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 )

# Кваліфікаційна робота

на тему *«Проєкт системи очищення газів від вагранкових печей»*

Виконав: студентка ___групи *6.1831-з*_____

спеціальності
*183 Технології захисту навколишнього середовища*
освітньої програми
*Технології захисту навколишнього середовища*_

*Кошіль І.Л.* _____ _____

Керівник *проф., к.х.н.Прутцьков* _____

Рецензент *к.т.н. Кожемякін Г.Б.*_____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя
2025

**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*_____
(другий (магістерський) рівень)

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

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

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

«____» _____2025 року

# З А В Д А Н Н Я
## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____*Кошіль Ірина Леонідівна*_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи_«Проєкт системи очищення газів від вагранкових печей»_____
_____
керівник роботи_*Прутцьков Дмитрій Володимирович, д.т.н, професор*_____
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від *"__"*_____ 202_року *№* _____
2. Строк подання студентом роботи _____*20.05.2025*_____
3. Вихідні дані до роботи ____*розробити високоефективну систему мокрого очищення технологічного газу від вагранкових печей: тиск води попереду форсунок Рр=0,4 МПа; початкова температури води tн=20 °С;вологість газів на вході в скрубер 2 % об, що відповідає =16 г/м³ за н.у.; втрата тиску в скрубері 200 Па, витрата газів за н.у 60000 м³/год, температура газіввід вагранок 820 °С.*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Вступ. Опис технологічного процесу виплавки чавуну в доменній печі. Характеристика пилогазових викидів від вагранкових печей. Аналіз існуючих способів очищення технологічних газів від вагранкових печей. Розрахунок основного газоочисного устаткування. Розрахунок аеродинаміки газового тракту. Вибір тягодуттєвого обладнання. Охорона праці та техногенна безпека. Висновки. Перелік джерел посилань.*_____
_____
_____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
*презентаційний матеріал на 9 слайдах (на 9 сторінках)*

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата завдання прийняв |
|---|---|---|
| *Загальна частина* | *Прутцьков Д.В., професор* | |
| *Спеціальна частина* | *Прутцьков Д.В., професор* | |
| *Охорона праці та техногенна безпека* | *Прутцьков Д.В., професор* | |

7. Дата видачі завдання

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| *1* | *Вступ* | | *виконано* |
| *2* | *Загальна частина* | | *виконано* |
| *3* | *Спеціальна частина* | | *виконано* |
| *4* | *Охорона праці та техногенна безпека* | | *виконано* |
| *5* | *Висновки* | | *виконано* |
| *6* | *Презентація* | | *виконано* |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

**Студент** *Ірина КОШІЛЬ*

**Керівник роботи** *Дмитрій ПРУТЦЬКОВ*

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер *Андрій ВАГІН*

# РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 60 с., 7 табл., 8 рис., 12 джерел

ВАГРАНКИ, СИСТЕМА ОЧИЩЕННЯ,РЕКУПЕРАТОР, ПОРОЖНИСТИЙ СКРУБЕР, ЕЛЕКТРОФІЛЬТР, АГРЕГАТ ЖИВЛЕННЯ

Об'єкт дослідження – ливарне виробництво

Предмет дослідження – система газоочищення відхідних газів від ваграночних печей

Мета кваліфікаційної роботи – розробити високоефективну систему очищення газових викидів від ваграночних печей

Досліджено джерела газових викидів ливарного виробництва. Проаналізовано утворення шкідливих речовин у процесі плавки чавуну: викиди залежать від типу шихтових матеріалів, складу коксу, інтенсивності горіння та режиму роботи вагранки.

Проведено аналіз фізико-хімічних властивостей ваграночних газів. . Запропонована та запроєктована система очистки, що містить: рекуператора, порожнистий скрубер типу АКРП, електрофільтр, систему газовідведення, димотяг, живильний агрегат, димову трубу.

Встановлено, що запропонована система газоочищення забезпечує ступінь очистки пилу понад 99%, що відповідає сучасним екологічним вимогам. Особливу увагу приділено теплоутилізації газів, що дозволяє знизити енергоспоживання.

Проаналізовані шкідливі та небезпечні фактори ливарного виробництва з використанням ваграночних печей.

# ЗМІСТ

ВСТУП ..... 6

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА ..... 7

1.1 Шихтові матеріали ..... 7

1.2 Плавка чавуну у вагранці ..... 17

1.3 Інтенсифікація плавильного процесу ..... 20

1.4 Характеристика газових викидів вагранних печей ..... 22

2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА ..... 25

2.1 Способи очищення газів, що відходять від вагранних печей ..... 25

2.2 Розрахунок основних газоочисних обладнань ..... 32

2.2.1 Розрахунок рекуператора ..... 32

2.2.2 Розрахунок порожнистого скрубера ..... 33

2.2.3 Розрахунок електрофільтру ..... 36

2.2.4 Розрахунок агрегатів живлення ..... 40

2.3 Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту ..... 42

Аеродинамічний розрахунок димової труби ..... 44

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА ..... 48

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів ..... 48

3.2 Заходи з поліпшення умов праці робітників сталеплавильного цеху ..... 50

3.3 Виробнича санітарія ..... 51

3.4 Заходи з електробезпеки ..... 54

3.5 Пожежна безпека ..... 55

ВИСНОВКИ ..... 58

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ..... 59

# ВСТУП

Забруднення атмосфери шкідливими технологічними викидами стало наслідком бурхливого розвитку промисловості. На планеті щорічно викидається у повітря 200-250 млн.т. пилу, до 150 млн.т. діоксиду сірки, 70 млн.т. оксидів азоту, 300 млн.т. оксиду вуглецю та ряд інших шкідливих речовин. Внаслідок цього в атмосфері великих промислових міст накопичується велика кількість шкідливих хімічних сполук.

Пилові викиди сучасних підприємств чорної металургії дуже значні. Їхня частка у загальній кількості викидів промисловості та транспорту становить: по пилу 20%, по оксиду вуглецю 43%, по діоксиду сірки 16%, по оксидам азоту 23%. У районах розташування великих металургійних підприємств забруднення атмосфери на 50-60% і більше зумовлено викидами цих підприємств [3].

У ливарному виробництві викиди забруднюючих речовин походять з вагранних печей, де плавлять чавун [1].

З огляду на технологічні особливості плавильні агрегати – вагранки є потужними джерелами забруднення повітряного басейну [4]. Під час плавки виділення пилу та окису вуглецю відбувається нерівномірно. Однак виділення їх значно протягом усієї роботи вагранки.

Нерівномірність виділення газів та пилу пов'язана із змінами в технологічному режимі, складі та кількості шихтових матеріалів, продуктивності вагранки тощо. Тому режим роботи вагранки необхідно враховувати під час вибору способу очищення викидів. Оскільки гази та пил утворюються безперервно протягом усього циклу плавки металу, очисні пристрої повинні забезпечувати безперервне очищення газів під час цього циклу.

# 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

## 1.1 Шихтові матеріали

Особливості процесу приготування рідкого чавуну (застосовані шихтові матеріали та методи плавки) значною мірою визначають властивості чавуну виливка [12].

В даний час до 90% всього чавуну виплавляється у вагранках. Безперервно зростаючі вимоги до властивостей чавунів, з'єднання нових марок модифікованих і легованих чавунів викликають необхідність широкого впровадження плавки в електропечах, головним чином індукційних печах промислової частоти. Одночасно вдосконалюється процес вагранної плавки з метою отримання високоякісного чавуну за мінімальних витрат.

Складовими металевої шихти є ливарний та передільний чушкові чавуни, феросплави, власні відходи виробництва (литники, шлюб), чавунний брухт з боку, сталевий брухт.

Склад ливарних коксових чушкових чавунів регламентований ГОСТ 4832-80. Основною класифікаційною ознакою є вміст кремнію в діапазоні від 3,2-3,6% до 1,2-1,6%, відповідно до якого чавуни поділяються на шість марок. Залежно від вмісту інших елементів чушкові чавуни ділять на групи (за марганцем від 0,05 до 1,5 %), класи (за фосфором від 0,03 до 1,2 %) та категорії (за сіркою від 0,02 до 0,05 %). Для зручності шихтування маса однієї чушки не повинна перевищувати 25 кг.

При вагранічній плавці можливе використання й граничних доменних чавунів, що відрізняються низьким вмістом кремнію (не більше 1,3%). При заміні ливарних чавунів у шихті передельними відзначається деяке поліпшення механічних властивостей, підвищення рідини і схильності до відбілю сірого чавуну, що виплавляється. Однак застосування передільних

чавунів зумовлює суттєве збільшення феросиліцію в металозавалці та необхідність його точного дозування [12].

Для виплавки чавунів, легованих хромом і нікелем, використовується природнолегований чушковий чавун, що виплавляється з орсько-халілівських руд. Цей чавун містить 2,1-3,7% Сг та до 0,6% №.

Для регулювання вмісту кремнію і марганцю в чавуні, що виплавляється, в шихту додають" феросплави: феросиліцій, що містить 20-75 % Si (ФС20Л, ФС45 і ФС75Л), і феромарганець, що містить 70-85 % Mn.

Значну частину шихти становлять вторинні чорні метали: власні відходи виробництва, стружка, а також чавунний та сталевий брухт з боку. Існуючі стандарти та технічні умови передбачають підрозділ брухту на групи залежно від хімічного складу (легований та нелегований). Встановлено допустимі розміри шматків та їх маса. Їхній максимальний розмір не повинен перевищувати 1/3 діаметра шихти вагранки.

У ливарному цеху, як правило, проводять додаткове сортування та вибірковий хімічний аналіз брухту та повернення, щоб забезпечити мінімальний розкид показників хімічного складу кожної партії вторинних чорних металів, що застосовуються для шихтування.

Паливом називають речовину, при згорянні якої виділяється велика кількість теплоти. Ця теплота може бути використана як у промисловості, так і в побуті.

За агрегатним станом усі види палива поділяють на:

тверді:

природні – дрова, торф, буре та кам’яне вугілля, антрацит, горючі сланці;

штучні – деревне вугілля, кокс;

рідкі:

природні – нафта;

штучні – бензин, гас, мазут;

газоподібні:

природні – природний газ;

штучні – коксовий, доменний, генераторний гази тощо.

Зазвичай вагранки працюють на твердому паливі – коксі.

Основна кількість теплоти при згорянні твердого палива утворюється внаслідок згоряння вуглецю. Водень випаровується при нагріванні до температури 500–600 °С; кисень, азот, мінеральні домішки та волога є баластом. Значна кількість теплоти виділяється також під час згоряння сірки, однак її наявність у паливі небажана, оскільки частина сірки переходить у метал, а частина залишається у продуктах згоряння у вигляді $SO_2$, забруднюючи навколишнє середовище. Чим більше вуглецю у складі палива та менше летких речовин і баласту, тим воно якісніше для плавлення у вагранці.

Найбільш придатним для ваграночної плавки є ливарний кокс, що утворюється в коксових печах шляхом сухої перегонки (без доступу повітря) коксівного кам’яного вугілля. Процес коксування полягає в тому, що при нагріванні до 1000–1100 °С з вугілля випаровуються леткі речовини, а його маса – так званий «коксовий пиріг» – необоротно твердне, тріскається і перетворюється на шматки коксу.

Паливо повинно мати достатню міцність при високих температурах. У шахті вагранки розпечена холоста колоша палива має витримувати тиск усього стовпа шихтових матеріалів, а під час завантаження – ще й ударне навантаження від падіння колоші металу. Щоб перевірити механічну міцність палива, застосовують технологічну барабанну пробу.

Для цього беруть пробу коксу масою 300 кг з вологістю 5%. Відсіюють фракції розміром понад 60 мм загальною масою 150 кг. Цю масу ділять на три частини по 50 кг. Дві з них піддають випробуванню на міцність: навантаження по 50 кг розміщують у барабані діаметром 1000 мм і довжиною 1000 мм, який обертається протягом 4 хв зі швидкістю 25 об/хв.

Після цього пробу просівають через сито з розміром комірки 40 мм. Відсоткове співвідношення залишку на ситі до початкової маси зразка є показником М40. Крім того, пробу просівають через сито з коміркою 10 мм – залишок після просіювання не повинен перевищувати 12%, що характеризує показник М10.

Для визначення міцності палива при високих температурах шматок пального нагрівають до температури 900 °С і скидають на металеву плиту з висоти 600 мм. Паливо, стійке до термічного впливу, не повинно розколюватися більш ніж на 2–3 частини.

Паливо має мати мінімальну реакційну здатність, тобто низьку здатність відновлювати вуглекислий газ до оксиду вуглецю. Реакція між $CO_2$ та вуглецем супроводжується значним поглинанням тепла. Чим активніше ця реакція відбувається в зоні холостої колоші вагранки, тим менше теплової енергії залишається для плавлення та перегріву чавуну. Реакційну здатність визначають у лабораторних умовах: через подрібнений зразок пального, розігрітий до 900 °С, пропускають вуглекислий газ. Кількість відновленого $CO_2$ (у відсотках) є критерієм реакційної здатності:

до 25% – низька,

25–50% – середня,

понад 50% – висока.

Шматки пального для вагранки повинні мати однакові розміри. Розмір коксових фракцій визначає умови згоряння вуглецю та перебіг реакції відновлення вуглекислого газу, впливаючи на весь процес вагранočної плавки.

Паливо повинно бути достатньо щільним – його пористість не повинна перевищувати 30%. Чим вище пористість, тим активніше протікають реакції, але водночас знижується механічна міцність палива.

Вміст сірки в паливі має бути якомога меншим – не більше 1,4%, оскільки при взаємодії палива й газів із металом сірка проникає в чавун, що негативно позначається на його якості.

