alpha_n = 1 \cdot 1,12 \cdot 1 \cdot 84,2 = 100,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.42)$$

Сумарна поглинаюча здатність трьохатомних продуктів згорання, м·Мпа :

$$\rho_{п} S \rho = (r_{H_2O} + r_{RO_2}) S \rho = \rho_{п} S = (0,1045 + 0,1195) \cdot 0,1 \cdot 0,161 = 0,00361 \text{ м} \cdot \text{МПа}.$$

Сумарна сила поглинання продуктів згорання :

$$KPS \rho = K_r r_{п} S \rho = 34,5 \cdot 0,224 \cdot 0,161 \cdot 0,1 = 0,124. \quad (2.44)$$

Температура забрудненої стінки, К:

$$T_3 = T_n + \varepsilon \frac{Q_{п} V_{п.с}^0}{H} \cdot 10^3 = 532 + 0,0043 \cdot \frac{250 \cdot 22,22 \cdot 10^3}{219} = 542 \text{ К}; \quad (2.45)$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_{п} = \alpha_n a C_r = 91,6 \cdot 0,117 \cdot 0,95 = 10,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.46)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згорання до стінки, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_1 = \omega \alpha_k + \alpha_{\text{л}} = 1 \cdot 100,1 + 10,2 = 110,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (2.47)$$

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К) :

$$K = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \alpha_1} = \frac{110,3}{1 + 0,0043 \cdot 110,3} = 74,9 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (2.48)$$

Кількість теплоти, сприйнятою поверхнею нагріву, кДж/м³:

$$Q_{\text{II}} = \frac{N_{\text{II}} K \Delta T}{V_{\text{п.с}}^0 \cdot 10^3} = \frac{219 \cdot 74,9 \cdot 346}{22,22 \cdot 10^3} = 255 \text{ кДж/м}^3. \quad (2.49)$$

Теплота, присосання з повітрям, кДж/м³:

$$I_{\text{вз}} = \Delta V_{\text{пр}} c (T_{\text{вз}} - T^0) = 0,1 \cdot 39,3 \text{ кДж/м}^3. \quad (2.50)$$

Ентальпія продуктів згорання на виході з пакету, кДж/м³:

$$I_{\text{п.с}}'' = I_{\text{п.с}}' - \frac{Q_{\text{II}}}{\varphi} = 1020,5 - \frac{255}{0,98} = 760,5 \text{ кДж/м}^3. \quad (2.51)$$

Температура продуктів згорання на виході з пакету, T=800 К;

Розрахунок третього випарного пакету

Температура продуктів згорання на виході з пакету =650 К (попередня).

Розрахунковий температурний натиск, К:

$$\Delta T = \frac{(T_{\text{п.с}}' - T_{\text{н.в}}) - (T_{\text{п.с}}'' - T_{\text{н.в}})}{2,31g \frac{\Delta T_{\text{б}}}{\Delta T_{\text{м}}}} = \frac{(800 - 532) - (650 - 532)}{2,31g \frac{268}{168}} = 322 \text{ К}; \quad (2.53)$$

Розрахункова температура потоку, К:

$$T_{\text{пот}} = T_{\text{н.в}} + \Delta T = 532 + 322 = 854 \text{ К}; \quad (2.54)$$

Витрата продуктів згорання, м³/с:

$$V_{\text{п.с}} = \frac{V V_{\text{п.с}}^0 T_{\text{пот}}}{273} = \frac{1,015 \cdot 22,22 \cdot 854}{273} = 70,6 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.55)$$

де V - середній об'єм продуктів згорання, V=1,015 м³/м³.

Середня швидкість продуктів згорання, м/с:

$$\omega_{\text{п.с}} = \frac{V_{\text{п.с}}}{F} = \frac{70,6}{6,34} = 11,1 \text{ м/с} \quad (2.57)$$

де F - площа живого перерізу для проходу продуктів згорання, F=6.34 м².

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_k = C_z C_s C_\phi \alpha_n = 1 \cdot 1,12 \cdot 1 \cdot 81,8 = 91,5 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}. \quad (2.58)$$

Сумарна поглинаюча здатність трьохатомних продуктів згорання, м·Мпа :

$$\rho_n S \rho = (r_{H_2O} + r_{RO_2}) S \rho = r_n S \rho = (0,1035 + 0,1185) 0,1 \cdot 0,161 = 0,00357 \text{ м·Мпа}. \quad (2.59)$$

Сумарна сила поглинання продуктів згорання :

$$KPS \rho = K_r r_n S \rho = 36,7 \cdot 0,222 \cdot 0,161 \cdot 0,1 = 0,131. \quad (2.60)$$

Температура забрудненої стінки, К:

$$T_3 = T_n + \varepsilon \frac{Q_{III} V_{п.с}^0}{H_{III}} \cdot 10^3 = 532 + 0,0043 \cdot \frac{158 \cdot 22,22 \cdot 10^3}{244} = 594 \text{ К}; \quad (2.61)$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_n = \alpha_n a C_r = 62,8 \cdot 0,123 \cdot 0,94 = 7,3 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}. \quad (2.62)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згорання до стінки, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_1 = \omega \alpha_k + \alpha_n = 1 \cdot 91,5 + 7,3 = 98,8 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)} \quad (2.63)$$

де ω - коефіцієнт обмивання, $\omega = 1$.

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К) :

$$K = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \alpha_1} = \frac{98,8}{1 + 0,0043 \cdot 98,8} = 69,4 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}. \quad (2.64)$$

Кількість теплоти, сприйнятою поверхнею нагріву, кДж/м³:

$$Q_{III} = \frac{H_{III} K \Delta T}{V_{п.с}^0 \cdot 10^3} = \frac{244 \cdot 69,4 \cdot 208}{22,22 \cdot 10^3} = 158 \text{ кДж/м}^3. \quad (2.65)$$

Теплота, присосання з повітрям, кДж/м³:

$$I_{вз} = \Delta V_{пр} c (T_{вз} - T^0) = 0,01 \cdot 39,3 = 0,393 \text{ кДж/м}^3. \quad (2.67)$$

Ентальпія продуктів згорання на виході з пакету, кДж/м³:

$$I''_{п.с} = I'_{п.с} - \frac{Q_{III}}{\phi} + I_{х.в} = 760,5 - \frac{158}{0,98} + 0,4 = 601,9 \text{ кДж/м}^3. \quad (2.68)$$

Температура продуктів згорання на виході з пакету, T=653 К;

Розрахунок четвертого випарного пакету

Розрахунковий температурний натиск, К:

$$\Delta T = \frac{(T'_{п.с} - T_{н.п}) - (T''_{п.с} - T_{н.п})}{2,31g \frac{\Delta T_{б}}{\Delta T_{м}}} = \frac{(690 - 532) - (653 - 532)}{2,31g \frac{159}{98}} = 77 \text{ К}; \quad (2.69)$$

Розрахункова температура потоку, К:

$$T_{пот} = T_{н.п} + \Delta T = 532 + 126 = 609 \text{ К}; \quad (2.70)$$

Витрата продуктів згорання, м³/с:

$$V_{п.с} = \frac{V_r V_{п.с}^0 T_{пот}}{273} = \frac{1,025 \cdot 22,22 \cdot 658}{273} = 51 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.71)$$

де V_r - середній об'єм продуктів згорання, $V_r = 1,025 \text{ м}^3/\text{с}$.

Середня швидкість продуктів згорання, м/с:

$$\bar{\omega}_{п.с} = \frac{V_{п.с}}{F} = \frac{51}{5,77} = 8,8 \text{ м/с} \quad (2.72)$$

де F - площа живого перерізу для проходу продуктів згорання, м².

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_k = C_z C_s C_{\phi} \alpha_n = 1 \cdot 1,12 \cdot 1 \cdot 80,7 = 90,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.73)$$

Сумарна поглинаюча здатність трьохатомних продуктів згорання, м·Мпа :

$$\rho_{п} S \rho = (r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{RO}_2}) S \rho = r_{п} S \rho = (0,1025 + 0,1175) \cdot 0,1 \cdot 0,161 = 0,00354 \text{ м} \cdot \text{Мпа}.$$

Сумарна сила поглинання продуктів згорання :

$$KPS \rho = K_r r_{п} S \rho = 38,9 \cdot 0,22 \cdot 0,1 \cdot 0,161 = 0,138. \quad (2.75)$$

Температура забрудненої стінки, К:

$$T_s = T_n + \varepsilon \frac{Q_{IV} V_{п.с}}{H_{IV}} \cdot 10^3 = 532 + 0,0043 \cdot \frac{86,9 \cdot 22,22 \cdot 10^3}{221} = 569,5 \text{ К} \quad (2.76)$$

де ε - коефіцієнт забруднення, $= 0,0043 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_{л} = \alpha_n a C_r = 47,5 \cdot 0,129 \cdot 0,93 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.77)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згорання до стінки, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_1 = \omega\alpha_k + \alpha_l = 1 \cdot 90,2 + 5,7 = 95,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.78)$$

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К) :

$$K = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon\alpha_1} = \frac{95,9}{1 + 0,0043 \cdot 95,9} = 69,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.79)$$

Кількість теплоти, сприйнятою поверхнею нагріву, кДж/м³:

$$Q_{IV} = \frac{N_{IV} K \Delta T}{V_{п.с} \cdot 10^3} = \frac{221 \cdot 69,4 \cdot 126}{22,22 \cdot 10^3} = 86,9 \text{ кДж}/\text{м}^3. \quad (2.80)$$

Теплота, присосання з повітрям, кДж/м³:

$$I_{вз} = \Delta V_{пр} c (T_{вз} - T^0) = 0,01 \cdot 39,3 = 0,393 \text{ кДж}/\text{м}^3. \quad (2.81)$$

Ентальпія продуктів згорання на виході з пакету, кДж/м³:

$$I''_{п.с} = I'_{п.с} - \frac{Q_{IV}}{\varphi} + I_{х.в} = 601,5 - \frac{86,9}{0,98} + 0,4 = 512,5 \text{ кДж}/\text{м}^3. \quad (2.82)$$

Температура продуктів згорання на виході з пакету, T=630 К;

Розрахунок економайзера

Теплота, поглинена економайзером, кДж/м³:

$$Q_3 = \varphi (I'_{п.с} - I''_{п.с} + I_{вз}) = 0,98 (512,5 - 361 + 0,84) = 154,3 \text{ кДж}/\text{м}^3. \quad (2.83)$$

Теплота передана в економайзері 1 кг води, кДж/кг:

$$\Delta i = \frac{Q_3 V_{п.с}^0}{(1 + 0,01P) D_k} = \frac{154,3 \cdot 22,22}{1,08 \cdot 7,16} = 445 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (2.84)$$

Ентальпія води за економайзером, кДж/кг:

$$i''_3 = i' + \Delta i = 422 + 445 = 867 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (2.85)$$

