

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**  
**ім. Ю.М.ПОТЕБНІ**  
**КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КІБЕРФІЗИЧНИХ**  
**СИСТЕМ**

**Кваліфікаційна робота**

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

на тему «Аналіз способів збільшення енергоефективності об'єктів  
промисловості»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1442

Ткаліч Олександр Вадимович

спеціальності теплоенергетика

освітньої програми теплоенергетика

Керівник Таратута В.О.

Рецензент д.т.н., проф. Пазюк М.Ю.

Запоріжжя

2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Рівень вищої освіти другий магістерський

Спеціальність 144 Теплоенергетика

Освітня програма Теплоенергетика

(код та назва)

Спеціалізація \_\_\_\_\_

(код та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_



« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Ткалічу Олександрю Вадимовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи (проекту) «Аналіз способів збільшення енергоефективності  
об'єктів промисловості»

керівник роботи Таратута Владислав Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «01» травня 2021 року № 639-с







Строк подання студентом роботи: 01 грудня 2023 р.

2 Вихідні дані до роботи: Площа поверхонь нагріву. Тиск пари. Температура пари. ККД (%) при спалюванні. Витрата димових газів. Площа поверхонь нагріву.

3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аеродинамічний розрахунок котла. Обчислення ентальпії димових газів. Розрахунок випаровуючих вповерхонь нагріву. Розрахунок виробки пари. Розрахунок димових газів та кількість тепла на утилізацію. Вибір котла-утилізатор.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Перетини котла-утилізатора. Схема котельної котлів-утилізаторів. Принципова схема котлів-утилізаторів


5 Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата  |   |
|--------|---|---|---|
|        |   | завдання видав  | завдання прийняв  |
| 1      | Таратута В.О.                             |  |  |
| 2      | Таратута В.О.                             |  |  |
| 3      | Таратута В.О.                             |  |  |


6 Дата видачі завдання 01 червня 2023 р

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                          | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1     | Огляд літературних джерел                                    |                               |          |
| 2     | Опис об'єкту реконструкції                                   |                               |          |
| 3     | Обчислення ентальпії димових газів                           |                               |          |
| 4     | Аеродинамічний розрахунок котла                              |                               |          |
| 5     | Оформлення кваліфікаційної роботи згідно нормативним вимогам |                               |          |


Студент   
(підпис)

Ткаліч О.В.  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)   
(підпис)

Таратута В.О.  
(ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер 

Таратута В.О.

## АНОТАЦІЯ

Ткаліч О.В. Аналіз способів збільшення енергоефективності об'єктів промисловості

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник Таратута В.О. Запорізький національний університет. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2023.

В магістерській роботі вирішено актуальну науково - технічну задачу по підвищенню енергетичної ефективності промислового об'єкту.

У процесі теплових розрахунків довжини котушок і їх кількість в упаковці були збільшені шляхом зміни поздовжнього і поперечного кроків. Для зручності обслуговування поверхонь нагріву пропонується розділити економайзер на три послідовно з'єднаних пакета.

Ключові слова: ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ПРОМИСЛОВИЙ ОБ'ЄКТ, КОТЕЛ-УТИЛІЗАТОР, ТЕПЛОВА ЕНЕРГІЯ

## ANNOTATION

Tkalich O.V. Analysis of ways to increase the energy efficiency of industrial facilities

Qualifying graduation thesis for obtaining a master's degree in the specialty 144 - Heat and power engineering, academic supervisor V.O. Taratuta. Zaporizhzhia National University. Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems, 2023.

The master's thesis solves the actual scientific and technical problem of increasing the energy efficiency of an industrial facility.

In the process of thermal calculations, the length of the coils and their number in the package were increased by changing the longitudinal and transverse

steps. For the convenience of servicing the heating surfaces, it is suggested to divide the economizer into three serially connected packages.

Keywords: ENERGY EFFICIENCY, INDUSTRIAL FACILITY,  
BOILER-UTILIZER, HEAT ENERGY

# ЗМІСТ

## ВВЕДЕННЯ

### 1 ОПИС ОБ'ЄКТУ РЕКОНСТРУКЦІЇ

- 1.1 Опис процесу отримання димових газів
- 1.2. Розрахунок димових газів та кількість тепла на утилізацію
- 1.3 Вибір котла-утилізатора

### 2 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ПРОМИСЛОВОСТІ

- 2.1 Основні дані для розрахунку котельної установки
- 2.2 Обчислення ентальпії димових газів
- 2.3. Розрахунок виробки пари
- 2.4 Розрахунок випаровуючих вповерхонь нагріву
- 2.5 Аеродинамічний розрахунок котла
- 2.6 Вибір димососу
- 2.7 Вибір обладнання ХВО
- 2.8 Принципова схема трубопроводів котла-утилізатора в

межах котельної

### 3 БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОТЛА-УТИЛІЗАТОРА

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

3.2 Промислова санітарія

## ВИСНОВОК

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Ефективна державна політика у сфері енергоспоживання має бути спрямована не лише на зниження енергоємності виробничої продукції, а й на стимулювання модернізації виробництва сучасним обладнанням та новими технологіями.