Зольність пального також повинна бути низькою — не більше 10–12%. Зола є баластом, що знижує теплотворну здатність пального. Вона переходить у шлак, збільшуючи його об’єм, що ускладнює процес плавлення у печі. У таких умовах потрібне додаткове використання флюсу для зв’язування золи у шлак.

Тріщинуватість пального повинна бути мінімальною. Тріщини на шматках коксу підвищують його реакційну здатність, але водночас значно знижують механічну міцність.

Ливарний кам’яновугільний кокс класифікується за вмістом сірки на три марки: КЛ-1, КЛ-2, КЛ-3; а за розмірами шматків – на класи: 60 мм і більше, 40 мм і більше.

Доменний кокс, за своїм призначенням, характеризується високою реакційною здатністю, значною пористістю, меншими розмірами шматків і невисокою механічною міцністю. Для ваграночної плавки його необхідно використовувати у великих об’ємах.

Альтернативою ливарному коксу може бути ливарний антрацит, який має високу міцність та добру термічну стійкість. Однак, через підвищений вміст сірки, антрацит не може повністю замінити кокс. Найчастіше використовують суміш антрациту з ливарним коксом.

Звичайний антрацит також може слугувати паливом для вагранок. Він має нижчу реакційну здатність, але вищу теплотворну здатність у порівнянні з коксом. Антрацит доцільно додавати до коксу в певних пропорціях, оскільки при нагріванні він розтріскується, і дрібні частинки можуть затримуватися у шлаку, що порушує нормальний хід плавлення.

Природний газ також може застосовуватися як паливо — його використовують у коксогазових і газових вагранках. Він широко

застосовується у плавильних цехах для підігріву повітря, розпалювання вагранок, нагрівання ковшів та сушіння жолобів печі.

Під час плавлення чавуну у вагранці як флюси, що знижують в'язкість шлаків, використовують вапняковий камінь, негашене вапно, плавиковий шпат, іноді мартенівський шлак або апатито-нефелінову руду.

Вапняковий камінь повинен бути світло- або темно-сірого кольору та відповідати таким вимогам: містити не менше ніж 97% $CaCO_3$, а розмір шматків має становити 70–150 мм. Окрім вапняку, як флюс також можна використовувати крейду та мармур, а також свіжовипалене вапно у шматках, яке містить 88–93% CaO, 2,0% MnO, не більше 2,0% $SiO_2$ і не більше 0,2% сірки (S).

Плавиковий шпат має містити 65–85 % $CaF_2$. Використовуються марки:

ФК – флюорит кусковий сортований,

ФГ – графітаційний концентрат,

ФО – обпалені окатиші.

Зазвичай плавиковий шпат застосовують на заміну до 30% загальної маси флюсу, що замінюється замість вапняку. Його використання забезпечує підвищену текучість шлаку та зменшення утворення настилів. Проте він агресивно діє на футеровку печі, викликаючи її руйнування.

Іноді для зниження в'язкості шлаку до флюсів додають кухонну сіль, зерна якої мають бути не більше 20 мм.

Як флюс також використовують основний мартенівський шлак з таким хімічним складом (у відсотках):

не більше 25% $SiO_2$;

CaO + MgO – не менше 5%;

FeO + MnO – не менше 20%;

$P_2O_5$ – не більше 2%;

CaS – не більше 3%.

Його дозують у подвійному обсязі порівняно з вапняком.

Металева шихта складається з різних залізовуглецевих сплавів: доменного чавуну, чавунного та сталевого брухту, власного обороту, брикетів із стружки та феросплавів, які завантажуються у піч у певних пропорціях (у вигляді металевих колош) з метою отримання чавуну заданого хімічного складу.

Доменні чавуни постачають у вигляді чушок з одним або двома перетисками, товщиною не більше 30 мм і масою до 20 кг. Поверхня чушок має бути чистою, без сторонніх включень. Ці чавуни поділяють на ливарні, передельні та природно-леговані.

Ливарні чавуни випускають у двох основних типах:

звичайні (маркування Л),

рафіновані магнієм (ЛР).

Залежно від вмісту кремнію виділяють марки:

Л1 (3,2–3,6% Si) до Л6 (1,2–1,6% Si).

За вмістом марганцю:

групи I (до 0,3% Mn) до IV (0,9–1,5% Mn).

За вмістом фосфору:

класи:

А (до 0,08% P),

Б (0,09–0,12% P),

В (0,13–0,3% P),

Г (0,4–0,7% P),

Д (0,8–1,2% P).

За вмістом сірки:

категорії:

1 (0,02% S),

2 (0,02–0,03% S),

3 (0,03–0,04% S),

4 (0,04–0,05% S).

Передельні чавуни випускаються десяти марок:

для сталеливарного виробництва — П1, П2,

для ливарного — ПЛ1, ПЛ2,

фосфористі — ПФ1, ПФ2, ПФ3,

високоякісні — ПВК1, ПВК2, ПВК3.

Як і для ливарного чавуну, маркування передельного чавуну визначається за вмістом кремнію, якого в ньому значно менше. Вони також поділяються на групи за вмістом марганцю, класи за вмістом фосфору і категорії за вмістом сірки.

Природно-леговані чавуни найчастіше представлені трьома типами:

Хромонікелевий,

титановий,

титаномідний (ТУ 14-15-4-74).

Хромонікелевий чавун випускається десяти марок — від ЛХН1 [0,2% (Ni + Co), 0,4–1,2% Cr] до ЛХН10 [1% (Ni + Co), 2,3–3,2% Cr].

Титановий чавун (БТЛ3-БТЛ7) містить 0,3–1,2% Ti,

титаномідний чавун (БТМЛ3-БТМЛ7) — 1–3% Cu та 0,3–1,2% Ti.

Додавання таких чавунів до шихти дозволяє виплавляти низьколеговані конструкційні чавуни.

Ливарний чушковий чавун є найдорожчою складовою шихти. Його виробництво значно знижує продуктивність доменних печей, тому в останні роки його намагаються замінювати передельним чавуном у шихті для ваграночної плавки. Проте заміна значної частини ливарного чавуну передельним потребує додавання великої кількості феросиліцію, щоб компенсувати нестачу кремнію, причому його дозування має бути дуже точним. В іншому випадку можливі значні коливання хімічного складу, а також відхилення у ливарних і механічних властивостях.

Усі доменні чавуни постачаються разом із сертифікатом, у якому зазначається їх хімічний склад.

Лом – це розбиті на частини старі, зношені деталі машин, відслуживші чавунні та сталеві вироби тощо. Брухт, що надходить у ливарний цех, обов'язково має супроводжуватися сертифікатом якості. Згідно з ГОСТ 2787–75, брухт, призначений для вагранок, повинен відповідати таким вимогам:

шматки мають бути зручними для завантаження: розмір не більше 300 × 200 × 150 мм, товщина не менше 6 мм, маса від 0,5 до 40 кг;

не допускається наявність дроту та дротяних виробів;

кольорові метали та шкідливі домішки мають бути відсутні;

засміченість нешкідливими включеннями не повинна перевищувати 2%;

заборонено використання проржавілих або кислотно оброблених шматків.

Брухт класифікується:

за категоріями:

А – вуглецевий,

Б – легований;

за класами:

сталевий,

чавунний;

за видами:

шматковий,

пресований,

стружка,

габаритний,

негабаритний.

Сталевий лом для вагранки маркується як А1, брикети зі сталевої стружки – А5, чавунний брухт – А7, а брикети з чавунної стружки –А8.

Власний виробничий зворот – це литники, браковані відливки та скрап, які зазвичай повністю повертаються в переплавку. Литники та брак за потреби подрібнюють і очищують у галтовочних барабанах від пригорілої формувальної суміші, оскільки її наявність у вагранці вимагає додаткової витрати флюсу й палива на шлакування.

Скрап утворюється внаслідок розбризкування металу, сплесків, зливу залишків у изложниці та очищення ковшів. Виробничий зворот збирають після плавлення і зберігають у спеціальних відсіках із позначенням номера шихти. Залежно від маси відливок і марки чавуну, що виплавляється, частка звороту в шихті може становити від 20 до 40%.

Брикети з чавунної та сталевої стружки, призначені для ваграночної плавки, зазвичай мають масу 2–40 кг і виготовляються на гідравлічних пресах.

Феросплави – це велика група металевих шихтових матеріалів, які є сплавами заліза з одним або кількома легуючими елементами. Назва феросплаву зазвичай вказує на основний легуючий елемент. Їх вводять у шихту для збагачення чавуну певними хімічними елементами.

Феросплави поділяють на:

доменні (із меншим вмістом легуючих елементів, але стабільніші за хімічним складом чавуну),

електропічні (із вищим вмістом легуючих домішок та низьким вмістом сірки і фосфору, але дорожчі у виробництві).

Доменні феросплави краще підходять для вагранočної плавки, оскільки не спричиняють значних коливань хімічного складу чавуну, однак їх виробництво скорочується через зниження продуктивності доменних печей. Електропічні феросплави мають високу концентрацію легуючих елементів, проте вимагають точного дозування через високу вартість.

## 1.2 Плавка чавуну у вагранці

Вагранка є шахтною піч безперервної дії, що працює за принципом протитечії, в якій метал стикається з твердим паливом і продуктами його горіння. Металева шихта, опускаючись вниз, нагрівається і плавиться за рахунок теплоти газів, що піднімаються, і потім перегрівається при подальшому контакті з розпеченим коксом. З усіх паливних печей вагранки мають найбільший тепловий коефіцієнт корисної дії (ККД), що досягає 35-45%.

Вагранка (без труби та іскроуловлювача) показана на рис. 1.1.

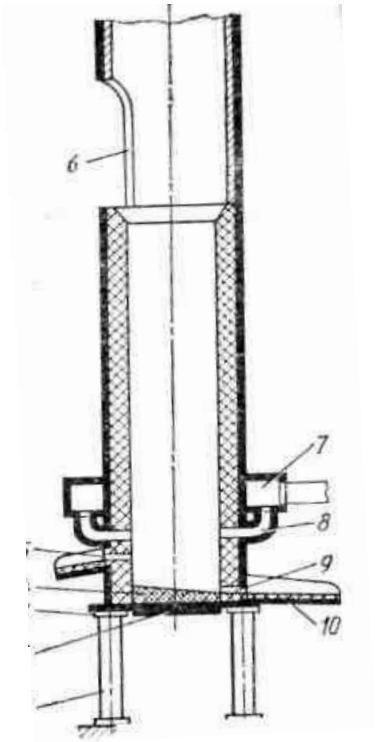



Рисунок 1.1 – Вагранка

Циліндричний кожух вагранки спирається на подову плиту 3 і колони 1. У подовій плиті є отвір, який під час плавлення закрито кришкою 2. Після закінчення плавки кришка відкривається, і через отвір видаляються залишки коксу, шлак та ін. Кожух зсередини футерують, як правило, шамотною цеглою або шамотною набивною масою. Після футерування стінок і закриття кришки 2

спеціальною масою набивають під 4, має ухил до льотки 9 для випуску рідкого чавуну.

Повітря для горіння коксу подається від повітродувки до колектору 7. Тиск повітря в середньому (0,5-1). 104 Па. З фурменої коробки повітря прямує у фурми 8, розташовані на певній відстані від поду. Простір від рівня фурм до подини називають горном. У верхній частині горна є 5 льотка для випуску шлаку. За відсутності копильника рідкий чавун через льотку 9 по жолобу 10 періодично випускається в розливні ковші. Над рівнем фурм знаходиться шахта вагранки. Через вікно 6 завантажують шихтові матеріали, паливо та флюси.

Продовженням шахти є труба вагранки, що закінчується частиною, що розширюється – іскроуловлювачем, призначення якого полягає в уловлюванні найдрібніших твердих частинок, що відносяться газами, що відходять. У вагранках закритого типу гази, що відходять, відсмоктуються з шахти через отвір, розташований вище рівня завантажувального вікна, і надходять в систему газоочищення.

Тривалість плавильної кампанії вагранки у невеликих цехах дрібносерійного виробництва визначається організацією роботи у формувально-складальному відділенні. Зазвичай вона не перевищує 16-20 год. У плавильному відділенні встановлюють дві вагранки, що працюють по черзі через день.

У цехах серійного та масового виробництва можна використовувати вагранки з тривалим циклом роботи, тривалість плавильної кампанії яких становить 1-3 тижні. Ці вагранки зазвичай мають нефутерований кожух вище за рівень фурм, зовнішнє поливне охолодження. Плавка йде практично на гарнісажі, що утворюється на внутрішній поверхні шахти печі.

Після вибивання і охолодження вагранку очищають від шлакових настилів, відновлюють футеровку і набивають подину, підготовлену до плавки вагранку через вікно завантажують першу порцію коксу. У кілька отворів, що є в нижній частині горна, вставляють переносні пальники і розпалюють кокс. Після того як весь кокс рівномірно розжариться, пальники прибирають, отвори

в горні закладають вогнетривкою масою; подальше горіння коксу йде під час подачі повітря через фурми.

Першу порцію коксу, що лежить на подині вагранки, називають неодруженою калошею. Висота холостої калоші залежить від продуктивності вагранки та режиму плавки. Найчастіше верхній рівень холостої калоші вище рівня фурм на 800-1200 мм.

Після того як неодружена колоша доведена до заданого рівня і кокс у ній розжарений, починають завантаження вагранки. Через вікно поперемінно завантажують робочі калоші (металеві та паливні), а також флюс. Загалом у шахті міститься п'ять-сім робочих колош. Потім включають дуття і починається процес плавки. За певний відрізок часу після початку плавки теплоти, що виділилася в результаті горіння коксу, виявляється достатньою для підігріву, а потім для розплавлення першої металевої калоші. За цей час згоряє частина коксу неодруженої калоші, і рівень її знижується (зазвичай на 100-200 мм). Але за металом, що розплавився, знаходиться кокс робочої калоші, який приєднується до коксу холостої калоші і відновлює її первісну висоту. Плавлення наступних металевих колош йде в тій же послідовності. Отже, підтримки постійної висоти холостий калоші у робочої калоші коксу має бути стільки, скільки його згоряє під час розплавлення однієї металевої калоші.