Розрахунковий температурний натиск, К:

$$\Delta T = \frac{(T'_{п.с} - T''_в) - (T''_{п.с} - T'_в)}{2,31g \frac{\Delta T_6}{\Delta T_m}} = \frac{(630 - 476) - (521 - 373)}{2,31g \frac{154}{148}} = 151 \text{ К} \quad (2.87)$$

де - температура води за економайзером, T=476 К;

Середня температура води, К:

$$\bar{T} = \frac{T''_в + T'_в}{2} = \frac{476 + 373}{2} = 424 \text{ К}; \quad (2.88)$$

Розрахункова температура потоку, К:

$$T_{\text{пот}} = \bar{T}_B + \Delta T = 424 + 151 = 575 \text{ К}; \quad (2.89)$$

Витрата продуктів згорання, м³/с:

$$V_{\text{п.с}} = \frac{V V_{\text{п.с}}^0 T_{\text{пот}}}{273} = \frac{1,04 \cdot 22,22 \cdot 575}{273} = 48,7 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.90)$$

де V - середній об'єм згорання, $V=1,04 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Середня швидкість продуктів згорання, м/с:

$$\bar{\omega}_{\text{п.с}} = \frac{V_{\text{п.с}}}{F} = \frac{48,7}{6,36} = 7,7 \text{ м/с} \quad (2.91)$$

де F - площа живого перерізу для продуктів згорання, $F=6,36 \text{ м}^2$.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_k = C_z C_s C_\phi \alpha_n = 1 \cdot 1,12 \cdot 1,071 = 79,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.92)$$

Швидкість води на виході в економайзер, м/с:

$$\omega_B = \frac{(1 + 0,01P) D_k v_B}{f} = \frac{(1 + 0,08) \cdot 7,16 \cdot 0,00104}{0,0127} = 0,63 \text{ м/с} \quad (2.93)$$

де v - питомий об'єм води, (при $T=273 \text{ К}$) $=0,00104 \text{ м}^3/\text{кг}$

Сумарна поглинаюча здатність трьохатомних продуктів згорання, м·Мпа :

$$\rho_{\text{п}} S \rho = (r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{RO}_2}) S \rho = r_{\text{п}} S \rho = (0,101 + 0,116) \cdot 0,168 \cdot 0,1 = 0,0036 \text{ м} \cdot \text{Мпа}.$$

Сумарна сила поглинання продуктів згорання :

$$K \rho_{\text{п}} S \rho = K_r r_{\text{п}} S \rho = 40 \cdot 0,217 \cdot 0,168 \cdot 0,1 = 0,146. \quad (2.95)$$

Температура забрудненої стінки, К:

$$T_3 = \bar{T}_B + \varepsilon \frac{Q_3 V_{\text{п.с}}^0}{H_3} \cdot 10^3 = 424 + 0,0043 \cdot \frac{154,3 \cdot 10^3}{370} = 426 \text{ К} \quad (2.96)$$

де ε - коефіцієнт забруднення, $\varepsilon=0,005 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_{\text{л}} = \alpha_n a C_r = 29,1 \cdot 0,135 \cdot 0,94 = 3,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.97)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згорання до стінки, Вт/(м²·К) :

$$\alpha_1 = \omega \alpha_k + \alpha_{\text{л}} = 1 \cdot 79,2 + 3,7 = 82,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (2.98)$$

де ω - коефіцієнт обмивання, $=1$.

Коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$K = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon\alpha_1} = \frac{82,9}{1 + 0,0043 \cdot 82,9} = 61,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.99)$$

Необхідна площа поверхні нагріву, м^2 :

$$H_3 = \frac{Q_3 V_{\text{п.с}}^0}{K \Delta T} \cdot 10^3 = \frac{154,3 \cdot 22,22 \cdot 10^3}{61,3 \cdot 151} = 371 \text{ м}^2. \quad (2.100)$$

Площа поверхні нагріву, що приймається, $H_3=370 \text{ м}^2$.

За результатами розрахунку вибираємо котел типу КУ-125М [17].

Технічна характеристика котла:

Продуктивність, т/год	42,4
Тиск, МПа	1,8
Температура пари, °С	365
Витрата газів, $\text{нм}^3/\text{год}$	125000
Температура газів на вході, °С	850
Температура газів на виході, °С	240
Гідравлічний опір, кПа	1,17
Габарити (довжина x ширина x висота), м	12,6 x 9, 2x11, 6
Маса металу котла, т	134

Поверхні нагрівання котла розташовані у П-подібному газоході.

Котел утилізатор типу КУ-125М призначений для вироблення перегрітої водяної пари за рахунок використання тепла відхідних газів мартенівських печей.

Також до котла-утилізатора може бути підключено випарне охолодження мартенівських печей. Паровий котел - утилізатор типу КУ-125М виконується з багатократною примусовою циркуляцією води, що здійснюється включеними в циркуляційний контур котла насосами з електроприводом.

Котел-утилізатор КУ-125М складається з конвективних змієвиків поверхонь нагріву, які утворені трубами.

Передбачена напіввідчинені установка котлів з пристроєм утепленій прибудови з фронтової сторони для захисту від впливу навколишнього середовища устаткування, арматури і приладів. Розрахований на роботу під розрідженням. Сейсмічність району установки 6 балів.

Всі поверхні нагріву котлів виконані з безшовних труб діаметром 32 мм з товщиною стінки 3 мм (сталь 20) і складаються з водяного економайзера, випарної частини котла і пароперегрівача. Компонування поверхонь нагріву П-подібна. У першому висхідному газоході по ходу газів розташовані перша секція випарної поверхні нагріву, пароперегрівач, друга випарна секція і другий пакет третьої секції випарної.

У другому газоході зверху вниз розташовані: пакет третьої секції випарної та два пакети економайзера.

Конструкції всіх котлів серії уніфіковані за формою і висоті пакетів змієвиків поверхонь нагріву. Всі поверхні нагріву котла виготовлені у вигляді зварних блоків з шаховим розташуванням труб в пакетах. Кроки труб прийняті наступні: в ряду по ширині газоходу для першої секції-172 мм, для другої і третьої випарних секцій і пароперегрівача - 68 мм, для економайзера - 90 мм крок труб по ходу газів 70 мм у всіх пакетах.

Випарна частина котла виконана за схемою з багатократною примусовою циркуляцією (МПЦ) з трьома паралельно включеними секціями. Циркуляція здійснюється двома циркуляційними насосами (один резервний), розрахованими на перекачування перегрітої котлової води з барабана котлова вода надходить в циркуляційний насос, яким подається в шламовловлювач. З шламовловлювача вода по трубах подається паралельно в три випарні секції котла. З вихідних камер випарних секцій пароводяна суміш надходить в барабан.

Барабан котла — зварний, з внутрішнім діаметром 1508 мм, товщиною стінки 16 мм на тиск 1,8 МПа і 36 мм на тиск 4,5 МПа, виконаний зі сталі 20 К.

Поживна вода підводиться до економайзера котла по одному трубопроводу з вихідної камери економайзера живильна вода відводиться в розподільну трубу внутрішнього устрою барабана. Між щламовловлювач і живильним трубопроводом є перемичка, на якій на вхід економайзера може: бути подана циркуляційна котлова вода (лінія рециркуляції).

Каркас котла — металевий, зварний. Обмурування підйомного газоходу виконана з вогнетривкої та термоізоляційного цегли.

2.4.2 Вибір та розрахунок електрофільтру

Розрахунок апаратів системи газоочищення проводимо виходячи з вихідних даних, які наведені в завданні до магістерського проекту.

Об'ємна витрата мартенівських газів за нормальних умов 125000 м³/год;

Запиленість газу, який поступає на очистку за н.у. 4 г/ м³;

Щільність пилу 4200 кг/м³;

Середній розмір часток пилу $1 \cdot 10^{-6}$ м ;

Температура газу 240 °С

Хімічний склад газу, %:

СО₂ - 10,5; Н₂О - 16,5; N₂ - 66; О₂ - 6,98; СО - 0,02.

Щільність газів за робочих умов:

$$\rho = \rho_0 \frac{273(P_{бар} \pm P_z)}{(273 + T_z)101,3} = 1,26 \frac{273(101,3 - 2)}{(273 + 380)101,3} = 0,52 \text{ кг/м}^3 \quad (2.101)$$

де 101,3 кПа - нормальний атмосферний тиск.

Об'ємна витрата газів за робочих умов:

$$V = \frac{V_0 \rho_0}{\rho_r \cdot 3600} = 125000 \frac{1,26}{0,52 \cdot 3600} = 84,1 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.102)$$

Задавшись швидкістю газів в електрофільтрі $=1$ м/с, розрахуємо необхідну площу поперечного перерізу електрофільтру :

$$F' = \frac{V}{W_r'} = \frac{84,1}{1} = 84,1 \text{ м}^2. \quad (2.103)$$

Вибираю електрофільтр типу ЕГА1-40-7,5-4-4 згідно [18]. Тоді фактична швидкість газів в електрофільтрі:

$$W = \frac{V}{F} = \frac{84,1}{81} = 1,04 \text{ м/с} \quad (2.104)$$

де $F=81 \text{ м}^2$ - площа активного перерізу електрофільтру ЕГА1-40-7,5-4-4 прийнята по [18].

Відношення щільності газів за робочих умов до щільності газів за стандартних умов ($T_{ст}=20 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_{ст}=101,3 \text{ кПа}$) :

$$\beta = \frac{(P_{бар} \pm P_z) T_{cm}}{P_{cm} (273 + T_z)} = \frac{(101,3 - 2) 293}{101,3 (273 + 240)} = 0,44. \quad (2.105)$$

Критична напруженість електричного поля :

$$E_{кр} = 3,04 \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) 10^6 = 3,04 \left(0,44 + 0,0311 \sqrt{\frac{0,44}{0,0003}} \right) 10^6 = 4,96 \cdot 10^6 \text{ В/м}$$

де R_1 - еквівалентний радіус голчастого коронуючого електроду, приймаємо рівним $0,0003 \text{ м}$

Критична напруга корони для пластинчатого електрофільтру типу ЕГА1-40-7,5-4-4:

$$U_{кр} = E_{кр} R_1 \left(\frac{\pi H}{S} - 2,31g \frac{2\pi R_1}{S} \right) = 4,96 \cdot 10^6 \cdot 0,0003 \left(\frac{3,14 \cdot 0,3}{0,18 \cdot 2} - 2,31g \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0003}{0,18} \right) = 1,07 \cdot 10^4 \text{ В}, \quad (2.106)$$

де $H=0,275/2 \text{ м}$ - відстань між площинами коронуючих і осаджувальних електродів; $S=0,18 \text{ м}$ - крок коронуючих електродів в ряду.