Вирішення енергетичних проблем значною мірою залежить від рівня наукових досліджень у розробці енергозберігаючих технологій та реалізації освітньої програми для населення України з питань енергозбереження.

Котли використовуються для переробки теплових відходів теплотехнічних установок.

Основними технологічними відходами або вторинними енергетичними ресурсами є: фізична теплота відхідних газів, теплота технологічних продуктів, теплота шлакових відходів, теплота робочих тіл систем примусового охолодження технологічних камер.

Характерною особливістю котлів-утилізаторів є те, що вони не мають топкового пристрою для спалювання палива.

Використання теплових відходів у котлах-утилізаторах дає додаткову продукцію у вигляді енергії або технологічної пари, гарячої води, що призводить до економії палива на підприємстві.

Будучи додатковим зовнішнім споживачем тепла, котел-утилізатор зазвичай не впливає на характер основного технологічного процесу. Однак в деяких випадках котел-утилізатор допомагає поліпшити умови роботи технологічного агрегату.

Наприклад, розташування котлів-утилізаторів за мартенівською піччю дає можливість встановити димосос на відхідних газах, що позитивно впливає на роботу печі та покращує тягу.

Перегріта пара, що виробляється котлом-утилізатором, може подаватися в одну з двох магістральних паропроводів. Отримана пара також використовується для нагрівання котла.

Для існуючих котлів-утилізаторів проводиться перевірочний розрахунок. Виходячи з розрахункових характеристик і під навантаженням встановлюються температури води, пари, повітря і продуктів згоряння на межі поверхонь нагріву установки. В результаті розрахунків отримують вихідні дані, необхідні для вибору допоміжного обладнання та виконання гідравлічних, аеродинамічних і міцнісних розрахунків.

При розробці проекту реконструкції котла-утилізатора, наприклад, за рахунок збільшення продуктивності або зміни параметрів пари може знадобитися зміна ряду елементів агрегату. Проте основні частини парогенератора та їх загальне розташування зазвичай зберігають, а реконструкцію тих елементів, які потребують зміни, проводять так, щоб по можливості зберегти основні вузли та деталі типового парогенератора.

*Мета роботи* полягає в підвищенні ефективності використання палива на промисловому підприємстві.

*Об'єкт дослідження* є котли-утилізатори КУ-80-3.

*Наукова новизна отриманих результатів.* Встановлено залежності температури вихідних газів через котел-утилізатор від витрати палива через мартенівську піч.

*Практична цінність роботи* полягає в розробці ефективного режиму роботи котлів-утилізаторів.

*Методи дослідження* є методи послідовних розрахункових операцій з поясненням дій. Розрахункові формули спочатку записуються в загальному вигляді, потім підставляються числові значення всіх входять в них величин, після чого видається кінцевий результат.

*Особистий внесок.* Наукові результати, викладені в дисертації, отримані особисто автором.

*Структура та обсяг роботи.* Магістерська робота містить вступ, три розділи, висновки та список використаної літератури. Загальний обсяг сторінок 64, включаючи ілюстрації та таблиці.



## 1 ОПИС ОБ'ЄКТУ РЕКОНСТРУКЦІЇ

### 1.1 Характеристики обладнання

Однією з вирішальних умов зниження витрат на промислових підприємствах і підвищення економічної ефективності виробництва в цілому є раціональне використання енергетичних ресурсів. Водночас енергозберігаючий шлях розвитку економіки можливий лише за умови формування та подальшої реалізації програм енергозбереження та технічного переоснащення на окремих підприємствах, для чого необхідно створити відповідну методичну базу.

Несвоєчасне впровадження енергозберігаючих заходів завдає значних економічних збитків підприємствам та негативно впливає на всю екологічну та соціально-економічну ситуацію. Крім того, подальше зростання витрат у промисловості та інших галузях супроводжується дедалі більшою нестачею фінансових ресурсів, що затримує оновлення виробничої бази підприємств відповідно до досягнень науково-технічного прогресу. Технічну оснащеність підприємства можна розглядати з точки зору виробництва будь-якої продукції на основі існуючої продукції або з точки зору організації нового виробництва.

Однією з характерних рис сучасного етапу науково-технічного прогресу є зростання попиту на всі види енергії. Газ є важливим джерелом палива та енергії. Витрати на його видобуток і транспортування нижчі, ніж на тверде паливо. Як чудове паливо (його калорійність на 10% вище, ніж у мазуту, в 1,5 рази вище, ніж вугілля і в 2,5 рази вище, ніж штучний газ), він характеризується високою тепловіддачею в різних системах. Газ використовується в духовках, які вимагають точного контролю температури; Тут мало відходів і диму, які забруднюють повітря. Широке застосування природного газу в металургії, цементному виробництві та інших галузях промисловості дозволило підняти роботу промислових підприємств на вищий технічний рівень і збільшити кількість продукції, що одержується з одиниці площі технологічних приміщень, а також як покращити екологію регіону.