В результаті згоряння коксу та проплавлення однієї металевої калоші стовп шихти та палива в шахті опускається, і через завантажувальне вікно завантажують чергову металеву та паливну калоші та флюси. Горіння вуглецю протікає відповідно до реакцій:

$$2C + O_2 \longrightarrow 2CO$$

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

$$2CO + O_2 \longrightarrow 2CO_2$$

$$CO_2 + C \longrightarrow 2CO$$

Процес горіння супроводжується реакціями в розплаві, внаслідок яких поверхня металу окислюється з виділенням колошникового газу:

$$2C + O_2 \longrightarrow 2CO$$

розплаву чавуну:

$$2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$$

$$Fe + CO_2 \rightarrow FeO + CO$$

$$3Fe + 4CO_2 \rightarrow Fe_3O_4 + 4CO$$

$$3Fe + SO_2 \rightarrow FeS + FeO \quad \text{(сульфирование)}$$

зі шлаку:

$$Si + O_2 \rightarrow SiO_2$$

$$Si + 2FeO \rightarrow 2Fe + SiO_2$$

$$2Mn + O_2 \rightarrow 2MnO$$

$$Mn + FeO \rightarrow Fe + MnO$$

або в процесі плавлення в лужному середовищі:

$$CaO + FeS \rightarrow FeO + CaS$$

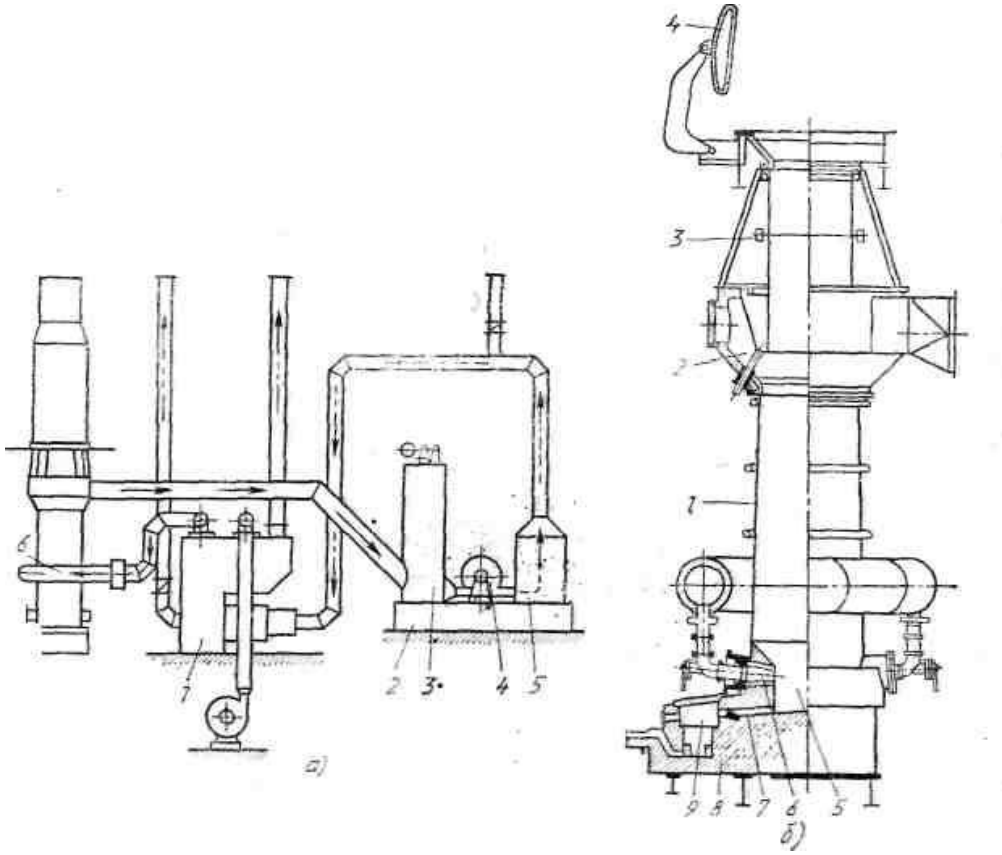
$$CaO + MnS \rightarrow MnO + CaS$$

### 1.3 Інтенсифікація плавильного процесу

Найбільш ефективним та широко поширеним методом інтенсифікації плавки у вагранках є використання гарячого дуття, яке забезпечує підвищення температури чавуну та зниження витрати коксу.

При постійному витраті коксу можна забезпечити підвищення температури перегріву чавуну приблизно на 70 °С. При збереженні тієї ж температури чавуну витрати коксу можна знизити приблизно на 30%. Можлива реалізація проміжного варіанту, при якому має місце економія коксу при одночасному підвищенні температури чавуну.

На рис. 1.2а наведена схема вагранки, де здійснюється підігрів дуття до 500 ° С в конвекційно-радіаційному рекуператорі 1, конструкція якого дозволяє при необхідності крім теплоти газів, що відходять використовувати зовнішнє джерело підігріву. Гази, що спалюються в рекуператорі, попередньо очищаються в газоочиснику 2, вміст пилу в них 50-100 мг/м3. В систему газоочищення входить охолоджувач газів 3, дезінтегратор мокрої очистки 4, який одночасно створює необхідне розрідження, і осушувач 5. Підігріте повітря з рекуператора надходить у колектор колектор вагранки 6.




а – з установкою для очищення газу та рекуператором; б – закритого типу

Рисунок 1.2 – Вагранки з підігрівом дуття

Основою плавильного комплексу є вагранка закритого типу з нефутерованим кожухом (рис. 1.2 б). Конічний сталевий кожух печі, що не має футерування від завантажувального вікна до фурм, забезпечує вільний хід шихти, а також інтенсивне охолодження водою. У верхній частині печі

знаходиться кільцева футерована камера 2 газовідсмоктувача, з'єднана з системою очищення. Рівень завалки в шихті контролюється ізотопним рівнеміром.

Горн каналом 5, розташованим на рівні поду 8, з'єднується з двома компресійними сифонами 9, що знаходяться під тиском ваграночних газів. Чавун і шлак безперервно випускаються через один із сифонів, що значно зменшує знос футерування горна. Гаряче дуття подається через водоохолоджувані мідні фурми 6, всунуті в зону горна. Багатошарова футерування горна виконується з кислих і напівкислих вогнетривких мас шляхом торжокретування або набивання. Така конструкція печі дозволяє збільшити тривалість плавильної кампанії без вибивання до 2-3 тижнів, довести частку сталевого скрапу в шихті до 60°/6, а також забезпечити високий перегрів чавуну (1500-1560°С).

На практиці використовують інші методи, що забезпечують збільшення продуктивності, зниження витрати коксу і підвищення температури чавуну. Це збагачення дуття 1-4% кисню та застосування двох рядів фурм із контрольованим поділом дуття між фурменими колекторами. Для економії дефіцитного коксу використовують коксогазові вагранки, де поряд із фурмами встановлені газові пальники.

### 1.4 Характеристика газових викидів вагранних печей

Колошниковий і газ, що відходить, містять азот і пари води (залежно від вологості шихти), а також 2-18 % діоксиду вуглецю, 5-21 % оксиду вуглецю, до 16: кисню, до 1% водню, до 0,1% діоксиду сірки і сліди триоксиду сірки. Пил, що міститься в газах, містить діоксид кремнію (30-60 %), залізо або його оксид (до 25 %), і оксид алюмінію, оксид кальцію (до 20 %), в менших кількостях оксиди марганцю (максимум до 9%) і магнію (не більше 5 %), а також іноді оксиди цин.

Гланулометричний склад пилу в колошникових газах гаряче-повітряних вагранок дисперсніший, ніж холодно-повітряний. У табл. 1.1 наведено значення кількостей пилу, що утворюється при цьому [1].

Таблиця 1.1 – Кількість пилу в колошниковых газах вагранок

| Тип вагранки | Ступінь забруднення | Концентрація пилу в колошникових газах, г/м$^3$ | Кількість пилу на 1 т сплава, кг |
|---|---|---|---|
| Холодно-повітряна | Нормальна | 6-11 | 5-10 |
| | Екстремальний діапазон | 2-15 | 2-12 |
| Гаряче-повітряна | Нормальна | 6-14 | 8-12 |
| | Екстремальний діапазон | 3-25 | 2-20 |

В табл. 1.2 показано залежність кількості газу від продуктивності вагранки [2].

Таблица 1.2 – Залежність кількості газу від продуктивності вагранки

| Продуктивність вагранки, т/год | Кількість димових газів, м$^3$/год |
|---|---|
| 2 | 2000-2600 |
| 3 | 2800-3600 |
| 4 | 3600-4600 |
| 5 | 4500-5800 |
| 7 | 6900-8600 |
| 10 | 9600-12000 |
| 15 | 12800-16000 |
| 20 | 18000-28000 |
| 25 | 24000-30000 |

Температура вагранних газів зазвичай коливається від 100 до 600 °С, а деяких випадках доходить до 900 °С. Щільність пилу вагранних газів дорівнює 2,56 г/см$^3$. Пил має приблизно дисперсний склад, наведений у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Дисперсний склад вагранкового пилу

| Вид дуття | Дисперсний склад,% (за масою) при частинках розміром, мкм | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 0-5 | 5-10 | 10-25 | 25-50 | >50 |
| Гаряче | 16,6 | 13,3 | 16,0 | 13,2 | 40,9 |
| Холоде | - | 2,4 | 6,2 | 21,8 | 69,6 |

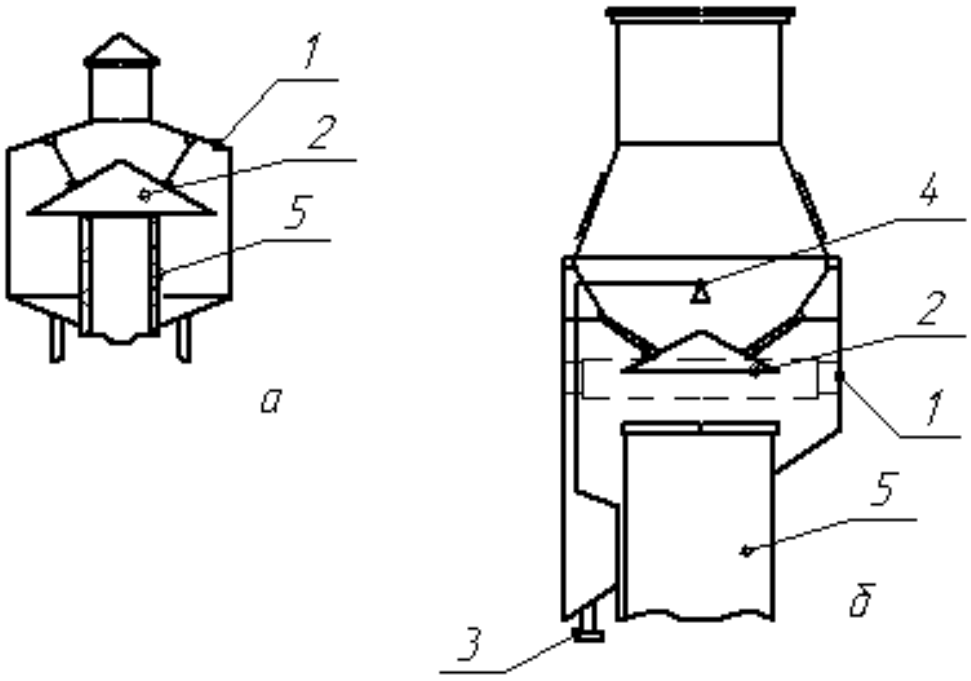
Обробка цих даних показала, що при гарячому дутті медіанний діаметр становить 30 мкм, а при холодному дутті – 70 мкм [3].

У чавуноливарному та сталеплавильному виробництві, крім викидів із вагранок, відбувається виділення інших шкідливих викидів, які уловлюються, очищаються та видаляються аспіраційними системами.

# 2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

## 2.1 Способи очищення газів, що відходять від вагранних печей

Способи очищення вагранних газів від пилу дуже різноманітні. Найбільш простий з них - застосування іскрогасників, що розміщуються на виході газів з вагранки [3]. Розрізняють сухі та мокрі іскрогасники (рис. 2.1).




а – сухий; б – мокрий

1 – корпус; 2 – відбивач; 3 – відведення води; 4 – форсунка; 5 – відведення газів від вагранки

Рисунок 2.1 – Загальні види іскрогасників

У сухих іскрогасниках випадання частинок пилу відбувається за рахунок дії гравітаційних та інерційних сил при виході з труби в камеру великих розмірів або поворотах газового потоку. Ефективність сухих іскрогасників невисока і не перевищує 40-50%. Природно, що вони вловлюють лише найбільший пил.

Дія мокрих іскрогасників ґрунтується на промиванні газового потоку розпиленою водою. При цьому частинки пилу змочуються, коагулюють,

обтяжуються та випадають із газового потоку, після чого їх відводять у вигляді шламу разом з водою. Ефективність мокрих іскрогасників дещо вища, але не перевищує 60-70%.

З метою запобігання викиду в атмосферу CO останнім часом вагранки постачають допальними пристроями.

Пальник, що працює на природному газі, встановлюють у зоні завалочного вікна.

У великих вагранках доцільно допалювати оксид вуглецю з використанням тепла, що виділяється в спеціальних рекуператорах для підігріву повітря не вище 160-190 °С.