Рухливість іонів газової суміші за нормальних умов:

$$K_0 = K_{0i} a_i = (0,105 \cdot 0,96 + 0,165 \cdot 0,57 + 0,66 \cdot 1,84 + 0,0698 \cdot 1,84 + 0,0002 \cdot 1,28) \times 10^{-4} = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 / (\text{В} \cdot \text{с}),$$

де K_{0i} - рухливість газових молекул за нормальних умов, $\text{м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$;

a_i - об'ємний зміст компонентів газової суміші, %.

Рухливість іонів газової суміші за робочих умов:

$$K = K_0 \frac{(273 + T_r) 101,3}{273(P_{\text{бар}} \pm P_r)} = 1,54 \cdot 10^{-4} \frac{(273 + 380) \cdot 101,3}{273(101,3 - 2)} = 3,76 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}).$$

Лінійна щільність струму корони :

$$i_0 = \frac{4\pi^2 K \psi U (U - U_{\text{кр}})}{9 \cdot 10^9 \left(\frac{\pi H}{S} - 2,31g \frac{2\pi R_1}{S} \right) \cdot S^2} =$$

$$\frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 3,76 \cdot 10^{-4} \cdot 0,043 \cdot 80 \cdot 10^3 (80 \cdot 10^3 - 10,7 \cdot 10^3)}{9 \cdot 10^{10} \left(\frac{3,14 \cdot 0,3}{2 \cdot 0,18} - 2,31g \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0003}{0,18} \right) \cdot 0,18^2} = 0,169 \cdot 10^{-3} \text{ А/м},$$

де $\psi = 0,043$ при $H/S = 0,3/2 \cdot 0,18 = 0,83$.

Напруженість електричного поля :

$$E = \sqrt{\frac{8i_0 H}{4\pi K \epsilon_0 S}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 0,169 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3}{4 \cdot 3,14 \cdot 3,76 \cdot 10^{-4} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 0,18}} = 1,64 \cdot 10^5 \text{ В/м}$$

Динамічна в'язкість окремих компонентів, що входять до складу газів, за робочих умов визначаються по формулі, Па·с:

$$\mu_i = \mu_{0i} \frac{(273 + C_i)}{(273 + T_r + C_i)} \left(\frac{273 + T_r}{273} \right)^{1,5}; \quad (2.11)$$

де μ_i , C_i - відповідно динамічна в'язкість і коефіцієнт C для окремих компонентів газової суміші.

Підставляючи відповідні значення μ_i та C_i знаходимо динамічну в'язкість компонентів газової суміші за робочих умов:

$$\mu_{\text{CO}_2} = 29,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 28,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu_{\text{N}_2} = 31,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu_{\text{O}_2} = 38,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu_{\text{NO}} = 35,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Молярна маса газової суміші :

$$M = \sum a_i M_i = 0,105 \cdot 44 + 0,165 \cdot 18 + 0,66 \cdot 28 + 0,0698 \cdot 32 + 0,0002 \cdot 30 = \\ = 28,3 \text{ кг/моль}.$$

Звідси:

$$\mu = \frac{M}{M/\mu} = \frac{28,3}{0,903 \cdot 10^6} = 31,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (2.112)$$

Швидкість дрейфу часток розміром більше 1 мкм, м/с:

$$W_{\text{др}} = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \text{ E}^2 r}{\mu} = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \cdot (1,64 \cdot 10^5)^2 \cdot r}{31,3 \cdot 10^{-6}} = 1,01 \cdot 10^4 \cdot r. \quad (2.113)$$

Швидкість дрейфу часток розміром менше 1 мкм, м/с:

$$W'_{\text{др}} = 0,17 \cdot 10^{-11} \frac{\text{E}}{\mu} \left(1 + A \frac{l}{r} \right) = 0,17 \cdot 10^{-11} \frac{1,64 \cdot 10^5}{31,3 \cdot 10^{-6}} \left(1 + \frac{10^{-7}}{r} \right) = \\ = 0,0089 \left(1 + \frac{10^{-7}}{r} \right) \quad (2.114)$$

Приймаємо $A=1$, $l=10^{-7}$ м

Питома площа поверхні осадження, що доводиться на 1 м³/с газів, що очищаються, м²·с/м³:

$$f = \frac{F_3}{V} = \frac{6885}{84,1} = 82, \quad (2.115)$$

де F_3 - загальна площа поверхні осадження, м².

Фракційні коефіцієнти очищення газів від пилу визначаються по формулі:

$$\eta_{\text{фр}} = 1 - e^{-fW_{\text{др}}} = 1 - e^{-82W_{\text{др}}}. \quad (2.116)$$

Таблиця 2.7 - Розрахункові параметри визначення ефективності електрофільтру.

Розмір часток, мкм.	<0,07	0,07-0,1	0,1-0,2	0,1-0,3	0,3-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1	>1
Середній радіус часток, мкм.	0,017	0,042	0,075	0,125	0,175	0,25	0,35	0,45	1
Швидкість дрейфу, м/с.	0,53	0,22	0,127	0,080	0,059	0,044	0,034	0,029	0,101
Коефіцієнт очищення	1	0,999	0,999	0,999	0,992	0,974	0,938	0,907	0,999

Загальний коефіцієнт очищення з урахуванням віднесення пилу при струшуванні електродів :

$$\eta' = \sum \frac{\eta_{\text{фр}} \Phi_{\text{фр}}}{100} = \frac{1 \cdot 0,4 + 0,999 \cdot 1,4 + 0,999 \cdot 11,2 + 0,999 \cdot 14 + 0,992 \cdot 14 + 0,974 \cdot 24 + 0,938 \cdot 13 + 0,907 \cdot 8 + 0,999 \cdot 14}{100} = 0,994$$

де $\Phi_{\text{фр}}$ - вміст часток фракцій, %.

Загальний коефіцієнт очищення з урахуванням віднесення пилу при струшуванні електродів ($K_{\text{ун}}=0,9$) :

$$\eta'' = 1 - \exp K_{\text{ун}} \cdot 2,31 \lg(1 - \eta') = 1 - \exp 0,9 \cdot 2,31 \lg(1 - 0,994) = 0,99 \quad (2.118)$$

Запиленість газів після електрофільтру:

$$Z_2 = Z_1(1 - \eta'') = 4(1 - 0,99) = 0,04 \text{ г/м}^3 \text{ або } 40 \text{ мг/м}^3. \quad (2.119)$$

Отримане значення кінцевої запиленості газів не перевищує норматив ГДВ= 50 мг/м³

2.4.3 Розрахунок агрегатів живлення

Ефективність електрофільтрів значною мірою визначається роботою агрегатів живлення.

Вибір апарату роблять по силі випрямленого струму, що вимагається, :

$$I = L \cdot i_0 = 10584,7 \cdot 0,169 \cdot 10^{-3} = 1,79 \text{ А}, \quad (2.120)$$

де L - сумарна активна довжина коронуючих електродів, що живляться від одного агрегату,

$$L = l \cdot n_d \cdot n_{ш} = 8 \cdot 24,1 \cdot 54,9 = 10584,7 \text{ м}, \quad (2.121)$$

де l - номінальна висота електродів, $l=8$ м;

n_d - кількість рядів по довжині одного поля, $n_d=24,1$;

$$n_d = \frac{L_1}{n \cdot S} + 1 = \frac{16660}{4 \cdot 180} + 1 = 24,1 \quad (2.122)$$

L_1 - довжина одного поля електрофільтру, $L_1=4165$ мм;

S - крок коронуючих електродів в ряду, $S=180$ мм;

$n_{ш}$ - кількість рядів по ширині, $n_{ш}=54,9$;

$$n_{ш} = \frac{B_1}{H_1} + 1 = \frac{14020}{260} + 1 = 54,9 \quad (2.123)$$

B_1 - ширина електрофільтру, $B_1=14020$ мм;

H_1 - відстань між сусідніми осадительними електродами, $H_1=260$ мм;

i_0 - лінійна щільність струму, $i_0=0,169 \cdot 10^{-4}$ А/м

Повна потужність споживана електрофільтром:

$$N = \left(\frac{U_a \cdot I_{cp} \cdot K_{\phi} \cdot \cos\varphi}{1,41 \cdot \eta} \right) + N_1 = \frac{80 \cdot 10^3 \cdot 1,72 \cdot 1,2 \cdot 0,83}{1,41 \cdot 0,94} + 2000 = 122000 \text{ Вт} = 122 \text{ кВт},$$

де U_a - амплітудна напруга, кВ;

I_{cp} - середня сила струму корони, А;

K_{ϕ} - коефіцієнт форми випрямленого струму, $K_{\phi}=1,2$;

η - коефіцієнт корисної дії агрегату, $\eta=0,94$ [10];

$\cos\varphi$ - коефіцієнт потужності, $\cos\varphi=0,83$ [10];

N_1 - потужність, споживана механізмами струшувань і обігрівом ізоляторних коробок, $N_1=2000$ Вт.

За величиною випрямленого струму і споживаної потужності вибираємо агрегат живлення серії АТПОМ- 1600[10].

2.4.4 Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту

Розраховуємо повний опір газовідвідного тракту відповідно до рис. 2.8, Па:

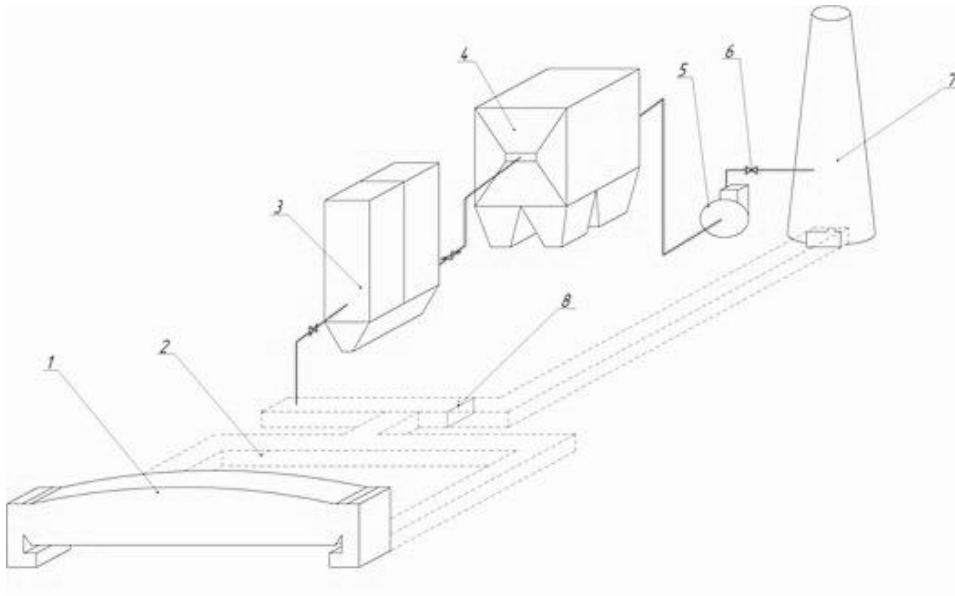
$$\Delta P = \Delta P_{\text{кот.ут.}} + \Delta P_{\text{р.ф.}} + \Delta P_{\text{с.в.2}} + \Delta P_{\text{газов.}}, \quad (2.125)$$

де $\Delta P_{\text{кот.ут.}}$ – опір котла-утилізатора, Па;

$\Delta P_{\text{р.ф.}}$ – опір рукавного фільтра, Па;

$\Delta P_{\text{газов.}}$ – опір газопроводів, Па.