У мартенівському цеху комбінату «Запоріжсталь» встановлені мартенівські печі. За мартенівськими печами встановлені котли-утилізатори КУ-80-3. Вони

призначені для вироблення пари за рахунок використання відчутного тепла від відпрацьованих димових газів мартенівських печей.

Котли-утилізатори споживають хімічно очищену воду з центральної насосно-відливної установки.

Термосифонний котел-утилізатор призначений для охолодження високотемпературних промислових відхідних газів технологічних приміщень з метою їх подальшої технологічної переробки та очищення з використанням фізичного тепла відхідних газів технологічних приміщень і промислових печей для отримання насиченої пари для теплопостачання та технологічні вимоги підприємства.

В цілому цей прилад має ряд переваг. А саме: простота його виконання, надійність в експлуатації, надійність теплообмінних елементів і висока ефективність теплообмінних процесів, відносно низький гідравлічний опір, автономність і т.д. Це дозволяє говорити про перспективність використання даного обладнання в різних галузях промисловості.

Основною зоною обслуговування котла є рівень підлоги котла, на якому встановлені котли, циркуляційні насоси, тепловий екран, щит керування електродвигуном.

Охолоджуюча вода надходить по двох трубах діаметром 159 x 7 мм від барабана до нижніх колекторів теплообмінників термосифонних блоків, розділених на два паралельних контури. Охолоджуюча вода протікає паралельно потокам через ряди термосифонних блоків, нагрівається і частково випаровується. Утворилася пароводяна суміш видаляється з верхніх колекторів блоків шляхом приєднання до барабана труб діаметром 219 x 6 мм.

У барабані системи відбувається видалення пари з пароводяної суміші і утворена з барабана пара подається на виробничі потреби підприємства.

Котел подається хімічно очищеною водою з водоочисної станції.

До завдань розрахунку природної циркуляції може входити вибір оптимальної конструкції котельних схем, перевірка надійності випарних поверхонь нагріву та розробка заходів щодо підвищення їх надійності.

Розрахунок природної циркуляції визначає швидкості води, швидкості циркуляції і корисні тиски в контурах, запаси міцності в застої, умови руху в водостічних трубах, надійність в нестационарних умовах, а також інші показники, пов'язані з конструктивними особливостями поверхонь нагріву.

Через різну конструкцію окремих циркуляційних контурів систем парових котлів, їх параметрів і, при необхідності, взаємозв'язку контурів, циркуляційні розрахунки зазвичай доводиться проводити для всіх контурів котлової системи. Для однотипних контурів допускається розраховувати тільки ті контури, які мають найгірші умови за рівномірністю та інтенсивністю нагріву, а також конструктивними особливостями.

При розрахунку створюються таблиці з розрахунковими даними частин циркуляційних контурів котлоагрегату та їх тепловими відчуттями.

За кресленнями для всіх підйомних, водопровідних, рециркуляційних, водяних і паропроводів визначаються такі значення:

- кількість труб і колекторів і їх внутрішній діаметр;
- довжини і висоти труб з поділом труб на секції (включаючи висоту виступу над рівнем води);
- кут нахилу ділянок підйомних труб відносно горизонталі;
- місцева підтримка;
- Конструктивні особливості сепараційних установок, опір яких впливає на умови циркуляції.

Висота підйомних труб, що вводяться в водяний об'єм бочки або колектора, визначається як різниця відміток їх входу і випуску.

Висоту стояків, що ведуть в парилку барабана, визначають від місця виходу з нижнього розподільника (або барабана) до рівня води в барабані; Накладний - вода в барабані до найвищої точки труби; При наявності декількох верхніх барабанів, по барабану визначається барабан, до якого підключаються нижні труби контуру.

Висота контуру дорівнює сумі висот послідовних частин підйому.

На всю довжину підйомних труб також входять секції, що лежать над віссю барабана.

Визначення корисних тисків підйомних елементів і гідравлічного опору опускаючої системи контуру проводять при кількох (зазвичай трьох) раніше прийнятих витратах води, що циркулює в ньому.

Кількість води, що протікає по опускних трубах простих контурів, дорівнює кількості води, взятої при розрахунку корисних напорів стояків труб.

Основними елементами мартенівської печі є: робоча ванна, яка з двох кінців має один кесон (пальник) і регенератор (по два з кожного боку), перекидну заслінку і димову заслінку перед димоходом.

Як паливо використовується природний газ. Подається без підігріву, безпосередньо в кесон.

Повітря, необхідне для спалювання природного газу, подається в кесони, попередньо пройшовши через регенератори, в яких воно нагрівається теплом газів, що надходять з ванни печі. Крім того, для інтенсивної роботи печі подається кисень.

Димові гази, що виходять з ванни мартенівської печі, рухаються через регенератори і відхідні гази за рахунок різниці тисків по шляху потоку, створюваного трубою.

Висота димаря на печах No 1-10 становить 85 м, а на печах No 11 і 12 – 105 м.