Сухий спосіб уловлювання частинок пилу заснований на інерційному осадженні їх у пиловловлювачі шляхом зміни напрямку руху газів, зменшення швидкості їх руху, створення штучних перешкод тощо. При цьому способі очищення є можливість вловити лише частинки розміром 200 мкм і більше, що часто не відповідає вимогам санітарних норм. Однак через простоту споруди на практиці часто застосовують різні конструкції сухих пиловловлювачів [4].

Харківським інститутом Гіпротракторосільгоспмаш для Липецького тракторного заводу розроблено двоступінчасту схему очищення, тобто. поряд із сухим очищенням застосований пінний апарат (рис. 2.2).

Вагранoчні гази з вагранки 1 по газоходу 2 подаються на попереднє охолодження теплообмінник 3, а потім направляються в перший ступінь очищення 4, яка складається з групи циклонів типу ЦН15. Тут осідає грубий пил. Після попереднього очищення в циклонах гази направляються в пінний апарат 5, в якому промиваються, в результаті чого очищаються від дрібного пилу. Потім очищені гази витяжним вентилятором 6 викидаються в атмосферу Забруднена вода з пінного апарату видаляється трубопроводом 8.

Така схема очищення забезпечує достатню очистку газів, але вона складна в експлуатації.

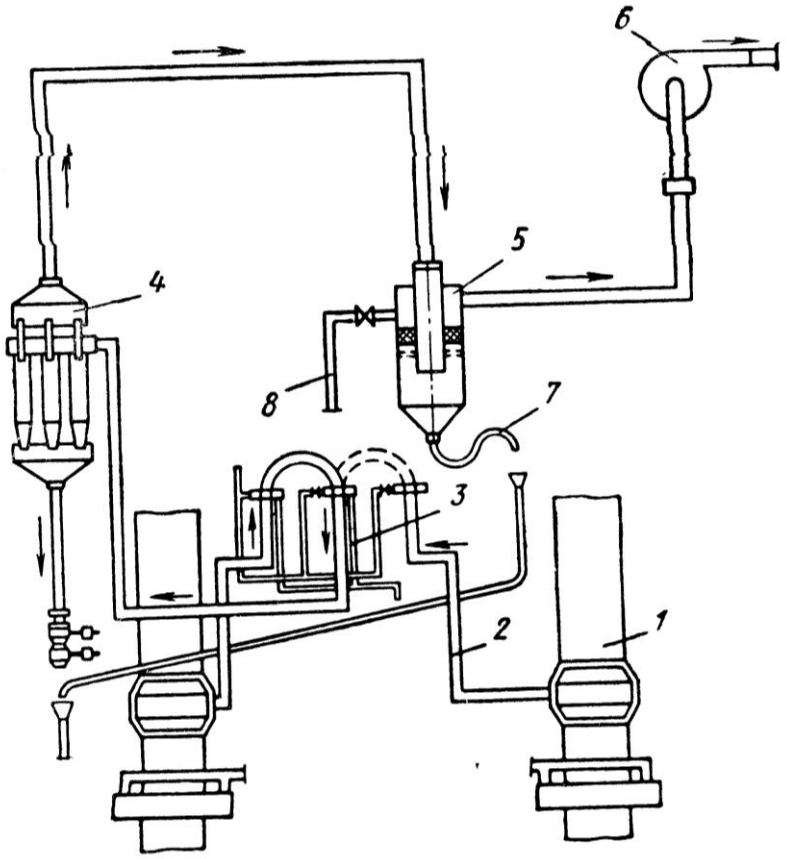
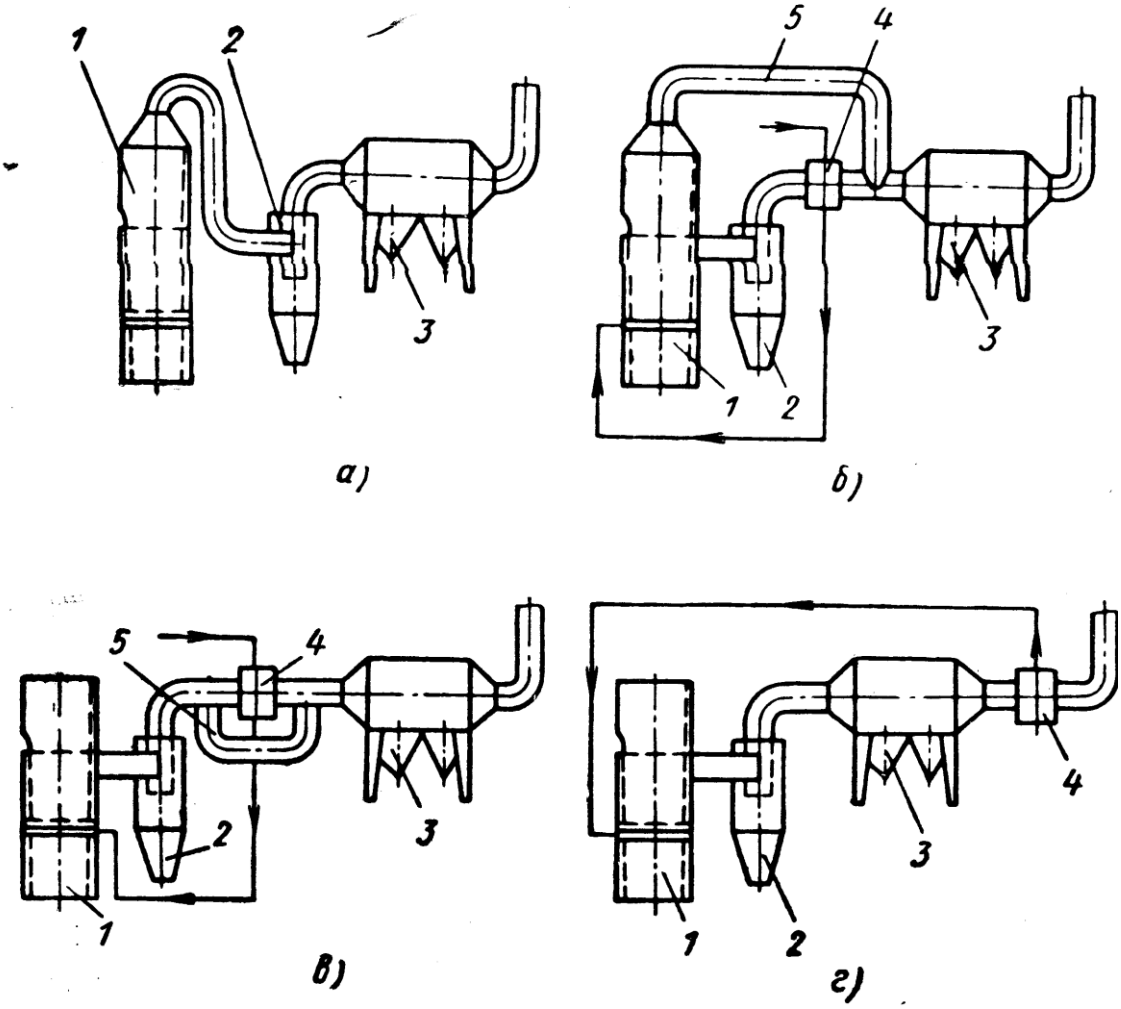



Рисунок 2.2 – Схема двоступеневого очищення вагранних газів

Широке застосування знайшли комбіновані схеми очищення від пилу вагранних газів із використанням електрофільтрів (рис. 2.3). За схемою очищення без утилізації тепла вагранкових газів з їх верхнім парканом забруднені гази з вагранки 1 направляються в циклон 2, а потім піддаються тонкому очищенню в електрофільтрі 3 (рис. 2.3 а)

У схемі очищення, показаної на рис. 2.3 б застосований теплообмінник, який використовується для підігріву дутьового повітря. Ваграночні гази проходять через циклон 2 і направляються теплообмінник 4, розташований до електрофільтра. Тут гази віддають тепло холодному повітрі, призначеному для дуття у вагранці. Після теплообмінника гази проходять тонке очищення електрофільтру 3. На рис. 2.3 б наведена схема в якій для відведення газів при вимиканні теплообмінника передбачено байпас 5. У разі вимкнення теплообмінника гази, минаючи його, направляються

безпосередньо в електрофільтр. При цьому забір вагранних газів проводиться не зверху, а збоку вагранки [4].




1 – вагранка; 2 – циклон; 3 – электрофильтр; 4 – теплообменник; 5 – байпас

Рисунок 2.3 – Схеми очищення вагранкових газів від пилу в електрофільтрах

На рис. 2.3 г наведено схему очищення з розташуванням теплообмінника за електрофільтром. При такому розміщенні теплообмінник захищається від засмічення. Застосування такої системи очищення дозволяє вловити 98-99% пилу, але досить дорога система.

У Польщі знайшли застосування вагранки (рис 2.4) з очищенням газів, що відходять, в циклоні 2 і з їх допалюванням в камері згоряння 6, в бічній стінці якої встановлений спеціальний пальник 7, призначений для підтримки

процесу горіння до моменту стабілізації теплообміну. Кількість газів, що спалюються, регулюється клапаном, встановленим на вході в циклон.

Для використання тепла спалених газів застосований радіаційно конвеєрний рекуператор 5, який з'єднаний безпосередньо з камерою згоряння. Рекуператор за допомогою газопроводів з'єднаний з ексгаустером 4. Теплообмін відбувається в умовах протитечії повітря, що нагнітається повітродувкою і продуктів, що відсмоктуються ексгаустером згоряння. Після ексгаустера гази викидаються в атмосферу через трубу 3.

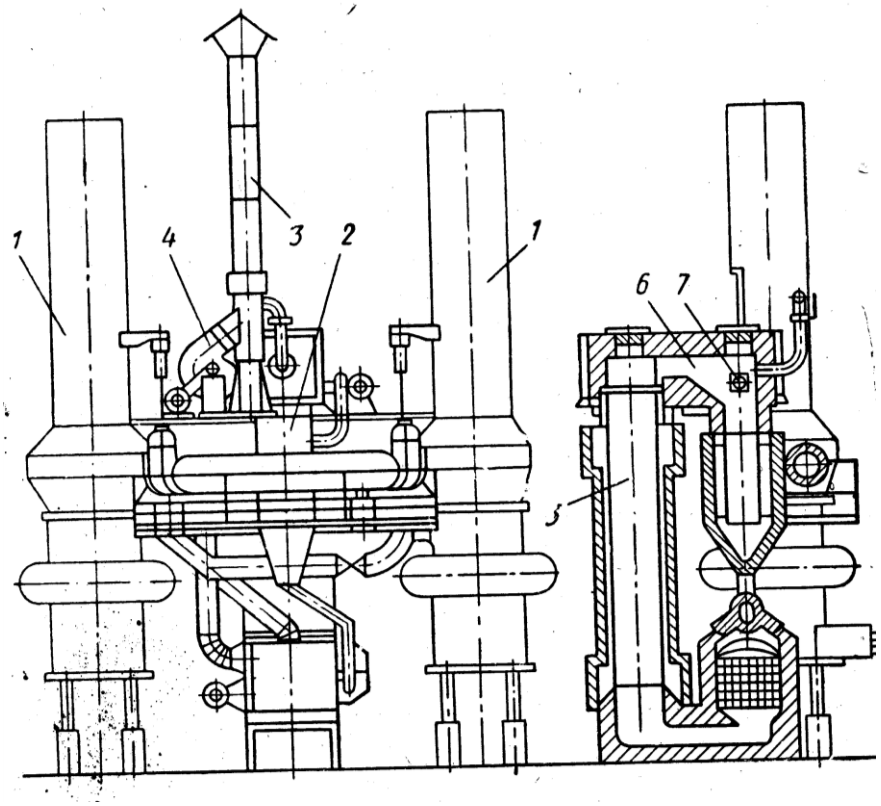



Рисунок 2.4 – Вагранки з очищенням та підігрівом дуття

Рекуператор можна встановлювати між вагранками 1 або поруч із ними залежно від місцевих умов.

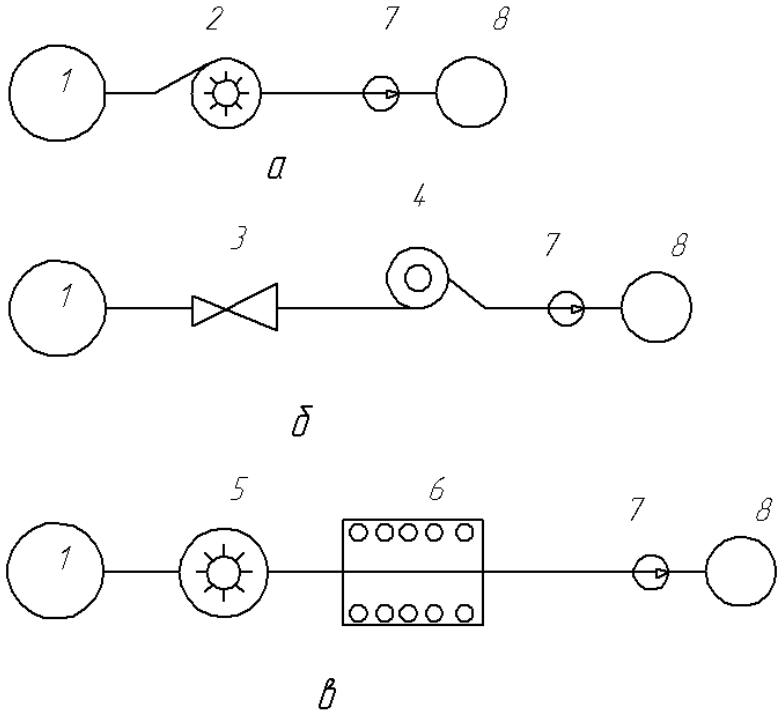
Найбільш широко застосовують трубчасті рекуператори, в яких використано інший спосіб підігріву дуття. Рекуператор встановлюють у верхній частині вагранки над вікном завантаження замість нормальної труби. За такої конструкції рекуператора ексгаустери зайві. Перевагою трубчастих рекуператорів є автоматичне видалення пилу внутрішньої поверхні. Завдяки

простому принципу дії конструкція рекуператорів легка та компактна. Рекуператор може бути встановлений на вагранках, що діють, без перебудови цеху.