Сумарні втрати тиску (енергії 1 м^3 газу) складаються з втрат тиску на тертя по довжині трубопроводу $\Delta p_{\text{тр}}$ і втрат тиску на місцевих опорах $\Delta p_{\text{м}}$:



1 – мартенівська піч; 2 – боров; 3 – котел-утилізатор; 4 – рукавний фільтр;

5 – вентилятор; 6 – засувка; 7 - димова труба; 8 – аварійне газовідведення

Рисунок 2.8 – Схема розрахунку аеродинаміки газовідвідного тракту

$$\Delta p = \sum_{i=1}^m \Delta p_{mp i} + \sum_{i=1}^m \Delta p_{m i}, \quad (2.126)$$

де i – номер розрахункової ділянки;

m – кількість розрахункових ділянок.

Втрати тиску на тертя по довжині розрахункової ділянки (лінійні втрати) визначають за формулою Дарсі-Вейсбаха, Па:

$$\Delta p_{mp i} = \lambda_i \times \frac{l_i}{d_{ei}} \times \rho_{gi} \times \frac{w_i^2}{2}. \quad (2.127)$$

де λ_i – коефіцієнт гідравлічного тертя (безрозмірний).

Коефіцієнт гідравлічного тертя залежить від двох безрозмірних параметрів: числа Рейнольдса Re_i і відносної шорсткості $\frac{k_{ei}}{d_{ei}}$.

Число Рейнольдса визначають за формулою:

$$Re_i = \frac{w_i \times d_{ei}}{\nu_i}. \quad (2.128)$$

де w_i - швидкість газу в газоході, м/с;

d_{ei} - діаметр газоходу, м.

При визначенні діаметрів газоходів швидкість і об'ємна витрата газів повинні бути підібрані так, щоб на всіх ділянках і відгалуженнях газоходу вони були відносно однаковими.

Діаметр газоходу визначається по формулі:

$$d = \sqrt{\frac{V}{w}}, \quad (2.129)$$

де w - швидкість газів у газоході, м/с.

Відомо, що рух газів в газоході відбувається у області «гідравлічно шорстких» труб (автомодельна чи область зона квадратичної залежності) за умови $Re_i \times \frac{k_{ei}}{d_{ei}} > 500$, тоді для визначення коефіцієнту гідравлічного тертя

використовують наступну формулу:

$$\lambda_i = 0,11 \times \left(\frac{k_{ei}}{d_{ei}} \right)^{0,25}. \quad (2.130)$$

Втрати тиску на тертя в газоході рівні сумі втрат на окремих розрахункових ділянках:

$$\Delta p_{mp} = \sum_{i=1}^m \Delta p_{mp\ i}. \quad (2.131)$$

Результати розрахунків заносимо у таблицю 2.5.

Втрати тиску на місцевих опорах визначають по формулі Вейсбаха, Па:

$$\Delta p_{mi} = \zeta_i \times \rho_{gi} \times \frac{v_i^2}{2}, \quad (2.132)$$

де ζ_i – коефіцієнт місцевого опору, що залежить від його виду, форми трубопроводу, розмірів перешкод на шляху потоку.

Втрати тиску на місцевих опорах у газоході дорівнюють сумі втрат на окремих розрахункових ділянках, Па:

$$\Delta p_m = \sum_{i=1}^m \Delta p_{mi}, \quad (2.133)$$

Значення ζ для окремих видів місцевих опорів приймаємо відповідно до [14,15]. Злиття потоків у симетричному трійнику - значення коефіцієнтів віднесені до швидкості в збірному каналі. Розподіл потоків у симетричному трійнику - значення коефіцієнтів віднесені до каналу до розділення потоків.

Результати аеродинамічного розрахунку газовідвідного тракту, з урахуванням гідравлічних опорів газоочисних апаратів наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 –Результати аеродинамічного розрахунку системи газоочищення мартенівських газів

Ділянка	t _{ср} , °C	Q _{р.у.} , м ³ /с	ρ _г , кг/м ³	Геометричні параметри			Втрати тиску					
				l, м	d, м	U, м/с	Місцеві опори	ξ	ΔP _м , Па	ΔP _т , Па	ΣΔP, Па	
Газовий тракт від мартенівської печі до котла-утилізатора (в т.ч. котел-утилізатор)	750	155,90	0,329									4000
Котел-утилізатор- електрофільтр	200	78,42	0,671	35	2,2	20,64	вхід в канал 2 секційних коліна на 90° - дифузор засувка	0,5 0,78 0,1 0,52	404,71	45,48	450,19	
електрофільтр												250
Від електрофільтру до вентилятору	190	75,5	0,697	21	2,2	19,87	конфузор 2 секційних коліна на 90° - дифузор	0,05 0,78 0,1	183,59	26,27	209,86	
вентилятор – димова труба	190	75,5	0,697	3,0	2,2	19,87	конфузор секційне коліно 90° засувка	0,05 0,52 0,39	78,42	3,75	82,17	
ΔP _{заг1} =4992,27												
Димова труба	190	75,5	0,697									P _{дод} =-111,84 Па
ΔP _{заг2} =4880,43 Па												

2.4.5 Розрахунок димової труби

Самотяга з'являється на ділянці, початок і кінець якого знаходиться на різній висоті й обумовлюється різницею густин нагрітих газів і зовнішнього повітря. Самотяга вважається позитивною при русі газів нагору по каналу і негативною – при русі газів униз по каналу.

Опір на вході в димову трубу:

$$\Delta p_{\text{вх.тр}} = \lambda \cdot \frac{H_{\text{тр}}}{d_{\text{тр}}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot \frac{w_{\text{уст}}^2}{2} \quad (2.134)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного опору по довжині труби, приймаємо 0,017;

$H_{\text{тр}}$ – висота димової труби, дорівнює 80 м;

$W_{\text{уст}}$ – швидкість в гирлі димової труби, дорівнює 18 м/с;

$\rho_{\text{г}}$ – густина газів перед димовою трубой, 0,697 кг/м³.

$$\Delta p_{\text{вх.тр}} = 0,017 \cdot \frac{80}{5,4} \cdot 0,697 \cdot \frac{18^2}{2} = 28,44 \text{ Па}$$

Опір на виході з димової труби:

$$\Delta p_{\text{вих. тр}} = \zeta_{\text{вих}} \times \rho_{\text{г}} \times \frac{w_{\text{уст}}^2}{2} \quad (2.135)$$

де $\zeta_{\text{вих}} = 1,15$ – коефіцієнт гідравлічного опору на виході з труби.

$$\Delta p_{\text{вих. тр}} = 1,15 \cdot 0,697 \cdot \frac{18^2}{2} = 129,86 \text{ Па}$$

Динамічний тиск, що необхідно створити для швидкості газу у гирлі труби $W_{\text{уст}} = 18$ м/с:

$$\Delta p_{\text{д}} = \rho_{\text{г}} \times \frac{w_{\text{уст}}^2}{2} \quad (2.136)$$

$$\Delta p_{\text{д}} = 0,697 \times \frac{18^2}{2} = 112,914 \text{ Па}$$

Сумарний тиск:

$$P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{вх.тр.}} + \Delta P_{\text{вих.тр.}} + P_{\text{д}} = 28,44 + 129,86 + 112,914 = 271,214 \text{ Па}$$

Розрахунок тяги, що створюється трубою (Самотяга):

$$P_c = (\rho_{\text{атм}} - \rho_{\Gamma}) \cdot q \cdot H_{\text{тр}}, \quad (2.137)$$

де $\rho_{\text{атм}}$ – густина повітря за даних умова, кг/м^3 :

$$\rho_{\text{атм}} = \rho_0 \frac{273 B}{(273 + t_{\text{ос}}) B_{\text{ст}}}, \quad (2.138)$$

де ρ_0 – густина повітря за нормальних умов, кг/м^3 , $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$;

$t_{\text{ос}}$ – температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$, приймаємо 25°C ;

$B_{\text{ст}}$ – стандартний тиск, $B_{\text{ст}} = 101,3 \text{ кПа}$;

$$\rho_{\text{атм}} = 1,293 \frac{273 \cdot 101,3}{(273 + 25)101,3} = 1,185 \text{ кг/м}^3$$

Тоді самотяга труби становить:

$$P_c = (1,185 - 0,697) 9,81 \cdot 80 = 382,98 \text{ Па.}$$

Потреба у додатковому тиску:

$$P_{\text{дод.}} = P_c - P_{\Sigma} = 271,14 - 382,98 = -111,84 \text{ Па}$$

Так як $P_{\text{дод.}} < 0$, то цю величину додаємо до опору газовідвідного тракту в зв'язку з тим, що тягодуттєвий агрегат повинен мати додатковий тиск для транспортування газу через димову трубу із заданою швидкістю. Тоді повне розрахункове опір газовідвідного тракту:

$$\Delta P = 4992 - 112 = 4880 \text{ Па.}$$

2.4.6 Вибір тягодуттєвого обладнання

Димосос вибираємо на основі аеродинамічного розрахунку газовідвідного тракту. Продуктивність Димососу Q_d приймаємо з запасом 10% [14] незалежно від температури газів, але з поправкою на барометричний тиск $p_{\text{бар}} = 101,3 \text{ кПа}$:

Тиск, що створюється димососом (розрідження), приведене до умов каталогу, по якому вибирається Димосос $\Delta p_{\text{кат}}$, приймається рівним [15]:

$$\Delta p_{\text{кат}} = \beta_2 \cdot \Delta p_p \cdot K_p \quad (2.139)$$

де β_2 – коефіцієнт запасу тиску. Приймаємо коефіцієнт запасу тиску $\beta_2=1,2$ [15];

Δp_p – сумарний опір газовідвідного тракту, отриманий в результаті аеродинамічного розрахунку $\Delta p_p = 4880$ Па.

K_p – коефіцієнт перерахунку.

Коефіцієнт K_p визначається по формулі [15]:

$$K_p = \frac{\overline{T_{zi}}}{T_x} \cdot \frac{101,3}{P_{бар}} \cdot \frac{\rho_{0zi}}{\rho_{0в}}, \quad (2.140)$$

де T_x – абсолютна температура, для якої складена характеристика вентилятора, К;

$\overline{T_{zi}}$ – середня абсолютна температура газу на останній розрахунковій ділянці газоходу, К. $\overline{T_{zi}} = (\overline{t_{zi}^0} + 273)$;

ρ_{0zi} – густина газу при НФУ на останній розрахунковій ділянці, кг/м³;

$P_{бар}$ – атмосферний тиск, кПа;

$\rho_{0в}$ – щільність повітря при нормальних фізичних умовах (НФУ), кг/м³.