Тяга є найважливішим параметром теплової роботи мартенівської печі, який багато в чому визначає продуктивність печі і питому витрату палива. Проте з інтенсифікацією процесу в мартенівських печах, збільшенням об'ємів і температур відхідних газів зростає опір по газовому тракту і тяга, створювана трубою. Заходи по збільшенню тяги мартенівських печей зазвичай відстають від постійної тенденції збільшення посадки мартенівських печей і збільшення їх теплового навантаження.

Тому для нормальної роботи мартенівської печі необхідний димосос, через який димові гази відводяться з печі.

Тиск в робочому просторі печі має бути в межах 2,6-4 мм. води ст., при цьому з оглядових вікон забитих вікон відбувається незначний викид полум'я.

Мартенівські печі мають різні посадки (поза плавки): мартенівська піч № 1,11 – 2× 250 т, мартенівські печі № 2,5,6,7,8,10,12 – по 500 т кожна.

Плавлення складається з наступних періодів:

- Заправка плити
- Заповнення печі
- Розігрів духовки
- Завантаження чавуну в топку
- Плавлення 1-й період
- Плавлення 2-й період
- Оздоблення

Температура димових газів у відходах після регенератора коливається в межах 700-900 °С. Уздовж мартенівської печі для пиловловлення відхідних газів встановлюють газоочисні установки мокрого типу. Для створення тяги по шляху диму в окремих приміщеннях за кожною газоочисною установкою встановлюють два димососи.

Для підвищення тяги і рекуперації тепла за мартенівськими печами встановлюють котли-утилізатори з димососами прямої дії. Перед димососами планується встановити газоочищувачі, які споживають значну частину тиску димососа, зменшуючи викиди в свинарних печах.

Важливою особливістю промислових відхідних газів у ряді випадків є їх полідисперсний вміст з переважанням дуже дрібних частинок у твердому, рідкому та газоподібному станах. Технологічна атрибуція утворюється в результаті захоплення газовим потоком дрібних частинок шихти, опаліну, розплавленого металу або шламу. На захоплення цих частинок значною мірою впливає швидкість потоку газу в робочій камері. Суттєве значення має розтріскування вихідної шихти під впливом внутрішнього газоутворення і температурних напруг, що виникають при нагріванні. Отримані деталі виводяться за межі робочої камери печі.

Винос рідких частинок технологічного розплаву відбувається переважно в період кипіння або продувки розплавленого матеріалу. Також спостерігається часткове випаровування технологічного матеріалу через його високу температуру.

При цьому в робочій камері окремі компоненти розплавленого матеріалу можуть перебувати в пароподібному стані. Утворені при плавленні породи виносяться з робочої камери вихлопними газами, а потім при зниженні температури конденсуються з утворенням дрібних рідких і твердих частинок.

Призначені розміри частинок залежать від режиму роботи печі. У період руйнування шихти міститься велика кількість частинок вапняку розміром до 600-800 мкм, причому частинки розміром менше 10 мкм становлять лише 10-15%.

У період плавлення, коли відсоток парів оксиду заліза в утворенні атрибутції збільшується, частка з розміром частинок до 10 мкм становить 33-38%. Коли ванну продувають киснем, частинки розміром менше 10 мікрон становлять 66,5%.

## 1.2 Розрахунок димових газів і кількості теплоти на утилізацію

Склад продуктів згоряння з ванни мартенівської печі представлений у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Елементарний склад робочої маси продуктів згоряння

| CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | Запиленість газу |
|-----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| %               |                |                |                  | г/м <sup>3</sup> |
| 12              | 72             | 5.5            | 10.5             | 2-5              |

Кількість теплоти для рекуперації визначається за формулою, кВт

$$Q_{\text{ут}} = V_{\text{yx}} \cdot C_{\text{yx}} \cdot \vartheta_{\text{yx}} \quad (1.1)$$

де  $V_{\text{yx}}$  - кількість газу на утилізацію;

$\vartheta_{\text{yx}}$  - температура продуктів згоряння, °С;

$C$  – теплоємність продуктів згоряння, кДж/(м<sup>3</sup> °С)

$$C_i = \sum c_i \cdot r_i$$

де  $C_i$  – теплоємність складових елементів продуктів згоряння, наведена в таблиці 1.2;

$r_i$  – об'ємна складова,  $\text{м}^3/\text{м}^3$

$$r_i = \frac{r\%}{100}$$

$$r_{CO_2} = \frac{CO_2\%}{100} = \frac{12}{100} = 0.12$$

$$r_{N_2} = \frac{N_2\%}{100} = \frac{72}{100} = 0.72$$

$$r_{O_2} = \frac{O_2\%}{100} = \frac{5.5}{100} = 0.055$$

$$r_{H_2O} = \frac{H_2O\%}{100} = \frac{10.5}{100} = 0.105$$

Таблиця 1.2 – Теплоємність складових елементів продуктів згоряння,  $\text{кДж}/\text{м}^3$

| $\vartheta, ^\circ\text{C}$ | $\text{CO}_2$ | $\text{N}_2$ | $\text{O}_2$ | $\text{H}_2\text{O}$ | Зольність,<br>% |
|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|----------------------|-----------------|
| 900                         | 2.18          | 1.38         | 1.44         | 1.68                 | 0,94            |