Трубчасті рекуператори різних типів відрізняються між собою напрямом перебігу повітря по відношенню до напряму перебігу продуктів згоряння.

Слід зазначити, що підігрів повітря понад 200 °С у трубчастих рекуператорах, що застосовуються в Польщі, здійснюється за рахунок часткового згоряння дрібниці та пилу коксу в шахті вагранки, оскільки останній при завантаженні значно подрібнюється.

Для очищення вагранних газів великої продуктивності застосовують складніші апарати газоочищення – циклони з промиванням, скрубери Вентурі та електрофільтри (рис. 2.4).




а – з циклонами-промивателями конструкції СІВТ; б – зі скруберами Вентурі; в – з електрофільтрами

1 – вагранки; 2 – циклон-промивальник; 3 – труба Вентурі; 4 – краплеуловлювач; 5 – порожнистий скрубер; 6 – сухий електрофільтр; 7 – димосос; 8 – димова труба

Рисунок 2.4 – Схеми очищення газів великих вагранок

Знайшли широке застосування закриті вагранки із системою очищення вагранкових газів від пилу та окису вуглецю. На рис. 2.5 показана закрита вагранка конструкції «Гіпростанок». Гази з вагранки 1 надходять у камеру охолодження 2, а потім направляються на очищення в Вентурі трубу 3.

Потім очищені гази проходять циклонний краплевловлювач 4, де проводиться осадження крапель і додаткове очищення газів. З краплеуловлювача гази димососом 5 направляються в рекуператор 6 де вони допалюються і одночасно віддають тепло дуттю повітря. З рекуператора очищені гази надходять до атмосфери.

Перевагою такої схеми є достатня очистка газів. Крім того, до рекуператора надходять очищені від пилу гази, що оберігає його від засмічення. Недоліком є високий гідравлічний опір очисної системи.

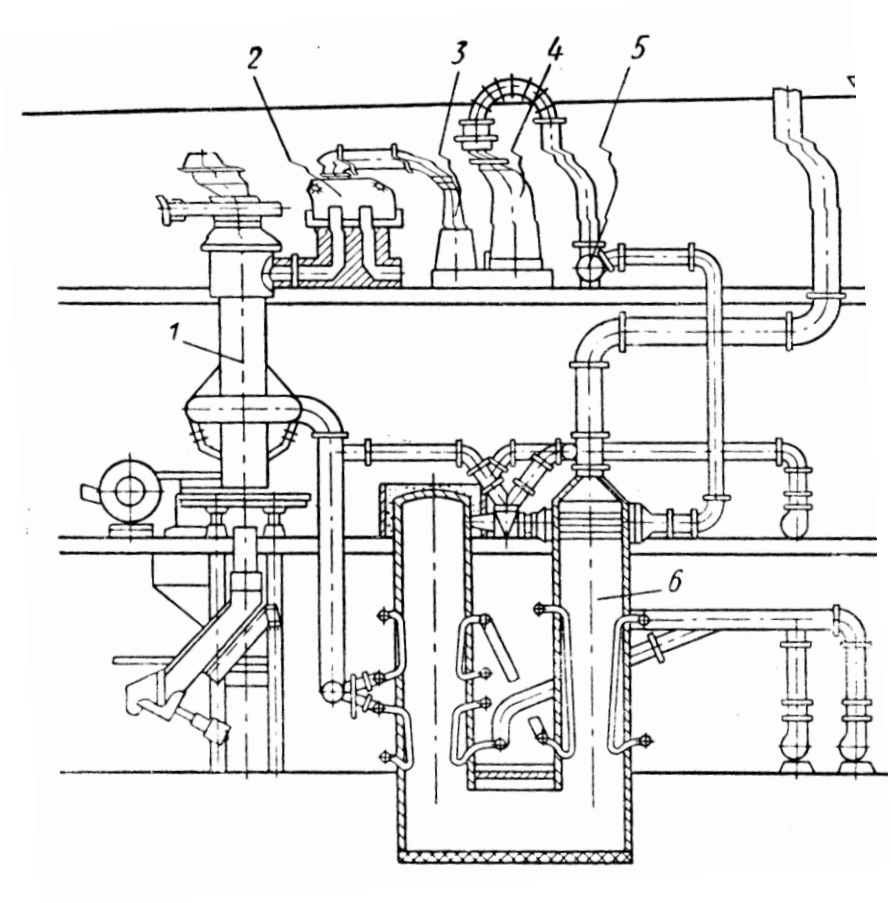



Рисунок 2.5 – Закрита вагранка конструкції «Гіпростанок»

Закриті вагранки дають найбільш повне очищення газів, що відходять, але для них потрібні великі виробничі площі.

## 2.2 Розрахунок основних газоочисних обладнань

### 2.2.1 Розрахунок рекуператора

Витрата газів від вагранних печей, які поступають в рекуператор [3]:

$$Qг = Q_0 \frac{(273 + tг) \cdot 101.3}{273 \cdot (Рбар - Рг)}$$

де $Р_{бар}$ – нормальний атмосферний тиск, кПа, 101,3 кПа;

$Р_г$ – розрідження газів, кПа, -0,1 кПа;

$Т_г$ – температура газів, 820 °С

$$Q = 60000 \cdot \frac{(273 + 820) \cdot 101,3}{(101,3 - 0,1) \cdot 273} = 240457,1 \quad м^3/ч$$

Обираємо рекуператор з фасонних шамотних блоків (каміння) з наступною технологічною характеристикою, табл. 2.1[5]:

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика

| | | |
|---|---|---|
| Об'єм повітря, що поступає в рекуператор, при 20 °С | $м^3$/год | 73000 |
| Температура підігрітого повітря (при температурі димових газів 950°С) | °С | 355 |
| Об'єм газів, що поступають в рекуператор | $нм^3$/год | 60000..85000 |
| Маса | кг | 19000 |

Відповідно до рівняння теплового балансу знаходимо температуру газів після рекуператора [6]:

$$Qв \cdot c_в \cdot (T_в''\text{-}T_в') = Qг \cdot c_г \cdot (T_г'\text{-}T_г''),$$

де $Qв$ – витрата повітря, $м^3$/год;

$c_в$ – теплоємність повітря при початковійтемпературі, кДж/($м^3$ год), 1,32 кДж/($м^3$ год) [7];

$T''$,$T'$ – початкова та кінцева температура, °С;

$c_г$– теплоёмкость газа при начальной температуре, кДж/(м$^3$ год).

Теплоємкість суміші газів при температурі 820 С, [7]:

$c_{O_2} = 1{,}453$ кДж/(м$^3$ год)

$c_{CO} = 1{,}389$ кДж/(м$^3$ год)

$c_{CO_2} = 2{,}141$ кДж/(м$^3$ год)

$c_{H_2O} = 1{,}675$ кДж/(м$^3$ год)

$c_{N_2} = 1{,}375$ кДж/(м$^3$ год)

$c_г = 0{,}01 \sum a_i \cdot c_i = 0.01(1{,}453 \cdot 15 + 1{,}389 \cdot 1 + 2{,}141 \cdot 5 + 1{,}675 \cdot 2 + 1{,}375 \cdot 77) = 1{,}431$,

кДж/(м$^3$ год)

$$T_г^{'} = \frac{240457{,}1 \cdot 1{,}431 \cdot 820 - 73000 \cdot 1{,}32 \cdot (355 - 20)}{240457{,}1 \cdot 1{,}431} = 726\ °C$$

### 2.2.2 Розрахунок порожнистого скрубера

Вихідні дані для розрахунку:

Тиск води попереду форсунок $P_ж$=0,4 МПа, [7];

Початкова температури води $t_н$=20 °С;

Вологість газів на вході в скрубер 2 % об, що відповідає $f_0$=16 г/м$^3$ за н.у.;

Втрата тиску в скрубері $\Delta P_{ап} = 200$ *Па*, [3]

1. Визначаємо витрату вологих ваграночних газів за нормальних умов на вході в скрубер [7], м$^3$/с:

$$V_o = V_{OC}\left(1 + \frac{f_0}{0{,}804}\right) \cdot \frac{101325 \cdot T}{273 \cdot P}$$

$$V_o = \frac{60 \cdot 10^3}{3600}\left(1 + \frac{0{,}016}{0{,}804}\right) = 17{,}7$$

2. Визначаємо ентальпію на вході в скрубер ($t_1$= 726 °С), [7]:

$$i_1 = 0{,}01 \cdot (15 \cdot 1043{,}6 + 1 \cdot 998{,}1 + 5 \cdot 1521{,}9 + 2 \cdot 1194{,}3 + 77 \cdot 982{,}9) = 1023{,}3 \quad кДж/м^3$$

3. Приймаємо, що на виході зі скрубера газ має температуру $t_г$=47,3 °С (при $f_0$=16 г/м$^3$ та початковій температурі 820 °С) [7].

Ентальпія газу за цієї температури:

$$i_2 = 0{,}01 \cdot (15 \cdot 62{,}3 + 1 \cdot 61{,}58 + 5 \cdot 80{,}4 + 2 \cdot 71{,}2 \cdot 77 \cdot 61{,}39) = 62{,}7 \quad кДж/м^3$$

4. Кількість теплоти, що передається в скрубері від газу до води:

$$Q = V_0(i_1 - i_2) = 17{,}7 \cdot (1023{,}335 - 62{,}7) = 17003{,}2 \text{ кВт}$$

Приймаємо коефіцієнт випаровування води в скрубері φ=0,5 при кінцевій температурі води $t_k$=42,3 $^0$С , [7]

Середня температура газу в скрубері:

$$t_{ср} = \frac{(t_1 + t_2)}{2} = \frac{(726 + 47{,}3)}{2} = 386{,}6°C$$

5. Ентальпія насиченої пари при середній температурі газу в скрубері:

$$i_п = 3211{,}77 \quad кДж/кг$$

Ентальпія води за початкової температури $t_н$=20 $^0$С, $i_н = 83{,}9 кДж/кг$, при кінцевій температурі (42,3 °С) $i_к = 177.124 \quad кДж/кг$

6. Масова витрата води в скрубері:

$$\boldsymbol{M_в = \frac{Q}{\phi(i_п - i_Н) + (1 - \phi)(i_п - i_Н)}}$$

$$\boldsymbol{M_в = \frac{17003{,}2}{0{,}5(3211{,}7 - 83{,}9) + (1 - 0{,}5) \cdot (177{,}124 - 83{,}9)} = 12{,}08 \quad кг/с}$$

7. Об'ємна витрата газу за робочих умов на вході в скрубер:

$$Q_1 = Q_0 \frac{(273 + T) \cdot 101{,}3}{273 \cdot (B + P_.)}$$

$$Q_1 = 17.7 \frac{(273 + 726) \cdot 101325}{273 \cdot (101325 - 100 - 1200)} = 65.78 \quad м^3/с$$

8. Питома витрата води на зрошення, кг/м$^3$:

$$m = \frac{M_в}{V_1} = 65.78 = 0,18$$

9. Вологість газу на виході зі скрубера за нормальних умов, г/м$^3$:

$$f_{o_2} = f_{o_1} + \frac{\phi \cdot M_в}{V_0}$$

$$f_{O2} = 16 + \frac{0,5 \cdot 12,08 \cdot 10^3}{17,7} = 357,2$$

10. Об'ємна витрата газу за робочих умов на виході з порожнього скрубера, м$^3$/с:

$$Q_г = Q_{OC}\left(1 + \frac{f_{0_2}}{0,804}\right) \cdot \frac{101325 \cdot T}{273 \cdot P}$$

$$Q_г = \frac{60000}{3600} \cdot \left(1 + \frac{0,357}{0,804}\right) \cdot \frac{(273 + 47.3) \cdot 101325}{273 \cdot (101325 - 100 - 1200 - 200)} = 20.7$$

11. Середня різниця температур між газом і водою в скрубері, °С:

$$\Delta t = \frac{(t_1 - t_k)(t_2 - t_H)}{ln\frac{t_1 - t_k}{t_2 - t_H}} = \frac{(726 - 42.3) - (47.3 - 20)}{ln\frac{726 - 42.3}{47.3 - 20}} = 205$$

13. Густина вологого газу за робочих умов на виході зі скрубера, кг/м$^3$:

Згідно з додатком 1 [7] виписуємо щільності газів та визначаємо щільність сухої частини газу:

$$\rho oc = 0,01 \cdot (15 \cdot 1,429 + 77 \cdot 1,257 + 1 \cdot 1,25 + 5 \cdot 1,976 + 2 \cdot 0,804) = 1,31 \quad кг/м^3$$

$$\rho_г = \frac{(\rho_{OC} + f_0) \cdot 0,804}{1 + \frac{f_0}{0,804}} \cdot \frac{273 \cdot P}{101325 \cdot T}$$

$$\rho_г = \frac{(1,31 + 0,357) \cdot 0,804}{0,804 + 0,03579} \cdot \frac{273 \cdot (101325 - 100 - 1200 - 200)}{101325 \cdot (273 + 47,3)} = 1,08$$

Вибираємо порожнистий скрубер типу АКРП. Швидкість руху газу 4-5 м/с [9]

14. Об'ємний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м$^3$·°С):

$$K_0 = (17,4 + 115m \cdot \omega_2)\rho_2 \cdot \omega_2$$

$$K_0 = (17{,}4 + 115 \cdot 0{,}18 \cdot 4{,}9_2)1{,}08 \cdot 4{,}9 = 628{,}8$$

15. Необхідний обсяг скрубера, м$^3$:

$$V_{скр} = \frac{10^3 \cdot Q}{K_0 \cdot \Delta t}$$

$$V_{скр} = \frac{10^3 \cdot 17003{,}2}{628{,}8 \cdot 205{,}125} = 131{,}8$$

16. Діаметр скруберу, м:

$$D = \sqrt{\frac{Q_2}{0{,}785 \cdot \omega_2}}$$

$$D = \sqrt{\frac{20.7}{0{,}785 \cdot 4{,}9}} = 2{,}3$$

Вибираємо скрубер типу АКРП зі стандартним діаметром 2,8 м, висотою 17,5 м, масою – 15,2 т, [9]

Тоді фактична швидкість у скрубері складе:

$$\omega_ф = \frac{4 \cdot 20{,}7}{3{,}14 \cdot 2{,}8^2} = 3{,}36 м/с$$

### 2.2.3 Розрахунок електрофільтру

Проводимо перерахунок газового складу, оскільки збільшився вміст вологи з 16 г/м$^3$ до 357,2 г/м$^3$.