Середня температура газу на розрахунковій ділянці перед димотягом $\overline{t_z} = 77$ °С.

Тоді:

$$K = \frac{(273 + 190)}{(273 + 30)} \cdot \frac{101,3}{101,3} \cdot \frac{0,697}{1,293} = 0,823$$

Визначаємо тиск, якій створює димосос, приведений до умов каталогу:

$$\Delta p_{кат} = 1,2 \cdot 4880 \cdot 0,823 = 4820 \text{ Па}$$

Продуктивність Димососу Q_d приймаємо з запасом 10% незалежно від температури газів[2],:

$$Q_d = 1,1 \times Q_p \times \frac{101,3}{P_{бар}} \quad (2.141)$$

На останній розрахунковій ділянці, де встановлюємо димотяг,

$$Q_p = 75,45 \text{ м}^3/\text{с} = 271800 \text{ м}^3/\text{год. за робочих умов.}$$

Тоді

$$Q_0 = 1,1 \times 271800 \times \frac{101,3}{101,3} = 298980 \text{ м}^3/\text{Год.}$$

Обираємо вентилятор типу ВМ-160/850. Технічні характеристики:

Тип електродвигуна:	ДАЗО
Робочий тиск, Па:	6546
Продуктивність, м ³ /год:	319000
Потужність двигуна, кВт:	630
Частота обертання двигуна, об/хв:	980
Макс. температура переміщуваного повітря, °С:	250
Максимальний ККД, η_{\max} (%):	72

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Мартенівське виробництво пов'язане з високими температурами, утворенням великої кількості вибухонебезпечних і отруйних газів, рідких продуктів плавки, з пересуванням великої кількості вантажів і насиченістю механічним і електричним устаткуванням [19].

Джерелами випромінювань на даному виробництві є факел полум'я, нагріта до високої температури вогнетривка футеровка внутрішнього простору печі й поверхня розплавленого металу й шлаків, вплив яких проявляється при відкритих вікнах печі. Крім того, джерелами випромінювань є чавун, що заливається, рідкий шлак, розплавлений метал при випуску й розливанню сталі. Усі джерела мають температуру, що перевищує 500 °С, тому спектр випромінювання містить світлові та інфрачервоні промені. Інтенсивність опромінення на робочих місцях від 0,01 до 10,5 кВт/м², при нормативному значенні 140 Вт/м², ДСН 3.3.6.042-99 [24].

Інфрачервоні випромінювання впливають на функціональний стан людини, його центральну нервову систему, серцево-судинну систему. Відзначається різке частішання серцебиття, підвищення максимального й зниження мінімального артеріального тиску, частішання подиху, підвищення температури тіла й посилення потовиділення, захворюваність серцево-судинної системи й органів травлення. Світлові випромінювання можуть викликати цілий ряд патологічних змін у стані очей.

У мартенівському цеху утворюється й виділяється у виробниче приміщення велика кількість пилу. Основним джерелом є мартенівська піч. У зоні пічного прольоту концентрація пилу досягає 180,3 мг/м³. Джерелом її потрапляння в робочу зону є також негерметичність устаткування при

проведенні операцій по завалці шихти. Нормативний вміст пилу в повітрі робочої зони становить 4 мг/м^3 .

Проникаючи в організм при подиху, через пори шкіри, пил може викликати різні професійні захворювання. Мартенівський пил відноситься до пилу неорганічного походження. До її складу входять залізо, хром, нікель, марганець, мідь. Ці речовини, залежно від концентрації, можуть впливати на організм працюючого.

У ході технологічного процесу також виділяються газоподібні шкідливі речовини. Основним джерелом забруднення повітряного середовища цеху газовими виділеннями є мартенівська піч. При вибиванні полум'я з-під заслінок вікон, відкриванні вікон печі, а також при випуску й розкисленні сталі з робочого простору печі та з ковшу виділяються гази.

У повітря робочої зони попадають наступні газоподібні речовини: CO , SO_2 , NO і ін. Оксид вуглецю (II) є продуктом неповного згоряння палива або утворюється в результаті фізико-хімічних реакцій у процесі плавки. CO надходить в організм людини через дихальні шляхи. Через утворення карбоксигемоглобіну різко знижується здатність крові переносити кисень до тканин, може настати кисневе голодування. Головним чином, це впливає на функції центральної нервової системи. Сірчаний ангідрид має дратівну дію. При контакті з біологічними органами він викликає запальну реакцію, причому в першу чергу страждають органи подиху, шкіра й слизові оболонки ока.

Оксид азоту (II) попадає в організм через дихальні шляхи й утворює в крові метгемоглобін. У робітників може виникнути кашель, задуха, задишка. У важких випадках може розвинути набряк легенів. Спостерігаються також головні болі, серцева слабкість.

Джерелами постійних шумових навантажень є віброживильники, пластинчасті конвеєра, вентиляційні установки, мотор-генератор машинних залів, витік повітря, різні звукові сигнали і т.д. Рівень шуму на робочому місці

сталевара становить 96 дБА, при нормативі 80 дБА, ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ та ДСН 3.3.6.037-99 [24].

Оцінка факторів виробничого середовища й трудового процесу для сталевара в мартенівському цеху наведена в табл.3.1.

Таблиця 3.1 - Оцінка факторів виробничого середовища й трудового процесу (робоче місце – пічний проліт, професія - сталевар)

№П	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Нормати вне значення (ГДК, ГДУ)	Фактич. значення	III клас Шкідливі і небезпечні умови и характер труда			Тривалість дії фактора за зміну, %
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ : I клас: Cr Ni Mn 3 клас: CO SO ₂ NO	0.01 0.05 0.05 2.0 10.0 5.0	0.059 0.015 0.27 7,4 28,5 35.5	- - - 2,85 p	- 5,4p 7.1p	11.6p 13,7p	80 80 80 80 80 80
2	Пил фіброгенної дії, мг/м ³	4	180,3	-	-	45,1p	80
3	Шум, дБА	80	96	-	-	16	80
4	Мікроклімат в приміщенні (в теплий період): -температура повітря, °С -швидкість руху повітря, м/с -відносна вологість повітря, % інфрачервоне випромінювання, Вт/м ²	27 0.6 <70 140	41 0,47 40-50 5220	- 1.28 - -	- - - -	14 - - 5220	80 80 80 80
5	Важкість і напруженість праці	Середньої важкості, дуже напружена (III).					

Таким чином, згідно з гігієнічною класифікацією праці на умови праці сталевара в мартенівському цеху найбільший вплив виявляє такі фактори, як пил і тепловий випромінювання, температура, газоподібні виділення (III ступінь шкідливості й небезпеки).

3.2 Заходи з поліпшення умов праці

При виконанні деяких операцій мартенівського процесу виникає шум механічного, аеродинамічного й термічного походження (рух кранів, завалочних машин, рух газових потоків у печі й газоходах і т.п.), що вимагає забезпечення захисту персоналу. Рівень шуму на робочому місці сталевара перевищує норму на 16 дБА. Шкідливий вплив шуму виражається в порушенні функції слуху й змінах нервової системи в результаті її перенапруги. Робота в умовах сильного шуму може викликати головний біль, запаморочення, ослаблення уваги до навколишнього оточення, нерідко знижує гостроту сприйняття сигналів. Особливу небезпека являє собою спільний вплив шуму й вібрації, яке може привести до захворювань серцево-судинної системи, розширенню вен, захворюванню плечових суглобів і до інших порушень.

Для захисту робітників від шуму в мартенівському цеху звукоізолюють вбудовані приміщення – головні пости керування, приміщення обчислювального центру, кімнати відпочинку. Для зниження шуму агрегатів використовують звукоізолюючі кожухи, у які розміщують весь агрегат або його вузли [22]. Ослаблення шуму газо- та повітропроводів досягають плавністю руху повітряного потоку, плавними переходами в місцях зміни напрямку трубопроводу, застосуванням глушителей. Над устаткуванням, яке шумить, підвішують штучні звукопоглиначі – плоскі або об'ємні звукопоглинальні елементи.

Для індивідуальних засобів захисту органів слуху застосовують противошуми (антифони), зовнішні й внутрішні. Зовнішні противошуми (шумозахисні навушники) прикривають вушну раковину. Внутрішні

(заглушки, вкладиші) вставляють у зовнішній слуховий прохід. По роду матеріалу внутрішні противошуми бувають м'які й тверді. М'які виготовляють із губки, вати, марлі; іноді їх просочують маслами, воском, смолами, парафіном і т.д., тверді – із пластмас, ебоніту, гуми.

Шкідливий вплив на організм людини теплових випромінювань в умовах мартенівського цеху значно вище, чим в інших цехах. Для захисту від теплових випромінювань і створення необхідних умов праці застосовують: теплову ізоляцію поверхонь, що випромінюють тепло; прискорене проведення операцій, пов'язаних з відкриванням вікон, заливанням чавуну, скачуванням шлаку, випуском і розливанням сталі; екранування робочих місць; природню й механічну вентиляцію; водорозпилення на робочих місцях; спецодяг і інші засоби індивідуального захисту.

3.3 Виробнича санітарія

Внаслідок виділення великої кількості надлишкового тепла в мартенівському цеху потрібен значний повітрообмін, особливо в літню пору.

У мартенівському цеху передбачаються наступні системи опалення:

а) централізована система опалення з місцевими нагрівальними приладами повітронагрівачів, електроприміщень, гідроустановок і радіаторами РСГ -2 у кімнаті відпочинку.

б) парова система опалення чергового з місцевими нагрівальними приладами – регістрами із гладких труб у приміщеннях гідравлічної станції керування механізмами та маслонасосами.

Вентиляція є ефективним засобом забезпечення потрібних гігієнічних якостей повітря. У мартенівському цеху для припливу зовнішнього повітря влаштовані прорізи в зовнішніх стінах, причому низ прорізів перебуває на висоті 2 м. Для збільшення теплового тиску на будинку перебувають витяжні шахти. На витяжних шахтах установлені дефлектори, що дозволяють збільшити повітрообмін за рахунок вітрового напору. У мартенівському цеху

застосовуються також механічну загальнообмінну припливно-витяжну вентиляцію теплонадлишків з подачею повітря в усі вбудовані приміщення ливарного двору, скіпового підйомника, маслonaсосну, електроприміщення повітрянагрівачів [21]. У місцях постійного перебування робітників, що зазнають впливу теплової радіації інтенсивністю 140 Вт/м^2 і більш застосовується повітряне душення.