Теплоємність продуктів згоряння визначається за формулою,  $\text{кДж}/\text{м}^3$

$$C_i = C_i \cdot r_i$$

$$C_{CO_2} = 2.18 \cdot 0.12 = 0.262$$

$$C_{N_2} = 1.38 \cdot 0.72 = 0.994$$

$$C_{O_2} = 1.44 \cdot 0.055 = 0.0792$$

$$C_{H_2O} = 1.68 \cdot 0.105 = 0.1764$$

$$C_{\text{золи}} = 0,94 \cdot 0,002 = 0,0018$$

$$C_{\text{ух}} = 0,262 + 0,994 + 0,0792 + 0,1764 + 0,0018 = 1,5296$$

Кількість теплоти для рекуперації, кВт

$$Q_{yt} = \frac{90 \cdot 10^3 \cdot 1.5296 \cdot 900}{3600} = 34.416 \cdot 10^3$$

## 1.2 Вибір котла-утилізатора

Інтенсифікація технологічних процесів і збільшення одиничної потужності пічних пристроїв пов'язані з підвищенням рівня температури в топці, а отже, і з підвищенням температури вихідних продуктів згоряння. Ці промислові термічні відходи являють собою потужний запас (близько 80%) теплових вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР), які використовуються переважно в котлах-утилізаторах (КОУ) для виробництва пари для електроенергії та технологічних параметрів. В результаті на заміненіх установках з автономним спалюванням органічного палива економляться мільйони тонн умовного палива на рік.

Загальні методичні положення щодо визначення резервів економії палива за рахунок використання ВДЕ на промислових підприємствах передбачають поділ усіх видів ВДЕ на три групи:

1. Горючі (паливні) ВВ – горючі гази плавильних печей (доменних, колошальних і вагранкових, конвертерних, феросплавних), горючі відходи процесів хіміко-термохімічної переробки вуглецевої або вуглеводневої сировини, непридатні. (непридатні) для подальшої обробки. деревна стружка, тирса, стружка, обрізки тощо), випарені розчини целюлозно-паперового виробництва, відпрацьований газ від спалених печей, абсорбційний газ у виробництві мономерів для синтетичних каучуків, фракція оксиду вуглецю у виробництві аміаку тощо.

2. Теплові ТЕР – фізична теплота відхідних газів технологічних агрегатів, фізична теплота основних, побічних, проміжних продуктів і відходів основного виробництва, теплота робочих тіл систем примусового охолодження



технологічних агрегатів і установок, теплота гарячої води та пара, що відпрацьовується в технологічних і енергетичних установках.

3. РЕР надлишкового тиску - потенційна енергія газів і рідин, що виходять з технологічних установок з надлишковим тиском, яка повинна бути знижена перед наступним рівнем використання цих газів і рідин або при їх викиді в атмосферу.

Горючі ВДЕ використовуються як паливо, теплові ВДЕ використовуються для виробництва тепла, електроенергії, холоду та механічної роботи на заводах з переробки сміття.

В даний час в різних галузях промисловості працюють кілька тисяч КГ, встановлених в пожежно-технічних установках різного технологічного призначення. Ці агрегати відрізняються один від одного великою різноманітністю процесів і параметрів, що використовуються енергоносіями.

Особливості технологічного процесу, в якому задіяні котли-утилізатори (КУУ), висувають певні вимоги до завдань управління ними. Основна особливість, яка відрізняє HRSG від звичайних промислових котлів, полягає в тому, що основним регульованим параметром є не паропродукція, яка визначає споживання необхідної енергії палива, а кількість енергії, яку вносить потік відпрацьованих технологічних газів, і яка визначає паропродукцію. Як відповідь УГРГ на тепловий режим робота, задана технологічним агрегатом. У звичайних котлах для спалювання споживання палива та повітря контролюється, а об'єм і температура газів у кінці топки досягаються таким чином, щоб забезпечити утворення пари необхідної якості та в необхідній кількості. У котлі-утилізаторі, навпаки, вказуються витрата газу і температура; необхідно забезпечити виробництво пари заданої якості за заданих умов; кількість пари відповідає енергії, яку надають робочому тілу (воді) відхідні гази технологічних агрегатів. Таким чином, управління має забезпечити надійне використання тепла від вихлопних газів технологічної установки шляхом генерації відповідної кількості пари заданих параметрів (тиск, температура перегріву).

Другою особливістю КП є нестабільність режиму роботи; кількість теплоти, що утилізується, може коливатися від 0 до максимального значення, а швидкість

збільшення теплового потоку в окремих випадках досягає 20-30% [3]. Тому МС перебуває у надзвичайно складних умовах з точки зору забезпечення надійності.