$\omega_{O_2} = 10{,}39\ \%$

$\omega_{CO} = 0{,}69\ \%$

$\omega_{CO_2} = 3{,}4\ \%$

$\omega_{H_2O} = 32{,}21\ \%$

$\omega_{N_2} = 53{,}31\%$

Задавшись швидкістю фільтрації в електрофільтрі, що дорівнює 1 м/с, розраховуємо площу активного перерізу [3]:

$$F = \frac{V}{w_г} = \frac{20,7}{1} = 20,7 \quad м^2$$

Обираємо електрофільтр типу ЕГВ 1-9-7,5-6-3 [10].

Площа активного перетину 29,5 м$^2$.

Робимо перерахунок швидкості фільтрації:

$$w_г = \frac{20,7}{29,5} = 0,7 \quad м/с$$

Відношення щільності газів за робочих умов до щільності газів за стандартних умов ($t_{ст}$=20 °С; $P_{ст}$=101,3 кПа) [11]:

$$\beta = \frac{(P_{бар} + P_г) \cdot T_{ст}}{101,3(273 + t_г)} = \frac{(101,3 - 1,5) \cdot 293}{101,3(273 + 47,3)} = 0,9$$

Критична напруженість електричного поля:

$$E_{кр} = 3,04(\beta + 0,0311\sqrt{\frac{\beta}{R_1}}) \cdot 10^6 = 3,04(09 + 0,0311\sqrt{\frac{0,9}{0,001}}) \cdot 10^6 = 5,57 \cdot 10^6 \frac{В}{м}$$

де $R_1$ – еквівалентний радіус коронуючого електрода, приймаємо рівним $R_1$=0,001 м, [11].

Критична напруга корони для електрофільтру:

$$U_{кр} = E_{кр} \cdot R_1 \left(\frac{\pi \cdot H}{S} - 2.3\,lg\frac{2\pi \cdot R_1}{S}\right) =$$

$$= 5,57 \cdot 10^6 \cdot 0.001 \cdot \left(\frac{3.14 \cdot 0.46}{2 \cdot 0.18} - 2.3\,lg\frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.001}{0.18}\right) = 40,99 \cdot 10^3 В$$

Рухливість іонів газової суміші за нормальних умов, [10]:

$$K_0 = 0,01 \sum K_{0i} \cdot a_i$$

$$K_0 = 0{,}01(77 \cdot 1{,}84 + 15 \cdot 1{,}84 + 1 \cdot 1{,}15 + 5 \cdot 0{,}96 + 2 \cdot 0{,}57) \cdot 10^{-4} = 1{,}76 \cdot 10^{-4}$$

де $K_{oi}$ – рухливість газових молекул за нормальних умов, м$^2$/В·с;

$a_{oi}$ –объемное содержание компонентов газовой смеси, %.

Рухливість іонів газової суміші за робочих умов:

$$K = K_0 \cdot \frac{(273+t_г)\cdot 101{,}3}{273(P_{бар} \pm P_г)} = 1{,}76 \cdot 10^{-4} \frac{(273+47{,}3)\cdot 101{,}3}{273\cdot(101{,}3-1{,}5)} = 2{,}09 \cdot 10^{-4} м^2/В \cdot с$$

Лінійна щільність струму корони:

$$i_0 = \frac{4K\pi^2 f}{9 \cdot 10^9 \left(\frac{\pi H}{S} - 2.3\, lg \frac{2\pi R_1}{S}\right)} \cdot u(u - u_{кр})$$

Приймаємо $f$ =0,043 при цьому співвідношенні $\frac{H}{S}$ [7]

$$i_0 = \frac{4 \cdot 2{,}09 \cdot 10^{-4} \cdot \pi^2 \cdot 0.043}{9 \cdot 10^{10}\left(\frac{\pi \cdot 0{,}15}{0{,}18} - 2.3\, lg \frac{2\pi \cdot 0{,}001}{0{,}18}\right)} \cdot 80 \cdot 10^3 (80 \cdot 10^3 - 40{,}99 \cdot 10^3) = 1{,}2 \cdot 10^{-4} А/м$$

10. Напруженість електричного поля:

$$E = \sqrt{\frac{8 \cdot i_0 \cdot H}{4 \cdot \pi \cdot K \cdot \varepsilon_0 \cdot S}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}15}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 2{,}09 \cdot 10^{-4} \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}18}} = 1{,}86 \cdot 10^5 \frac{В}{м}$$

Динамічна в'язкість окремих компонентів, що входять до складу газів, за робочих умов [7]:

$$\mu_{o_2} = 20{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273 + 131}{453 + 131}\left(\frac{273 + 47{,}3}{273}\right)^{1{,}5} = 17{,}8 \cdot 10^{-6} Па \cdot с$$

$$\mu_{co} = 14{,}6 \cdot 10^{-6} Па \cdot с$$

$$\mu_{co_2} = 12{,}04 \cdot 10^{-6} Па \cdot с$$

$$\mu_{H_2O} = 8{,}79 \cdot 10^{-6} Па \cdot с$$

$$\mu_{N_2} = 14{,}9 \cdot 10^{-6} Па \cdot с$$

Молярна маса газової суміші:

$$M = 0{,}01 \sum a_i \cdot M_i = 0{,}01(28 \cdot 77 + 32 \cdot 15 + 28 \cdot 1 + 44 \cdot 5 + 28 \cdot 2) = 29{,}4 \quad кг/моль$$

Динамічну в'язкість газової суміші визначаємо з виразу:

$$\frac{M}{\mu} = \sum \frac{a_i \cdot M_i}{\mu_i} = \left(\frac{28 \cdot 0{,}5331}{14{,}9 \cdot 10^{-6}} + \frac{32 \cdot 0{,}1039}{17{,}8 \cdot 10^{-6}} + \frac{0{,}0069 \cdot 28}{14.6 \cdot 10^{-6}} + \frac{0{,}034 \cdot 44}{12{,}04 \cdot 10^{-6}} + \frac{0{,}3221 \cdot 28}{8{,}79 \cdot 10^{-6}}\right) = 2{,}35 \cdot 10^6$$

$$\mu = M / \frac{M}{\mu} = 12{,}5 \cdot 10^{-6} Па \cdot с$$

Швидкість дрейфу частинок:

$$W_{др} = \frac{0{,}118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot r}{\mu} = \frac{0.118 \cdot 10^{-10} \cdot (1{,}86 \cdot 10^5)^2 \cdot r}{12{,}5 \cdot 10^{-6}} = 0{,}033 \cdot 10^6 r \quad м/с$$

Питома площа поверхні осадження:

$$f = \frac{Fэ}{Vг} = \frac{1600}{20{,}7} = 77{,}3 \quad м^2 \cdot с/м^3,$$

де $Fэ$ - площа поверхні осадження, м$^2$ [8]

Фракційні коефіцієнти очищення газів від пилу визначається за формулою:

$$\eta = 1 - e^{-f \cdot w_д}$$

$$\eta_{<5} = 0{,}99 \qquad \eta_{5-10} = 0{,}99999 \approx 1$$

Ефективність очищення частинок пилу фракцією понад 10 мкм приблизно дорівнює 100%.

Загальний коефіцієнт очищення:

$$\eta' = \sum \frac{\eta_{фр} \cdot Ф_{фр}}{100} = \frac{0{,}99 \cdot 17 + 1 \cdot 83}{100} = 0{,}9983$$

Запиленість газу після електрофільтру:

$$z_г = z_1(1 - \eta') = 11(1 - 0{,}9983) = 0{,}0187 г/м^3$$

### 2.2.4 Розрахунок агрегатів живлення

Вибір апарату роблять за необхідною силою випрямленого струму:

$$I = L \cdot i_o$$

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

$i_o$ - лінійна щільність струму

$$L = n_n \cdot \frac{l_n}{S_o} \cdot l_э$$

де $n_n$ - кількість проходів;

$l_n$ - довжина 1 поля;

$$L = 9 \cdot \frac{5{,}13}{0{,}18} \cdot 7{,}5 = 3750 \ \ м$$

$$I = 1{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot 5760 = 691{,}2 \quad мА = 0{,}6912 \quad А$$

Вибираємо агрегат живлення АТПОМ-400, його характеристика

$I_{max}$

$I_{ном} = 600 \ \ мА$

$P = 45 \ \ кВт.$

Повна потужність, що споживається електрофільтром:

$$P = \frac{U_m \cdot I_ф \cdot K_ф \cdot \cos \phi}{1{,}41 \cdot \eta}$$

де $U_m$ - амплітудна напруга, кВ;

$I_ф$ - середня сила струму корони, А;

$K_\phi$ - коефіцієнт форми випрямленого струму;

$cos\,\phi$- коефіцієнт потужності

$\eta$ - к.к.д. агрегату.

$$P = \frac{80000 \cdot 0.6912 \cdot 1.3 \cdot 0.83}{1{,}41 \cdot 0.9} = 42.016 \quad кВ$$

## 2.3 Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту

Аеродинамічний розрахунок газового тракту полягає у визначенні діаметрів та опорів на ділянках тракту.

Діаметр газопроводу визначається:

$$d = 1.13\sqrt{\frac{V}{\omega}}.$$

При вибраному значенні діаметра визначають фактичну швидкість газів:

$$\omega = 1.27\frac{V}{d^2}.$$

Загальний опір газового тракту визначається, Па:

$$\Delta P = \Delta P_l + \Delta P_m.$$

Втрати за довжиною газоходу визначаються, Па:

$$\Delta P_l = \lambda\frac{l}{d}\cdot\rho\cdot\frac{\omega^2}{2}.$$

Місцеві опори розраховуються за формулою, Па:

$$\Delta P_m = \sum\xi\cdot\frac{\omega^2}{2}\cdot\rho$$

На рис. 2.6 представлена схема газовідвідного тракту, що розраховується.

Ділянка I (рекуператор – порожнистий скрубер).

Ділянка I I (порожнистий скрубер– електрофільтр)

Ділянка I I I (електрофільтр– димова труба)

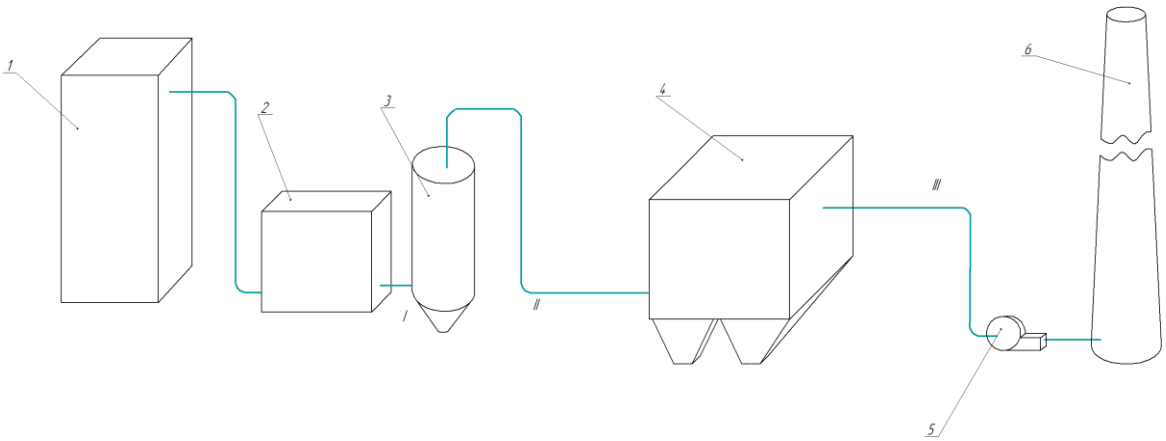
Ділянка I

Вихідні дані:

Витрата газу - 65,78 м$^3$/с

Температура газів після рекуператору726$^0$ С

Густина газу – 0,34 кг/м$^3$




1 – вагранка; 2 – рекуператор; 3- порожнистий скрубер; 4 – електрофільтр; 5 – вентилятор; 6- димова труба

Рисунок 2.6 – Схема газовідвідного тракту

Приймаємо швидкість руху газу газопроводі після рекуператора 19 м/с. Тоді:

$d = 1.13\sqrt{\frac{65,78}{19}} = 2,1$ м – цей діаметр відповідає стандартному значенню.