Значення нормованих параметрів повітряного середовища в робочій зоні виробничих приміщень наведено в таблиці 3.2,

Таблиця 3.2- Значення нормованих параметрів повітряного середовища в робочій зоні виробничих приміщень

Період року	Категорія робіт	Температура, °С				Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
		Верхня межа		Нижня межа			
		Постій.	Непостій.	Постій.	Непостій.		
Холодний	Важка	19	20	13	12	75	< 0,5
Теплий	Важка	26	28	15	13	65	0,2...0,6

3.4 Електробезпека

За технологічними вимогами і за умовами безпеки найбільш оптимальною для мартенівського цеху є чотиридротова мережа із глухозаземленою нейтраллю, тому що вона дозволяє використовувати дві робочі напруги - лінійне й фазне. Від чотиридротової мережі 380 В можна жити як силове навантаження трифазне або однофазне, включаючи її між фазними проводами на лінійну напругу 380 В, так і освітлювальну, включаючи її між фазним і нульовим проводами, тобто на фазну напругу 220 В. При цьому досягається значне здешевлення електроустановки в цілому, завдяки застосуванню меншого числа трансформаторів, меншого перетину проводів і т.п.

По мірі небезпеки ураження людей електричним струмом мартенівський цех відноситься до категорії - особливо небезпечні приміщення, оскільки в

ньому використовується багато електроустаткування; виробничі приміщення характеризуються підвищеною температурою повітря, значним вмістом в них провідного пилю; підлоги цеху мають струмопровідні властивості; є постійна небезпека одночасного дотику людини з металоконструкціями і частинами електроустановок, НПАОП 40.1-1.01-97.

У зв'язку з великим числом металоконструкцій, а також з виділенням пилю, газів і підвищеними температурами до пристрою і експлуатації електроустановок і електромереж мартенівських цехів пред'являються підвищені вимоги.

У процесі роботи робітники мартенівського цеху контактують з електроосвітлювальним устаткуванням, що пов'язане з небезпекою ураження електричним струмом. При розташуванні електросвітильників нижче 2,5 м від рівня підлоги або робочих майданчиків виникає небезпека дотику до їхньої арматури. У зв'язку із цим потрібно заземлювати арматури світильників напругою більш 110 В, а в приміщеннях з підвищеною небезпекою й особливо небезпечних повинне застосовуватися напруга не більш 42 В. Переносні світильники також повинні бути під напругою не вище 42 В, а при наявності особливо несприятливих умов, наприклад при роботі в металевих резервуарах, усередині барабанів, дробарок і т.п., застосовується напруга не більш 12 В. Переносні лампи повинні бути укладені в безпечну арматури, а струмопровідні дроти забезпечуються надійною ізоляцією.

3.5 Пожежна безпека

Мартенівський цех відноситься до категорії Г, клас зони П-1, ступінь вогнестійкості III [34]. Основні ділянки та виробничі приміщення мартенівського цеху поділяють на:

1) пожежонебезпечні приміщення, у яких застосовують або зберігають горючі речовини. До класу П-відносяться пічний і розливний прольоти. Підсобні приміщення можна віднести до класу П-1а.

2) вибухонебезпечні приміщення, у яких при нормальних повільних режимах роботи виділяються горючі гази або пари, здатні утворювати з повітрям або іншими окиснювачами вибухонебезпечні суміші. Сюди можна віднести приміщення газоочищення – В – 1а.

Для запобігання пожеж виробничі приміщення різних категорій відділені друг від друга, а також від галерей транспортерів, коридорів і сходових маршів протипожежними стінами. Передбачені проектом прорізи в протипожежних стінах захищені протипожежними дверима, обладнаними пристроями для самозачинення .

При пожежі великою небезпекою є продукти горіння , що отруюють, що містять і вибухонебезпечні речовини. Для їх видалення створюються димові люки, які забезпечують направлене видалення диму, незадимленість суміжних приміщень, полегшують виявлення вогнища пожежі.

Для гасіння пожеж застосовують у мартенівському цеху ВВП-12 – 1 шт.; ВВ-5 і ВВ-8 – 6 шт [33].

У всіх виробничих приміщеннях мартенівського цеху передбачене мінімум два евакуаційні виходи. Будівля мартенівського цеху обладнана блискавкозахистом.

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО - ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЕКТУ

4.1 Організація роботи на ділянці пиловловлювання та газоочищення

Організація керування спрямована на координування діяльності колективу цеху та окремих працівників, внаслідок чого збільшується продуктивність праці, ефективність виробництва.

Організація роботи на ділянці газоочищення містить у собі визначення состава працівників і змісту їх професійних функцій у виробничому процесі.

Виробничий майстер газоочисної установки (ГОУ) є адміністративно-технічним керівником робітників-технологів своєї ділянки, підпорядковується начальникові зміни й усі питання, що виникають у процесі виробництва, вирішує самостійно. Оператор ГОУ стежить за забезпеченням ефективної безперебійної роботи газовловлювальної установки цеху, контролює дотримання технологічних параметрів і процесів, виявляє й усуває причини й порушення, забезпечує повне завантаження й правильне використання устаткування, утримання його в справному стані, а також належний порядок і чистоту на робочих місцях і прилягаючої до ділянки території.

Робітники по обслуговуванню газоочисної установки працюють по безперервному 3-х змінному 4-х бригадному графіку.

4.2 Розрахунок робочої програми ділянки газоочищення

Проводимо економічне порівняння двох варіантів очищення газів, що утворюються при виплавці сталі в мартенівській печі.

Базовим варіантом є одноступінчаста схема очищення, що полягає з котла-утилізатора КУ, з 10-ти труб Вентурі типу ГВПВ – 0,060 щільного перетину з горловиною розміром 280 мм, двох краплевловлювачів відцентрового типу (КЦТ-2400) діаметром 2400 мм, призначених для вловлювання краплинної вологи й пилу. У якості побудника тяги

використовують вентилятори марки ДН-21. Вони слугують для відсмоктування технологічних газів від печі й подачі їх на газоочищення. Вентилятори встановлені після труб Вентурі й краплевловлювачів. Початкова запиленість газів становить 4 г/м^3 , кінцева запиленість становить $0,1 \text{ г/м}^3$. Ступінь очищення газів від дрібнодисперсного пилу за такою схемою 97,5%.

Проектний варіант передбачає очищення від пилу. Очищення від пилу проводиться в електрофільтрі ЕГА1-40-7,5-4-4. Початкова запиленість газу 4 г/м^3 , кінцева запиленість $0,040 \text{ г/м}^3$. Ефективність очищення становить 99 %. Збудником тяги слугує вентилятор типу ВМ-160/850

Виробничі процеси ділянки газоочищення тісно пов'язані з виробничими процесами виплавки сталі.

Відповідно графіку поточних оглядів і капітальних ремонтів основного устаткування складається графік проведення оглядів і ремонтів устаткування газоочисної установки, з якого розраховується кількість днів і годин простою устаткування на огляди й для заміни зламаних деталей. Потім розраховується робота устаткування з урахуванням простоїв. Результати розрахунків зводимо в таблицю 4.1.

Ефективний фонд часу роботи газоочисної установки:

$$T_{\text{ЕФ}} = T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{РЕМ}}, \text{ год}$$

де $T_{\text{КАЛ}}$ – календарний час роботи, год;

$T_{\text{РЕМ}}$ – простої на плановий ремонт, год.

Коефіцієнт використання установки в часі:

$$K_{\text{ВИК}} = \frac{T_{\text{ЕФ}}}{T_{\text{КАЛ}}}, \quad (4.1)$$

Річна продуктивність газоочисної установки:

$$П = N \cdot T_{\text{ЕФ}}, \text{ м}^3 \quad (4.2)$$

де N – технічна норма продуктивності основного агрегату очисної установки в одиницю часу, $\text{м}^3/\text{год}$ (н.у.);

$T_{\text{ЕФ}}$ – річний фонд ефективного часу роботи газоочисної установки, год.

Таблиця 4.1 – Баланс робочого часу газоочисної установки

Показники	Одиниці виміру	Варіант	
		Базовий	Проектний
Режим роботи газоочисної установки	—	Безперервний	Безперервний
Календарний час роботи, $T_{КАЛ}$	Дні Години	365 $365 \cdot 24 = 8760$	365 $365 \cdot 24 = 8760$
Простоювання на плановий ремонт, $T_{РЕМ}$	Дні Години	15 $24 \cdot 15 = 360$	15 $15 \cdot 24 = 360$
Ефективний фонд часу, $T_{ЕФ}$	Дні Години	$365 - 15 = 350$ $8760 - 360 = 8400$	$365 - 15 = 350$ $8760 - 360 = 8400$
Коефіцієнт використання устаткування, $K_{ВИК}$	—	$\frac{350}{365} = 0.959$	$\frac{350}{365} = 0.959$

По базовому варіанту:

Технічна продуктивність основного устаткування становить 125000 м³/год (н.у.), тоді

$$П = 125000 \cdot 8400 = 1,05 \cdot 10^9 \text{ м}^3,$$

Технічна продуктивність електрофільтру становить 125000 м³/год (н.у.), тоді

$$П = 125000 \cdot 8400 = 1,05 \cdot 10^9 \text{ м}^3.$$

Кількість вловленого пилу з газу, який очищується:

$$Q = \frac{(Z_1 - Z_2) \cdot П}{10^6}, \text{ т} \quad (4.3)$$

де Z_1 – запиленість газу до очистки, г/м³;

Z_2 – запиленість газу після очистки, г/м³.

По базовому варіанту:

$$Q = \frac{(4 - 0.1) \cdot 1,05 \cdot 10^9}{10^6} = 4095.0 \text{ т/рік}$$

По проектному варіанту:

$$Q = \frac{(4 - 0.040) \cdot 1,05 \cdot 10^9}{10^6} = 4158,0 \text{ т/рік}$$

Приймаємо втрати вловленого продукту при утилізації в базовому та проектному варіантах 10 %:

$$Q_{\text{вт}} = 0,9 \cdot Q, \text{ т} \quad (4.4)$$

По базовому варіанту:

$$Q_{\text{вт}} = 0,9 \cdot 4095,0 = 3685$$

По проектному варіанту:

$$Q_{\text{вт}} = 0,9 \cdot 4158 = 3742 \text{ т.}$$

Витрата води на газоочищення.