Відповідно до ГОСТ.30.135–84 котли-утилізатори класифікуються:

- 1) за типом теплообміну в УГТ: радіаційні, радіаційно-конвективні, конвективні;
- 2) за типом конструктивноваріанти: водотрубні і газотрубні;
- 3) у плануванні та дизайніособливості газотрубних котлів-утилізаторів: горизонтальні, горизонтальні з барабанним сепаратором, вертикальні з барабанним сепаратором;
- 4) за принципом циркуляції води: з природною, примусовою, комбінованою циркуляцією і прямоточні;
- 5) за газовим устроємрами: П-, Г-, Т-, Г-, П-подібні, баштові, горизонтальні;
- 6) за видом технологічного матеріалу, що спалюється і охолоджується;
- 7) за типом кріплення поверхонь нагріву;
- 8) за типом установки: відкриті, напіввідкриті, закриті;
- 9) за способом організації тяги: урівноважені та підрозрядні;
- 10) за проектом: для сейсмічних і несейсмоопасних районів.

Котли-утилізатори в залежності від найважливішого параметра - початкової температури теплоносія опалення діляться на дві групи:

- 1) низькотемпературні котли-утилізатори з початковою температурою теплоносія  $T_g < 1100-1200$  К;
- 2) високотемпературні котли-утилізатори  $T_g > 1400-1500$  К.

Конструкція і експлуатаційні характеристики теплообмінника котла тісно пов'язані між собою і визначаються особливостями технологічних процесів. У металургійній промисловості більшість котлів-утилізаторів встановлюють за металургійними печами. Вибір параметрів пари визначається, насамперед, тепловою схемою її використання і складають переважно 1,8 і 4 МПа з незначним перегрівом.

Створені конструкції котлів-утилізаторів мають воду як холодоагент. Враховуючи, що термічні навантаження в поверхнях нагріву невеликі, а висота

котлів зазвичай невелика, часто виникає питання про раціональний спосіб циркуляції води. Тому для створення компактних поверхонь нагріву використовується примусова циркуляція.

Особливістю водотрубних низькотемпературних котлів-утилізаторів з поверхнями нагріву з перехресним змивом продуктів згоряння труб малого діаметра є змійовик і багаторазова примусова циркуляція робочого тіла і пароводяної суміші (ППС). Ці котли призначені для встановлення за металургійними печами з метою використання фізичного тепла вихлопних газів для отримання перегрітої пари. Позначення типорозмірів котлів містять цифри, що вказують максимальну витрату продуктів згоряння (ПЗ), на яку розрахований котел у тисячах кубічних метрів на годину (40, 60, 80, 90, 100, 125, 150). . Параметри виробленої пари 4,5 МПа, 650К або 1,8 МПа, 650К. Поверхні нагріву мають П-подібну форму. Усі поверхні змійового типу розбиті на секції, а секції на блоки. У котлі використовується одноступеневе випаровування. При тиску 1,8 МПа рух продуктів згоряння протитечійний, блоки попарно з'єднані паралельно. Можливе поєднання котла з випарним охолодженням топки. Барабан котла містить сепараційний пристрій, що складається з циклонів з підвідними патрубками і перфорованим перекриттям з перфорованою паровідвідною трубою. Мулоуловлювач являє собою фільтр із дротяної сітки або перфорованої решітки з нержавіючої сталі.

Проектом передбачено реконструкцію діючого котла-утилізатора КУ-80 продуктивністю 90 тис. м<sup>3</sup>.

Характеристика котла-утилізатора, трубопроводів і допоміжного обладнання.

Котел-утилізатор складається із залізобетонного фундаменту, на який спирається каркас котла. Каркас виготовлений з швелерів № 24. На каркасі кріпляться всі частини котла: барабан, випарні поверхні нагріву, пароперегрівач, футеровка і кожух котла.

На УГТГ газоходи виконані з вогнетривкої кладки до другої розвантажувальної балки. Лицьова сторона котла повністю облицьована. Для створення газоходу використовується листове залізо, яке зовні утеплено шлаком для поглинання тепла.

Для захисту котлів від руйнування при вибуху газу на бокових стінках димоходів котлів встановлюють противибухові клапани. На першому газоході встановлено 2 вибухових клапана.

Циркуляція води в котлі здійснюється відцентровими циркуляційними насосами. Кожен котел має два насоси, один з яких резервний. Насос типу НКУ-140.

Перед котлом встановлюється шибер. На котлах з мокрою системою газоочистки після котлів встановлюють заслінки. Тяга регулюється напрямними лопатками перед газоочисними димососами.

Барабан котла:

- Діаметр барабана 1500 мм;
- Довжина циліндричної частини 4250 мм;
- Пристрій внутрішньобарабанної сепарації складається з 7 циклонів діаметром 300 мм і перфорованої струменя з отворами діаметром 7 мм.

Барабан котла оснащений повітряним і двома запобіжними клапанами. На передньому дні бочки встановлені 2 індикатори води та манометр. Барабан має штуцер для підключення реєструючого датчика однорідності та відбору проб котлової води, періодичного продування, аварійного зливу води з барабана, зниженої індикації однорідності.