Втрати по довжині газоходу , Па:

$$\Delta P_{1_l} = 0,02\frac{17}{1,1} \cdot 0,34 \cdot \frac{19^2}{2} = 18,97 \ Па$$

Місцеві опори, Па:

$$\Delta P_{1_m} = 1,513 \cdot \frac{19^2}{2} \cdot 0,34 = 92,85 \quad Па$$

Види місцевих опорів на ділянці І:

плавний поворот на $30^0$- 0,097 [3, стр 207]

плавний поворот на $340^0$– 1,096

конфузор (плавне звуження) – 0,32

**Всього: 1,513**

Загальний опір газового тракту, Па:

$$\Delta P = 18,97 + 92,85 = 111,82 \quad Па.$$

Аналогічно розраховуємо опір газопроводу на наступних ділянках.

Види місцевих опорів на ділянці II:

плавный поворплавний поворот от на $90^0$, 3шт- 0,87 [3, стр 207]

дифузор (плавне розширення) – 0,05

**Всього: 0,92**

Види місцевих опорів на ділянці III:

конфузор- 0,5

плавний поворот на $90^0$, 3шт- 0,87

дифузор (вихід із вентилятору) – 0,41 [3, стр 207]

плавний поворот на $25^0$, 1шт- 0,081

**Всього: 1,361**

Результати розрахунку заносимо в табл. 5.

Таблиця 2.2 - Результати аеродинамічного розрахунку газового тракту

| **Номер ділянки** | **t, $^0$C** | **$Q_р$, м$^3$/с** | **ρ, кг/м$^3$** | **l, м** | **w,м/с** | **d, м** | **$\Delta P_l$, Па** | **$\xi$** | **$\Delta P_м$, Па** | **$\Delta P_\Sigma$, Па** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| рекуператор | 820 | 66,79 | | | | | | | | 1200 |
| I | 726 | 65,78 | 0,34 | 17 | 19 | 2.1 | 18,97 | 1.513 | 92,85 | 111,82 |
| Порожнистий скрубер | 726 | 65,78 | 0,34 | | | | | | | 200 |
| II | 47,3 | 20,7 | 1,08 | 22 | 21.8 | 1.1 | 101.7 | 0.92 | 236.1 | 337.8 |
| електрофільтр | 47,3 | 20,7 | 1,08 | | | | | | | 200 |
| III | 47,3 | 163,8 | 1,08 | 29 | 21.8 | 1.1 | 134 | 1.361 | 349.0 | 483 |
| Итого | | | | | | | | | 2532.62 | |

## Аеродинамічний розрахунок димової труби

Гідравлічний опір димової труби визначається формулою, Па:

$$\Delta P_{тр} = \lambda \cdot \frac{H_{тр}}{D_{уст}} \cdot \frac{V_{уст}}{2} \cdot \rho_г,$$

де λ – гідравлічний коефіцієнт тертя для труби: для бетонних труб приймаємо λ = 0,05[3];

$H_{тр}$ – висота димової труби;

$D_{уст}$ - величина діаметру гирла труби $D_{уст}$ = 2.5 м;

$\rho_г$ – густина газів на вході в димову трубу; $\rho_г$ = 1,08 кг/м$^3$;

$V_{уст}$ – швидкість газу в гирлі димової труби, м/с:

$$V_{уст} = \frac{Q_р}{S_{уст}} = \frac{4Q_р}{n \cdot D_{уст}^2} = \frac{4 \cdot 20,7}{3.14 \cdot 2,5^2} = 4,3 \frac{м}{с}.$$

$$\Delta P_{тр} = 0,005 \cdot \frac{80}{2,5} \cdot \frac{4,3^2}{2} \cdot 1,08 = 16 \quad Па$$

Динамічний тиск, який необхідно створити для швидкості газів $V_{уст}$ = 4.3 м/с, Па:

$$P_{дин} = \frac{V_{уст}^2}{2} \cdot \rho_г = \frac{4,3^2}{2} \cdot 1,08 = 30 Па$$

Сумарний гідравлічний опір димової труби, Па:

$$P_{\Sigma} = \Delta P_{тр} + P_{дин} = 16 + 30 = 46 \quad Па.$$

Середня температура повітря за висотою труби, $^0$С:

$$t_в' = t_в - 0,5 \cdot \sqrt{H_{тр}},$$

де $t_в$ – максимальна літня температура атмосферного повітря, $^0$С;

$t_в$ = 27 $^0$С.

$$t_в' = 27 - 0{,}5 \cdot \sqrt{80} = 22{,}5℃$$

Густина атмосферного повітря, при 22,5 $^0$С дорівнює $\rho_{атм}$ = 1,15 кг/м$^3$.

Тяга, створювана димовою трубою, Па:

$$P_c = (\rho_{атм} - \rho_г) \cdot g \cdot H_{тр} = (1{,}15 - 1{,}08) \cdot 9{,}81 \cdot 80 = 54{,}9Па$$

Потреба додаткового тиску, Па:

$$P_{доп} = P_c - P_\Sigma \quad = 54{,}9 - 46 = 8{,}9 \quad Па$$

Потреба додаткового тиску відсутня

**Вибір та розрахунок газодутьового обладнання**

Продуктивність димососа $П_д$ приймаємо із запасом 10% по відношенню до розрахункової кількості газів у димососа, м$^3$/год:

$$П_д = \frac{1{,}1 \cdot Q_р \cdot 101.3}{B} = \frac{1.1 \cdot 20{,}7 \cdot 101.3}{101{,}3} = 22{,}77\frac{м^3}{с} = 81972\frac{м^3}{ч}$$

Коефіцієнт перерахунку:

$$K = \frac{(273 + t)101{,}3 \cdot \rho_г}{(273 + T) \cdot B \cdot \rho_в} = \frac{(273 + 47{,}3)101{,}3 \cdot 1{,}08}{(273 + 400) \cdot 101{,}3 \cdot 1{,}293} = 0{,}4$$

де t – температура газу попереду димососу $^0$С;

Т – температура відповідно до каталогу $^0$С, [3].

Створюваний димососом тиск:

$$\Delta P_д = 1{,}2 \cdot K \cdot \Delta P_\Sigma$$

$$\Delta P_д = 1{,}2 \cdot 0{,}4 \cdot (100 + 2532{,}62) = 1263{,}6 \text{ Па}$$

де 1,2 – коефіцієнт запасу [9];

$\Delta P_\Sigma$ – сумарний опір газовідвідного тракту, Па;

К – коефіцієнт перерахунку.

Потужність на валу вентилятора, кВт:

$$N = \frac{Q_р \cdot \Delta P_в}{\eta} = \frac{20{,}7 \cdot 1263{,}6}{0{,}7} \cdot 10^{-3} = 37{,}4 \quad кВт$$

На основі аеродинамічного розрахунку газовідвідного тракту вибираємо димосос типу ДН-19Н-Ж.

Технічна характеристика вентилятора представлена у таб. 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічна характеристика вентилятора

| | |
|---|---|
| - продуктивність, тис м$^3$/год | 106 |
| - повний тиск, Па | 2720 |
| - к.к.д., % | 7 |
| - споживана потужність, кВт | 98 |
| - частота обертання, об/хв | 1000 |
| - маса, кг | 6800 |

# 3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

## 3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Сталепелавильний цех відноситься до категорії гарячих виробництв через постійну дію надлишкового тепла, що утворюється внаслідок металургійних процесів. Робоче середовище біля вагранок в таких умовах характеризується підвищеною температурою повітря, що значно ускладнює виконання виробничих операцій. Особливо небезпечним є теплове випромінювання, джерела якого — це розжарений чавун, шлаки та розігріта футеровка внутрішніх поверхонь печі. Висока температура цих об'єктів сприяє виділенню великої кількості інфрачервоного випромінювання, особливо при експлуатації печей з відкритими вікнами або люками, що створює ризик опромінення працівників.

Інтенсивність інфрачервоного випромінювання на виробничих постах залежить від температурних характеристик, площі випромінюючих поверхонь і відстані між ними та працівниками. Зафіксовані значення теплового навантаження можуть досягати 560 Вт/м², що майже у чотири рази перевищує гранично допустиму норму в 140 Вт/м². Такі умови призводять до надмірного навантаження на терморегуляторну систему організму, що може викликати порушення водно-сольового балансу, загальну слабкість, втрату працездатності, а в критичних випадках — теплові патології, включаючи теплові удари, судоми, перегрівання та ураження органів зору (наприклад, катаракту).

Ще однією важливою проблемою є запиленість повітряного середовища. Повітря в ливарному цеху може містити до 22 мг/м³ пилу, що у понад чотири рази перевищує нормативну концентрацію. Доменний пил має виражену фіброгенну дію, проникаючи глибоко в дихальні шляхи працівників. Його дія асоціюється з підвищеним ризиком виникнення

хронічних бронхо-легеневих захворювань, а також може подразнювати слизові оболонки очей і шкірні покриви.

Крім того, додаткову небезпеку створюють високий рівень шуму та вібрації. Шум виникає під час роботи потужних механізмів, транспортування матеріалів і термічної обробки металу. Його рівень часто перевищує 80 дБА, що вважається граничним для тривалого перебування без засобів захисту. Наслідками можуть бути зниження слуху, втрата концентрації, емоційне виснаження та порушення координації.

Вібраційний вплив у зоні плавильника не перевищує встановлені нормативи, однак його наявність усе ж впливає на функціонування опорно-рухової та нервової систем. В сукупності з іншими шкідливими факторами — високими температурами, запиленістю та шумовим навантаженням — це зумовлює віднесення умов праці на цій ділянці до шкідливих і тяжких. Дані щодо рівнів впливу на здоров'я працівників наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Оцінка факторів виробничого й трудового процесу

Професія: плавильник

| № | Фактори виробничого середовища й трудового процесу | Норматив. значення (ГДК, ГДУ) | Фактичне значення | III клас Шкідливі та небезпечні умови та характер праці | | | Тривалість дії фактора за зміну, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | I ст. | II ст. | III ст. | |
| 1 | Шкідливі хімічні речовини, мг/м$^3$<br>2 клас небезпеки<br>марганцю оксиди<br>3 клас небезпеки<br>азоту діоксид<br>ангідрид сірчаний<br>вуглецю оксид | <br><br><br>0,3<br><br>2,0<br>10,0<br>20,0 | <br><br><br>0,28<br><br>1,6<br>6,8<br>13,5 | | | | 80 |
| 2 | Пил переважно фіброгенної дії, мг/м$^3$ | 4 | 18,5 | | 4,6 р | | 80 |
| 3 | Вібрація (загальна і локальна), дБ | 92 | 85 | | | | 80 |
| 4 | Шум, дБА | 80 | 86 | 6 | | | 80 |
| 5 | Інфразвук, дБ | | | | | | |
| 6 | Ультразвук, дБ | | | | | | |
| | Мікроклімат в приміщенні в теплий період року | | | | | | |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | - температура повітря,°С | 15…26 | 37 | | | 10 | 90 |
| | - швидкість руху повітря, м/с | 0,2…0,6 | 0,45 | 1,5р | | | 90 |
| | - відносна вологість повітря,% | <75 | 44 | | | | |
| | - інфрачервоне випромінювання, Вт/м$^2$ | 140 | 560 | | 560 | | 90 |
| 7 | Важкість праці | 3 | 3 | | | | |

### 3.2 Заходи з поліпшення умов праці робітників сталеплавильного цеху

У сталеплавильному виробництві функціонує значна кількість технологічного обладнання, що є джерелом сильного шумового навантаження. Робота агрегатів великої потужності та механізмів транспортування матеріалів створює високий рівень звукового тиску, який негативно впливає на комфорт і безпеку праці. Раціональна організація виробничого процесу, включаючи чітке чергування періодів активної роботи та відпочинку, має вирішальне значення для профілактики професійних хвороб, пов’язаних із впливом шуму. Важливо, щоб тривалість дії шуму не перевищувала 50–60% робочої зміни, адже довготривалий вплив може викликати функціональні порушення нервової системи та слуху.

Для боротьби з перегрівом повітря у цеху застосовуються комбіновані вентиляційні системи та аераційні пристрої, а також проводиться теплоізоляція джерел надмірного тепловиділення. Одним з найефективніших заходів зменшення впливу теплового випромінювання є встановлення спеціальних екранів, що можуть відбивати, поглинати або відводити тепло. Важливим елементом захисту працівників є спецодяг, виготовлений із вогнестійких і термостійких матеріалів, який повинен бути одночасно зручним, міцним та добре вентильованим.

Тривале перебування у зонах підвищеного теплового навантаження призводить до активної втрати вологи організмом, що спричиняє згущення

крові, погіршення функціонування серцево-судинної системи, а також порушення обміну речовин. Щоб уникнути таких наслідків, необхідно своєчасно відновлювати рідинний баланс. З метою компенсації втрати рідини, мікроелементів і солей, працівникам забезпечують споживання охолодженої підсоленої води з концентрацією солей 0,5%, у кількості до 4–5 літрів на одну зміну.

Підтримання належного мікроклімату в приміщеннях виробництва передбачає контроль основних параметрів повітряного середовища: хімічного складу, температури, вологості та швидкості руху повітря. Для цього впроваджуються заходи з регулювання мікроклімату згідно з державними будівельними нормами (ДБН В.2.5-67:2013), включаючи системи опалення й припливно-витяжної вентиляції.

З метою зниження рівня шуму безпосередньо на робочих місцях, особливо в зоні роботи горнового, рекомендується встановлення спеціальних звукоізоляційних кабін, використання шумознижувальних елементів - ущільнювачів для нагрівальних агрегатів, а також шумоглушників у системах повітроводів. Ці заходи дозволяють зменшити шкідливий вплив шуму на здоров’я працівників та підвищити загальну ергономіку робочого простору.

### 3.3 Виробнича санітарія

Опалення основних зон виробництва у доменному цеху реалізується за допомогою повітряної системи, яка інтегрується з припливною вентиляцією. Забезпечення подачі свіжого повітря здійснюється через групові вентиляційні установки значної потужності, що дозволяють підтримувати стабільний температурний режим.