Розраховуємо тільки для базового варіанта, так як в проектному варіанті використовується суха система очищення, тому там вода не використовується.

$$Q_{\text{ж}} = Q_{\text{Г}} \cdot m \cdot T_{\text{ЕФ}}, \text{ м}^3/\text{ГОД} \quad (4.5)$$

де $Q_{\text{Г}}$ – витрата води за робочих умов, $\text{м}^3/\text{год}$;

m – питоме зрошення у трубах Вентурі, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

$$Q_{\text{ж}} = 282312 \cdot 0,001 \cdot 8400 = 2371420,8 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Результати розрахунку заносимо до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Виробнича програма ділянки газоочистки

Показник	Одиниці виміру	Варіант	
		Базовий	Проектний
Річна продуктивність, П	тис. м^3	$1050 \cdot 10^6$	$1050 \cdot 10^6$
Технічна норма продуктивності, N	тис. $\text{нм}^3/\text{год}$	125	125
Початкова запиленість, Z_1	$\text{г}/\text{м}^3$	4	4
Кінцева запиленість, Z_2	$\text{г}/\text{м}^3$	0,1	0,040
Кількість вловленого пилю, Q	т	4095	4158
Кількість утилізованого пилю, $Q_{\text{ут}}$	т	3685	3742
Витрата води на очищення, $Q_{\text{ж}}$	тис. $\text{м}^3/\text{год}$	2371,42	—

Різниця в кількості уловленого пилю в базовому і проектному варіантах становить 57 т/рік. В проектному варіанті на очищення не використовують воду, тому буде відбуватися економія коштів.

4.3 Розрахунок чисельності основних робітників ділянки газоочищення

Графік роботи в проектному варіанті 3-х змінний 4-х бригадний, тривалість робочого дня 8 годин.

Календарний фонд часу одного робітника становить

$$T_k = D = 365; \quad (4.6)$$

$$T_k^y = D \cdot t_{зм} \quad (4.7)$$

Кількість вихідних днів у році дорівнює:

$$T_{вих} = \frac{T_{кал} \cdot n_{вих}}{n_{бр}} = \frac{T_{кал} \cdot (n_{бр} - n_{зм})}{n_{бр}}, \quad (4.8)$$

Режимний фонд робочого часу визначається вирахуванням з календарного часу числа неробочих днів згідно з графіком вихідних:

$$T_{ном} = T_{кал} - T_{вих}, \quad (4.9)$$

Корисний фонд робочого часу визначаємо з виразу:

$$T_{еф} = T_{ном} - T_{невих}, \quad (4.10)$$

де $T_{невих}$ – невиходи на роботу у зв'язку з відпусткою, хворобою та іншими причинами, дні

Коефіцієнт списочності $K_{сп}$ враховує резерв робітників, необхідних для заміни людей, що знаходяться у відпустці, хворіють, вчаться, які виконують державні обов'язки, і визначається діленням номінального часу роботи на ефективний:

$$K_{сп} = \frac{T_{ном}}{T_{еф}}, \quad (4.11)$$

Результати розрахунку зводимо в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 - Баланс робочого часу робітника

Елементи балансу	Од. вим.	Проектний	
		Базовий	Проектний
Календарний час, $T_{кал}$	дні години	365 2920	365 2920
Вихідні дні $T_{вих}$	дні години	92 736	92 736
Номінальний час $T_{ном}$	дні години	273 2184	273 2184
Невиходи на роботу $T_{невих}$			
- тарифна відпустка	дні	30	30
- учнівська відпустка	дні	0.5	0.5
- захворювання	дні	5	5
- прочі	дні	0.5	0.5
Всього невиходів	дні	36	36
Ефективний час $T_{эф}$	дні години	237 1896	237 1896
Коефіцієнт списочності		1.152	1.152

Розраховуємо кількість робочих для обслуговування котла утилізатору, електрофільтру та вентилятора.

Розраховуємо кількість робітників для обслуговування електрофільтру, який складається з 4 секцій:

1) час обслуговування 1 умовної одиниці: $t_0 = 1,2$ чол-год.

2) час обслуговування однієї секції:

$$t = t_0 \cdot K_2, \text{ чол-год} \quad (4.12)$$

де t_0 – час обслуговування однієї умовної одиниці, чол-год;

K_2 – коефіцієнт, який знаходиться за формулою:

$$K_2 = 1.1^m \quad (4.13)$$

де m – кількість умовних одиниць в апараті, шт.

$$K_2 = 1.1^4 = 1.46, \text{ тоді}$$

$$t = 1,2 \cdot 1,46 = 1,6 \text{ чол-год.}$$

Сумарний час обслуговування димотягу: $T_{дим} = 0,9$

3) сумарний середньозмінний час обслуговування роботи установки:

$$T_{уст} = T_{р.ф.} + T_{дим}, \text{ чол-год/зм} \quad (4.14)$$

$$T_{уст} = 1,6 + 0,9 = 2,5 \text{ чол-год/зм.}$$

4) змінна загально-явочна чисельність обслуговуючого персоналу визначається за формулою:

$$Ч_{яв} = \frac{T_{уст}}{l} \cdot \frac{S}{L}, \text{ чол-год/зм} \quad (4.15)$$

де l – задана тривалість зміни, год.;

S – тривалість тижневого циклу роботи обладнання, год.;

L – тривалість робочого тижня, год.

При безперервному 3-х змінному 4-х бригадному графіку:

$$Ч_{яв} = \frac{2,352}{8} \cdot \frac{6,73 \cdot 24}{7 \cdot 24} = 0,283,$$

Приймаємо $Ч_{яв} = 1$ чоловік в зміну. Оскільки людина буде навантажена лише на 30% від свого робочого часу, то в її обов'язки додатково включаємо відповідальність за обслуговування котла-утилізатору.

Добовий склад, чол.:

$$Ч_{доб} = Ч_{яв} \cdot n_{зм}, \quad (4.16)$$

де $n_{зм}$ – кількість робочих змін на добу.

$$Ч_{доб} = 1 \cdot 3 = 3, \text{ чол.}$$

Штатний склад основний робочих ділянки газоочистки дорівнює, чол.:

$$Ч_{шт} = Ч_{яв} \cdot (n_{зм} + n_{вих}), \quad (4.17)$$

де $n_{зм}$ – кількість працюючих бригад на добу;

$n_{вих}$ – кількість непрацюючих бригад.

$$Ч_{шт} = 1 \cdot (3 + 1) = 4, \text{ чол.}$$

Списочний склад основний робочих ділянки газоочистки становить, чол.:

$$Ч_{сп} = Ч_{шт} \cdot K_{сп}, \quad (4.18)$$

$$Ч_{cn} = 4 \cdot 1,152 = 4,608 \text{ чол.}$$

Приймаємо $Ч_{cn} = 5$ чоловік.

Отже, в проектному варіанті в одну зміну працює один оператор ГОУ.
Результати розрахунків зводимо в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Штатний розклад робочих ділянки газоочистки

Професія	Розряд	Годинна тарифна ставка, грн./год.	Графік роботи	Тривалість зміни, год.	Розстановочний штат, чол.				Резервний склад, чол.	Списочний склад, чол.	
					Бригади						Усього
					1	2	3	4			
Оператор ГОУ	10	103	Безперервний	8	1	1	1	1	4	1	5

Плановий фонд оплати праці на рік становить 1960000 грн./рік, у тому числі фонд основної заробітної плати дорівнює 1020000 грн., а додаткової – 940000 грн.

Єдина ставка нарахування єдиного соціального внеску дорівнює 22% від нарахованого доходу. База для нарахування ЄСВ складається з усіх видів заробітної плати, допомоги з тимчасової непрацездатності та по вагітності та пологах. Розмір максимальної величини бази нарахування єдиного внеску дорівнює 25 розмірам прожиткового мінімуму для працездатних осіб, встановленого законом, та станом на 01.01.2022 року дорівнює 64725 грн.

4.4 Оцінка економічної ефективності

4.4.1 Розрахунок капітальних витрат на очищення газу

Величина необхідних вкладень в основні фонди визначається методом прямого розрахунку окремих елементів вкладень [35].

Вартість основного устаткування занесена до табл. 4.5.

Таблиця 4.5 - Капітальні вкладення в газоочисні установки

№	Показники	Базовий варіант	Проектний варіант
		Сума, тис грн	Сума, тис грн
1	котел-утилізатор	2000.000	2000.000
	електрофільтр	0.000	22800.000
	вентилятор	840.000	420.000
	труби Вентурі з краплевловлювачем	2000.000	0.000
	насоси	500.000	0.000
	Зворотний цикл	22000	0.000
	Вартість основного устаткування	27340	25220.000
	димова труба	490.000	490.000
	Вартість основних споруд	27830.000	25710.000
2	газоходи	460.000	460.000
3	КВП	2060.000	8180.000
	Всього	30350.000	34350.000
4	Вартість монтажу устаткування	3375.000	12417.000
5	Вартість монтажу комунікацій	69.000	69.000
6	Витрати на будинки	467.5	660.000
9	Накладні витрати на будинки	2250	8370.000
	Всього капітальних вкладень	36511,5	55856,0
	Всього капітальних вкладень на 1000 м ³ газу	35,08	53,20

Вартість контрольно-вимірювальних приладів складе 25% від вартості газоочисного устаткування:

$$C_{КВП} = 0,25 \cdot C_{ОСН.У.}, \quad (4.19)$$

Вартість встановлення і монтажу устаткування:

$$C_{М.У.} = 0,3 \cdot (C_{ОСН.У.С.} + C_{КВП}) \text{ грн.}, \quad (4.20)$$

Вартість монтажу комунікацій:

$$C_{М.К.} = 0,15 \cdot C_{КОМ.}, \text{ грн.}, \quad (4.21)$$

Накладні витрати, якщо монтаж здійснюється спеціалізованими організаціями:

$$C_{Н} = 0,2 \cdot C_{У.}, \text{ грн.}, \quad (4.22)$$

Розраховуємо капітальні затрати у вигляді питомих величин, які віднесено до 1000 м³ газу (грн./1000м³).

$$C_K = (C_{ОСН.У.} + C_M + C_H + C_{ЗД} + C_{М.К.}) \cdot \frac{1000}{3600 \cdot Q_c \cdot \tau}, \quad (4.23)$$

де Q_c – секундна витрата газів, що очищуються, м³/с, $Q_c = 34,7$ м³/с;
 τ – ефективний час роботи газоочистки за рік, год.

Результати розрахунків заносимо до табл.4.5.

4.4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат на очищення газу і уловлювання пилу

Річні експлуатаційні витрати на очистку газів, грн./рік

$$C = \sum_{i=1}^n C_i = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7, \quad (4.24)$$

де C_1 – витрати на електроенергію, грн.;

C_2 – витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

C_3 – амортизаційні відрахування від основного та ремонтного фондів, грн.;

C_4 – основна і додаткова зарплата виробничих робітників, грн.;

C_5 – єдиний соціальний внесок, 22% від вартості основних фондів, грн.;

C_6 – витрати на поточний ремонт та утримання основних фондів, грн.;

C_7 – загальновиробничі витрати, грн.