При регулюванні живлення котлоагрегатів і регулюванні тиску в барабані котла-утилізатора головним є дотримання матеріального балансу між відведенням пари і подачею води. Параметром, що характеризує накип, є рівень води в барабані котла. Надійність котельного агрегату багато в чому визначається якістю контролю рівня. При підвищенні тиску падіння рівня нижче допустимих меж може призвести до порушення циркуляції випарних пакетів у трубах, що призводить до підвищення температури нагрітих стінок труб і їх перегріву.

Підвищення рівня також призводить до аварійних наслідків, оскільки вода може потрапити в пароперегрівач і привести його до поломки. Дуже високі вимоги пред'являються до точності підтримки заданого рівня. Якість контролю потужності також визначається рівномірністю подачі живильної води. Необхідно

забезпечити постійну подачу води в котел, оскільки часті і глибокі зміни витрати живильної води можуть призвести до значних температурних навантажень в металі економайзера.

Застосування автоматизованого керування дає значні переваги: - Підвищує безперебійність, точність і надійність роботи, оскільки автоматика швидко реагує на зміну режиму роботи; Зменшує експлуатаційні витрати за рахунок скорочення чисельності обслуговуючого персоналу, а також витрат на опалення та освітлення приміщень; знижує витрати на будівництво, оскільки обладнання зосереджено на меншій площі і немає необхідності встановлювати побутові та допоміжні приміщення; збільшує термін служби приладів і пристроїв шляхом своєчасного виключення приладів з експлуатації при виникненні проблем в їх роботі; виключає участь персоналу в технологічних операціях, які проходять в антисанітарних умовах.

Система автоматичного регулювання відтоку в димоходах котла призначена для підтримки постійного відтоку. Без вихлопу димові гази потрапляють у цех, унеможлиблюючи роботу обслуговуючого персоналу.

У кормовій воді містяться розчинені солі, допустима кількість яких встановлена нормативами. При утворенні пари ці солі залишаються в котловій воді і поступово накопичуються. Деякі солі утворюють шлам, тверду речовину, яка кристалізується в котловій воді. Більш важка частина мулу збирається в нижніх частинах барабана та колекторах.

Збільшення концентрації солі в котловій воді понад допустимі значення може призвести до її переходу в пароперегрівач. Таким чином, солі, накопичені в котловій воді, видаляються безперервним продуванням, яке в цьому випадку не регулюється автоматично. Розрахункове значення продування парогенератора в усталеному режимі визначається з рівнянь для домішок, що залишилися у воді в парогенераторі. Таким чином, доля продувки залежить від співвідношення концентрації домішок у продувній і живильній воді. Чим краща якість живильної води і чим вище допустима концентрація домішок у воді, тим менша частка закачування. А концентрація домішок, у свою чергу, залежить від долі додаткової води, яка зокрема включає долю втраченої продувної води.

Сигналізація параметрів і захист, що зупиняє котел, є фізично необхідними, тому що оператор або машиніст котла не в змозі відстежити всі параметри працюючого котла. Це може призвести до аварійної ситуації. Наприклад, якщо вода втрачається з барабана, рівень води в ньому падає, що може порушити циркуляцію та спричинити перегрів труб випарного блоку. Миттєва підтримка захисту запобігає виходу парогенератора з ладу. Надійність захисту багато в чому визначається кількістю, схемотехнікою і надійністю використовуваних в ній пристроїв.

## 2 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ПРОМИСЛОВОСТІ

### 2.1 Основні дані для розрахунку котельної установки

Поверхня нагріву теплообмінника котла №1 складається з вертикальних газоходів, що утворюють літеру «П». Випарна поверхня нагріву котла складається з 3 секцій, розташованих в першому підйомному газоході і з'єднаних на вході паралельно шлакоотделителю.

Перша секція (вздовж потоку газу) складається з одного пакету змійовиків і називається попередньо сполученою. Пакет котушок складається з 4 блоків. Кожен блок (куб) котушок складається з вхідного і вихідного колекторів і 22 паралельно з'єднаних котушок, з'єднаних стрічками з 11 екранів.

Після першої попередньо підключеної основної секції включається система охолоджуваних опорних балок, на які спираються блоки всіх поверхонь нагріву котла.

Приймається схема руху робочого тіла і газів:

для першої секції – протитечія

для секції II – протитечія

для III розділу – проти точного

для пароперегрівача – прямоточний

Всі змійовики виготовлені з труб 25x3 мм.

Секції випарника і пароперегрівача розташовані вздовж потоку газу:

1. I-а випарна секція

2. II випарна ділянка

3. III випарна ділянка

4. Пароперегрівач

До кожної секції циркуляційна вода подається по трубах 89x3,5 мм. Пароводяна емульсія відводиться в барабан котла по трьом трубах 108x4 мм з першої секції випарника через охолоджувальні балки; через дві труби 108x4 мм від 2-ї секції випарника і через дві труби 108x4 мм від 3-ї секції випарника.