З огляду на надмірне тепловиділення в зоні ливарного двору, особливо у літній період, виникає потреба у посиленому провітрюванні. Для цього активно використовуються природні способи вентиляції, які ґрунтуються на різниці температур зовнішнього та внутрішнього повітря (тепловий напір), а

також на дії вітрового тиску. Для покращення повітрообміну в будівлі передбачені спеціальні прорізи: нижній ярус отворів, розташований не вище 1,8 м від рівня підлоги, функціонує влітку для припливу свіжого повітря, а верхній ярус, що знаходиться на висоті понад 4 м, використовується протягом усього року. На покрівлі встановлено аераційні ліхтарі для ефективного видалення гарячого повітря та забруднень.

Окрім природної аерації, у цеху працює система примусової вентиляції, що складається з централізованих механічних агрегатів великої продуктивності. Ці установки забезпечують постійний приплив і видалення повітря, підтримуючи мікроклімат у допустимих межах.

Одним з важливих параметрів безпечної організації виробничого процесу є якісне освітлення. Незадовільний рівень освітлення може не лише знижувати продуктивність, а й провокувати виникнення аварійних ситуацій та проблем із зором. Вирізняють два основні типи освітлення — денне та штучне.

Природне освітлення забезпечується за рахунок сонячного світла, що потрапляє до приміщень через спеціальні отвори у стінах (бічне освітлення) або крізь прорізи у верхній частині споруди, зокрема в аераційних ліхтарях. Іноді використовуються комбіновані варіанти — поєднання бічного і верхнього освітлення.

У разі недостатньої природної освітленості або в темний час доби використовуються штучні джерела світла. Штучне освітлення слугує основним джерелом світла в темний час доби або у зонах, де природне освітлення обмежене. Вимоги до нього регламентовані нормативами (ДБН В.2.5-28-2006) і включають параметри, такі як сила струму, напруга, світловий потік і типи світильників.

Особливістю гарячих металургійних виробництв є присутність яскравих самосвітних об'єктів — полум’я, розплавлених металів і шлаків. Їх яскравість часто в десятки разів перевищує освітлення навколишнього середовища, що створює додаткове навантаження на зір. Постійна адаптація

очей до різкого переходу від яскравого до затемненого фону призводить до швидкого зорового стомлення, втрати контрастності та ризику засліплення.

Щоб зменшити негативний вплив такого освітлення, необхідно забезпечити рівномірну яскравість навколишнього простору, зменшуючи різницю між освітленими та затемненими ділянками. Для робіт із самосвітними джерелами світла встановлено мінімально допустиму освітленість 150 лк відповідно до ДБН В.2.5-28-2018. У доменному цеху це реалізується шляхом використання ламп НГД 127-100 (127 В, 100 Вт) і світильників типу «Універсаль», з коефіцієнтом запасу освітлення К = 1,3.

У разі аварій або надзвичайних ситуацій освітлення повинно бути забезпечене незалежною системою живлення. Така система має гарантувати мінімальну освітленість: щонайменше 5% від нормативної — на робочих поверхнях, 0,5 лк — на евакуаційних шляхах та сходах, і не менш ніж 0,2 лк — на відкритих територіях.

У гарячих цехах є специфічна проблема – наявність самосвітних предметів у полі зору працівників, таких як полум'я, розплавлені метали й шлаки. Яскравість цих елементів часто перевищує яскравість навколишнього середовища, що може бути шкідливим для очей. Потрібно постійно адаптувати зір, перемикаючи його між яскравими світловими поверхнями та більш темним фоном. Це може призвести до зниження зорових функцій, засліплення та утруднень при розпізнаванні об'єктів.

Щоб уникнути зорового перевантаження працівників, спричиненого висококонтрастним освітленням, необхідно досягти рівномірного розподілу яскравості у виробничих приміщеннях. Основна мета – зменшення різниці між надмірно освітленими ділянками та затемненими зонами, що дозволяє знизити напруження очей і запобігти швидкому зоровому стомленню. Згідно з чинними нормами, зокрема ДБН В.2.5-28:2018, для робіт, що передбачають зоровий контакт із самосвітними джерелами (VII кваліфікаційний розряд), встановлена мінімальна норма загальної освітленості – не менше 150 лк.

У сталеплавильному цеху для досягнення такого рівня світлового комфорту застосовуються електролампи типу НГД 127-100 (потужністю 100 Вт при напрузі 127 В), а також світильники марки «Універсаль», які забезпечують необхідні параметри світлового потоку. Враховуючи природне забруднення світильників у виробничих умовах, розрахунки освітленості ведуться з урахуванням коефіцієнта запасу К = 1,3, що дозволяє компенсувати втрати яскравості протягом експлуатаційного періоду.

У випадку надзвичайної ситуації обов’язково передбачається функціонування аварійного освітлення, яке повинно живитися від автономного джерела електроенергії. Це джерело має забезпечити достатній рівень освітленості для безпечного припинення роботи обладнання та евакуації персоналу. На робочих поверхнях аварійне освітлення повинно забезпечувати не менше 5% від встановлених значень основного освітлення. Мінімальна освітленість на підлогах основних маршрутів руху, зокрема в проходах і на сходах, має становити не менше 0,5 лк, а на відкритих виробничих майданчиках – не  нижче ніж 0,2 лк.

### 3.4 Заходи з електробезпеки

З урахуванням особливостей експлуатаційного середовища, сталеплавильний цех класифікується як об’єкт з підвищеною електронебезпекою. Така характеристика обумовлена поєднанням низки несприятливих чинників: високою температурою навколишнього повітря, наявністю струмопровідних підлогових покриттів, а також можливістю одночасного дотику до струмоведучих частин обладнання і заземлених елементів металевих конструкцій. Відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.01-97, такі умови значно підвищують ризик ураження електричним струмом.

У виробничому процесі застосовується електрообладнання, що працює від трифазної мережі з напругою до 380 В. Перед початком робіт персонал зобов’язаний виконати ретельний огляд обладнання, інструментів, стану

захисних кожухів, систем вентиляції та ефективності заземлення. Експлуатація електроустановок повинна здійснюватися з дотриманням чинних вимог щодо технічного обслуговування, безпечного використання електро- і вантажопідйомного транспорту, а також підтримання належного порядку на робочих місцях.

У разі виникнення нештатних ситуацій, які становлять загрозу для життя або здоров’я працівників, необхідно чітко дотримуватись затверджених інструкцій дій під час аварій. Зони підвищеної небезпеки мають бути позначені попереджувальними табличками та сигнальними кольорами, а також обладнані візуальними інформаційними матеріалами. Для зручності пересування на території цеху важливо наявність яскравої, добре видимої розмітки транспортних маршрутів і пішохідних переходів.

Однією з найбільших загроз у доменному виробництві є дія електричного струму та електричної дуги. Ураження може статися при випадковому наближенні до струмоведучих частин або при короткому замиканні з виникненням дуги. Особливої уваги потребують установки, які працюють під напругою вище 1000 В, оскільки вони потребують реалізації спеціальних заходів, що виключають прямий контакт з небезпечними елементами. Такі вимоги регламентуються стандартом ГОСТ 12.1.30-81 (ССБТ).

Для забезпечення електробезпеки на постійному рівні ключове значення має технічна справність ізоляційних матеріалів. Крім того, в доменному цеху впроваджено систему захисного занулення, яка є одним із базових методів запобігання ураженню електричним струмом у разі пошкодження ізоляції або пробою на корпус.

### 3.5 Пожежна безпека

У доменному цеху основну загрозу з точки зору пожежної безпеки становлять не стільки традиційні загоряння, скільки вибухонебезпечні

ситуації, пов’язані з газами, а також розплавленими металами та шлаками. Такі інциденти характеризуються високим рівнем руйнівності та небезпекою для життя працівників, перевершуючи за потенційними наслідками звичайні пожежі. Ймовірність виникнення останніх є відносно невеликою, оскільки конструкційні матеріали, що застосовуються при будівництві доменних об'єктів, мають високі вогнестійкі характеристики, адаптовані до умов підвищених температур.

Однак, крім газу, з доменної печі вивільняється значна кількість пилу, що утворюється через випаровування компонентів шихти та конденсацію парів летких речовин. Колошниковий пил має властивість самозайматися, що може призвести до вибухів у газоочисних системах і трубопроводах, які транспортують доменний газ із домішками пилу.

Щоб мінімізувати ризики займання та вибухів, вже на етапі проєктування необхідно враховувати всі можливі джерела небезпеки. Першим кроком у системі запобіжних заходів є класифікація приміщень згідно з рівнем вибухопожежної загрози. Відповідно до положень НАПБ Б.03.002-2007, обладнання, де використовується природний або коксовий газ, класифікується як зона категорії А. Газоочисні установки, простір між конусами колошника та системи для подачі вугільного пилу належать до категорії Б. Області ливарного двору, де обробляються розплавлені або високотемпературні речовини, мають класифікацію категорії Г.

Всі електротехнічні приміщення повинні бути укомплектовані пожежною сигналізацією з автоматичним запуском, яка підключена до централізованих пунктів управління або чергового персоналу. Ефективна пожежна профілактика включає регулярний контроль технічного стану обладнання, дотримання санітарного порядку, а також забезпечення вільного доступу до евакуаційних виходів.

Невід’ємною складовою системи пожежної безпеки є відповідальне ставлення персоналу до правил експлуатації обладнання, суворе дотримання

інструкцій з охорони праці, технологічної дисципліни й порядку на робочих місцях.

У разі загорянь на початковій стадії ефективним засобом локалізації пожежі є застосування установок газового пожежогасіння з тросовим механізмом запуску. Вони є зручними в експлуатації та дозволяють швидко нейтралізувати осередки загоряння.

Згідно з вимогами НАПБ Б.03.001-2004, первинні засоби пожежогасіння на одну доменну піч повинні включати: один вогнегасник пінного типу, шість вуглекислотних вогнегасників марки ВВ-8 та чотири піщаних ящики для локального засипання джерел вогню.

# ВИСНОВКИ

В результаті теоретичних досліджень та розрахунків в кваліфікаційній роботі було зроблені наступні висновки:

1. Досліджено джерела газових викидів ливарного виробництва.

2. Проаналізовано утворення шкідливих речовин у процесі плавки чавуну: викиди залежать від типу шихтових матеріалів, складу коксу, інтенсивності горіння та режиму роботи вагранки.

3. Проведено аналіз фізико-хімічних властивостей ваграночних газів. Визначено склад газової суміші та фізичні властивості пилу.

4. Розглянуто існуючі методи очистки газів, що відходять від вагранок. Запропонована та запроєктована система очистки, що містить: рекуператора, порожнистий скрубер типу АКРП, електрофільтр, систему газовідведення, димотяг, живильний агрегат, димову трубу.

5. Встановлено, що запропонована система газоочищення забезпечує ступінь очистки пилу понад 99%, що відповідає сучасним екологічним вимогам. Особливу увагу приділено теплоутилізації газів, що дозволяє знизити енергоспоживання.

6. Проаналізовані шкідливі та небезпечні фактори ливарного виробництва з використанням вагранкових печей. Визначено, що основними шкідливими факторами є: виска температура, газовиділення, пил.

# ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Плавка чавуну в вагранках. URL: https://obrobka.pp.ua/1899-plavka-chavunu-v-vagrankah.html (дата звернення 11.04.2025).

2. Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «Теплотехніка ливарного виробництва» для студентів денної та заочної форм навчання напряму 6.050402 «Ливарне виробництво» укл.: Чубіна О.А., Кобзева А.І. Дніпродзержинськ. ДДТУ, 2016, 63 с.

3. Теорія та технологія доменного виробництва. URL: https://www.libr.dp.ua/text/kraj/1543234.pdf (дата звернення 10.12.2024).

4. ММК ім. Ілліча відновлює потужності доменного виробництва. URL: https://metinvestholding.com/ua/media/news/2548 (дата звернення 10.11.2024).

5. Кожемякін Г.Б. Теоретичні основи та техніка захисту повітряного басейну: метод. вказівки до виконання курсового проекту та лабораторних робіт для студ. ЗДІА напряму 6.040106 "Екологія, охорона навкол. середовища та збалансоване природокористування".Запоріжжя : ЗДІА, 2011. 115 с.

6. Павлюк Ю.С. Повітродувні та насосні станції: Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи для студ. ЗДІА спец. 7.090401 спец. «Екологіч. аудит та охорона навколиш. середовища» всіх форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2007. 30 с.

7. Манідіна Є.А., Бєлоконь К.В. Безпека технологічних процесів та обладнання : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 263 «Цивільна безпека» освітньо-професійної програми «Охорона праці». Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2022. 133 с.

8. НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електроустаткування спеціальних установок : Державний нормативний акт

від 21 чер. 2001 р. №272. URL: https://dnaop.com/html/29478/doc-ДНАОП_0.00-1.32-01 (дата звернення: 17.12.2024).

9. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою : затв. наказом М-ва України з пит. Надзвичайних ситуацій від 03 грудня 2007 р. № 833 URL: https://dnaop.com/html/32980/doc-НАПБ_Б.03.002-2007 (дата звернення: 17.11.2024).

10. Передистий Б.О. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів агломераційного виробництва. Металургія як основа сучасної промисловості : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., 23-26 жовт. 2017 р. Дніпро : ДДТУ, 2017. С. 45-47.

11. Геврик, Є.О. Охорона праці: навч. посібник для внз: [рек. М-вом освіти і науки України]. Київ : Ельга, Ніка-Центр, 2004. 279 с.

12. Податковий Кодекс України: Закон України № 2755-VI від 02.12.2010 (Редакція станом на 01.01.2017): веб-сайт. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2755-17/paran8575#n8575 (дата звернення: 21.11.2024).