Енергетичні витрати:

$$C_1 = r \cdot l \cdot N \cdot \tau, \quad (4.25)$$

де r – вартість електроенергії, для промислових підприємств, у звичайні години $r = 5,6$ грн./кВт·год.

l – коефіцієнт, що враховує утримання обслуговуючого персоналу, приймаємо $l = 1,1$;

N – сумарна потужність електродвигунів до вентилятора та агрегатів живлення, кВт, $N = 2549,6$ кВт·год.

$$C_1 = 5,6 \cdot 1,1 \cdot 2549,6 \cdot 8400 = 131926502 \text{ грн/рік}$$

Амортизаційні відрахування від основних фондів (C_3) визначається множенням вартості основних фондів на відповідні норми амортизаційних відрахувань:

- для устаткування – 15%;
- для будинку й споруджень - 5%;
- для мереж і комунікацій – 5%;
- для КВП – 25%.

Результати розрахунку заносимо до табл. 3.6.

Витрати на поточний ремонт та утримання основних засобів становлять 15% від амортизаційних відрахувань:

$$C_{р.ф.} = 0,15 \cdot C_{заг}, \quad (4.26)$$

$C_{заг}$ - амортизаційні відрахування від основних фондів, грн

Тоді амортизаційні відрахування будуть складатися:

$$C_3 = C_{заг} + C_{р.ф.} \quad (4.27)$$

Результати розрахунку заносимо до табл. 4.6.

Загальновиробничі витрати приймаємо в розмірі 30% від суми основної та додаткової заробітної плати основних виробничих робітників.

Економія від утилізації продуктів, що вловлюються в процесі очищення газу:

$$E_y = Q_{ym} \cdot Ц, \quad (4.28)$$

де Q_{ym} – кількість утилізованого продукту, т/рік;

$Ц$ – ціна відпуску за 1т, $Ц = 102$ грн.

Уловлений пил повертається у виробництво.

Результати розрахунку заносимо до табл. 4.6.

Таблиця 4.6 - Експлуатаційні витрати на очищення газу

№	Найменування	Базовий варіант		Проектний варіант	
		Величина витрат, грн/1000м ³	Витрати за рік, грн./рік	Величина витрат, грн/1000м ³	Витрати за рік, грн./рік
1	2	3	4	5	6
1	Електроенергія	213,0	217324800	129,4	131926502
	Водопостачання	19.64892	24757633.15	0.00	0.00
2	Амортизаційні відрахування	1.44593	1821875.00	5.58214	7033500.00
3	ЗП робітників				
	- основна	0.97	1020000	0.97	1020000
	- додаткова	0.89	940000	0.89	940000
4	Єдиний соціальний внесок	0.25	265000	0.25	265000
5	Витрати на ремонт та отримання обор.	0.21689	273281.25	0.83732	1055025.00
6	Загальновиробничі витрати	0.16429	207000.00	0.16429	207000.00
7	Загальні витрати на очистку	233,9	245670529	135,6	142447027
8	Економія від утилізації пилю	0.27729	349385.400	0.282978	356552.280
9	Загальні витрати з урахуванням утилізації пилю	233,6	245321144	135,32	142090475

4.5 Техніко-економічне обґрунтування рішень, які прийняті у проекті

Розраховуємо річний економічний ефект від впровадження системи газоочищення, яка включає котел-утилізатор, електрофільтр, вентилятор, димову трубу:

$$E = [(C_6 + E_n K_6) - (C_{пр} + E_n K_{пр})]Q_{пр}, \quad (4.29)$$

тоді

$$E = [(C_6 - C_{пр}) - E_n(K_6 - K_{пр})]Q_{пр},$$

де $C_б$ і $C_{пр}$ – собівартість одиниці продукції відповідно базової й нової техніки, грн;

$K_б$ і $K_{пр}$ – питомі капітальні вкладення на одиницю продукції в базову й нову техніку, грн;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, для природоохоронних заходів $E_n = 0,15$ грн/грн·рік;

$Q_{пр}$ – річний обсяг виробництва робіт за допомогою нової техніки в розрахунковому році, тис.м³.

Строк окупності капітальних вкладень:

$$T_{окуп} = (K_{пр} - K_б) / (C_б - C_{пр}), \quad (4.30)$$

Таблиця 4.7 – Основні техніко-економічні показники запроектованої установки

Найменування показника	Одиниця виміру	Варіант	
		Базовий	Проектний
Річна виробнича потужність газоочистки	млн.м ³ /рік	1050	1050
Вміст пилу до очистки	г/нм ³	4,00	4,00
Вміст пилу після очистки		0,100	0,040
Кількість вловленого пилу, Q	т /рік	4095	4158
Кількість утилізованого продукту	т/рік	3685	3742
Питомі капітальні вкладення	грн/1000м ³	35,08	53,20
Питомі експлуатаційні витрати	грн/1000м ³	233,60	135,32
Економічний ефект	млн. грн.	106,04	
Економічна ефективність капітальних вкладень	грн./(грн·рік)		0,54
Термін окупності капітальних вкладень	років		1,84

ВИСНОВКИ

В даній роботі проводилось проектування високоефективної системи газоочистки для газів, які відходять від мартенівської печі, з утилізацією тепла. В результаті теоретичного аналізу та проведених розрахунків було встановлено:

1. Обрана система газоочищення, що включає: котел-утилізатор, електрофільтр, димотяг і димар. Димові гази охолоджуються в котлі-утилізаторі і надходять у електрофільтр ЕГА1-40-7,5-4-4. За результатами аеродинамічного розрахунку підібрано вентилятор марки ВМ-160/850.
2. Ефективність вловлювання пилу в рукавному фільтрі становить 99,5%, при кінцевій запиленості 0,04 г/м³.
3. Запроектована система утилізації вловленого пилу дозволяє повернути у виробництво 3742 т/рік.
4. Обґрунтовано вибір методу охолодження газу за допомогою котла-утилізатору та питомого газового навантаження на тканину фільтра. Встановлено, що при відсутності котла-утилізатора і охолодження газу за допомогою підсмоктування холодного повітря збільшуються капіталовкладення на систему очищення на 60% в порівнянні з запропонованою схемою, та призводить до збільшення строку окупності більш за нормоване значення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: підручник для металург. спец. вищ. навч. закл./Д. Ф. Чернега та ін. Київ: Вища шк., 2006. 503 с.
2. 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.
3. Верховлюк А.М., Нарівський А.В., Могилатенко В.Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. посібник/За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. Київ: Видавничий дім "Вініченко", 2016. 224 с.
4. Готвянський Ю.Я. Фізико-хімічні та металургійні основи виробництва металів: навч. посібник. Київ: ІЗМН, 1996. 392 с.
5. Харлашин П.С., Чаудрі Т.М., Меджибожський М.Я. Основи термодинаміки і кінетики сучасних сталеплавильних процесів: підручник для ВУЗів. Маріуполь, 2009. 340 с.
6. Уминський С.М., Лебедев Б.В., Житков С.С. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: навч. посіб. для студентів ВНЗ/ Одес. держ. аграр. ун-т. Одеса: ТЕС, 2017. 171 с.
7. Металургія (проблеми, теорія, технологія, якість): підручник / П.С. Харлашин та ін.. Донецьк: ТОВ «Норд-комп'ютер», 2005. 724 с.
8. Мовчан В. П., Бережний М. М. Основи металургії. Дніпропетровськ: Пороги, 2001. 336 с
9. Воденніков С. А., Тарасов В. К., Воденнікова О. С. Конструкції агрегатів чорної металургії : навч. посіб. Запоріжжя: ЗДІА, 2012. 192 с.
10. Денисов С.І. Уловлювання та утилізація пилів та газів: навч. посібник. Київ: Вища школа, 1992. 333 с.

11. Захист навколишнього середовища при роботі теплотехнологічного устаткування: навч. посібник / Н.А. Шаройко та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2011. 395с
12. Самойленко Н.М., Аверченко В.І., Байрачний В.Б. Системи технологій та промислова екологія. Металургійний та енергетичний комплекс Ч. І.: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», Лідер, 2020. 212 с.
13. Екологічні аспекти металургійних технологій (1 ч.): навч. посібник/Грес Л.П. та ін. Дніпро: Україн. держ. ун-т науки і технол., 2022. 106 с.
14. Природоохоронні технології. Частина 1. Захист атмосфери: навчальний посібник/Северин Л.І. та ін. Вінниця: ВНТУ, 2012. 388 с.
15. Крусір Г.В., Мадані М.М., Гаркович О.Л. Техніка та технології очищення газових викидів: навчальний посібник. Одеса: ОНАХТ-Одеса, 2017. 207 с.
16. Клименко В.В., Кравченко В. І., Телюта Р. В. Енергозбереження в теплотехнологічних процесах та установках: навчальний посібник. Кропивницький: ПП Ексклюзив – Систем, 2020. 2019 с.
17. Гічов Ю.О., Бойко В.М., Адаменко Д.С. Котли-утилізатори та їх тепловий розрахунок: навч. посібник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2004. 46. с.
18. Каталог пилогазоочисного обладнання: Каталог. Запоріжжя: УкрНДІОГаз, 1990. 238 с.
19. Полетаєв 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.
20. Охорона праці на гірничо-металургійному підприємстві: навч. посібн. ч.4: Енергетичний комплекс/В.О. Шеремет та ін. Дніпропетровськ: Ліра ЛТД, 2004 256с.
21. 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>
22. Грибан В. Г., Негодченко О. В. Охорона праці: навч. посібник, [для студ. вищ. навч. закл.]. Київ: Центр учбової літератури, 2009. 280 с.
23. НПАОП 0.00-1.82-18 Правила охорони праці під час дроблення і сортування, збагачення корисних копалин і огрудкування руд та концентратів: Наказ Мінсоцполітики від 15.05.2018 № 704 «Про затвердження Правил охорони праці під час дроблення і сортування, збагачення корисних копалин і огрудкування руд та концентратів»/ База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0666-18#Text>
24. 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>
25. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря будівель [Електронний ресурс]: навч. посіб. / М.Ф.Боженко ; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 36,087 Мбайт). Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. 380 с
26. 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>
27. Л. А. Катренко, Ю. В. Кіт, І. П. Пістун. Охорона праці: навч. посібник /2-ге вид., стереотип. Суми: Унів. книга, 2007. 495 с.
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

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. Електробезпека: Підручник/С. В. Панченко та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 295 с.

32. Правила улаштування електроустановок: Наказ Міненерговугілля від 21.07.2017 № 476// База даних «Законодавство України»/ВР України.

URL:<https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0476732-17#Text>

33. Полетаєв 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.

34. НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні»: Наказ МВС України від 30.12.2014 № 1417/ База даних «Законодавство України»/ВР України. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text>

35. Беренда Н.В., Троїцька О.О., Манідіна Є.А. Техніко-економічне обґрунтування проектних рішень: навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА спец. 183 "Технологія захисту навколиш. середовища", 263 "Цив. безпека" всіх форм навчання. Запоріжжя: ЗДІА, 2018. 196 с.