Таблиця 2.1 - Вихідні дані для розрахунку котельної установки

| Ім'я  | Позначення | Розмір              | Величина |
|---|------------|---------------------|----------|
| Тиск перегрітої пари                        | $P_{пе}$   | МПа                 | 1.8      |
| Температура перегрітої пари                 | $T_{пп}$   | К                   | 653      |
| Температура живильної води                  | $T_{пв}$   | К                   | 374      |
| Кількість продуктів згоряння перед котлом   | $V_{пс}$   | м <sup>3</sup> /год | 90*103   |
| Температури продуктів згоряння перед котлом | $T_{пс}$   | К                   | 1123     |
| Температура продуктів згоряння після котла  | $T_{ух}$   | К                   | 543      |
| Холодна температура повітря                 | $T_{хв}$   | К                   |          |
| Обсяг безперервного видування               | $P$        | %                   | 2        |
| Тиск барабана                               | $P_{б}$    | МПа                 | 1.9      |
| Тиск живильної води                         | $P_{пв}$   | МПа                 | 1.8      |

## 2.2 Розрахунок ентальпії димових газів

Обчислюємо ентальпії продуктів згоряння на 1 м<sup>3</sup> за нормальних умов.

Середні властивості продуктів згоряння поверхонь нагріву котельні занесемо в таблицю 2.2.



Таблиця 2.2 – Об'єми продуктів згоряння та об'ємні частки триатомних газів по газоходах котла

| Величина   | До котла до і після пароперегрівач | Між II і III пакетами | Перед економайзером | Після економайзера |
|--|------------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| Всмоктування повітря $V_{пр}$ , $m^3/m^3$                      | -                                  | 0,010                 | 0,020               | 0,050              |
| Загальний об'єм продуктів згоряння $V_{ps}$ , $m^3/m^3$        | 1000                               | 1,010                 | 1020                | 1050               |
| Об'ємна частка: триатомні продукти згоряння $r_{CO_2}$         | 0,120                              | 0,119                 | 0,118               | 0,115              |
| Водяна пара $r_{H_2O}$   | 0,105                              | 0,104                 | 0,103               | 0,100              |
| Загальна частка продуктів згоряння $r_n = r_{CO_2} + r_{H_2O}$ | 0,225                              | 0,223                 | 0,221               | 0,215              |

Ентальпія димових газів при  $\alpha > 1$  розраховується за формулою, кДж/м<sup>3</sup>:

$$I_z = I_z^o + (\alpha - 1)I_g^o$$

де  $I_z^o$  - ентальпія димових газів при  $\alpha = 1$

$I_g^o$  - ентальпія повітря при  $\alpha = 1$

Ентальпія газів при  $\alpha = 1$  і температурі газу  $T$ , К розраховується за формулою, кДж/м<sup>3</sup>.

$$I_z^o = V_{RO_2} (C \cdot (T-273)) + V_{N_2}^o (C \cdot (T-273)) + V_{O_2} (S \cdot (T-273)) +$$

$$+ V_{H_2O}^o (S \cdot (T-273))_{H_2O}$$

Ентальпії димових газів перед котлом, до і після пароперегрівача, кДж/м<sup>3</sup>

$$I_{2, 373} = 20,5 + 7,12 + 93 + 15,9 = 137$$

$$I_{2, 473} = 42,7 + 14,6 + 187 + 31,8 = 276$$

$$I_{2, 573} = 67 + 22,2 + 282 + 48,6 = 420$$

$$I_{2, 673} = 93 + 30,2 + 376 + 65,8 = 565$$

$$I_{2, 773} = 119,4 + 38,5 + 477 + 83,5 = 718$$

$$I_{2, 873} = 147 + 46,9 + 580 + 101 = 875$$

$$I_{2, 973} = 176 + 55,2 + 680 + 120 = 1031$$

$$I_{2, 1073} = 205 + 63,6 + 785 + 140 = 1194$$

$$I_{2, 1173} = 235 + 72,4 + 895 + 160 = 1362$$

Розраховуємо ентальпії димових газів для інших ділянок і заносимо їх у таблицю 2.3.

За результатами таблиці 2.3 побудуємо діаграму I – T, яка дозволяє визначити ентальпію продуктів згоряння при будь-якій температурі при заданому коефіцієнті надлишку повітря (рис. 2.1)

Таблиця 2.3 - Ентальпії продуктів згоряння, кДж/м<sup>3</sup>

| Температури продуктів згоряння<br>Т, К | Перед коглом, до і після<br>пароперегрівача<br>I1 | Між II і III пакетами<br>I2 | Перед економайзером<br>I3 | За економайзером<br>I4 |
|--|---|-----------------------------|---------------------------|------------------------|
| 373                                    | 137   | 138.3                       | 139.5                     | 143.8                  |
| 473                                    | 276   | 278,5                       | 281,8                     | 289                    |
| 573                                    | 420   | 424.3                       | 428                       | 440.1                  |
| 673                                    | 565   | 570.4                       | 575,9                     | 592.2                  |
| 773                                    | 718   | 727.4                       | 731,8                     | 752.4                  |
| 873                                    | 875   | 883,4                       | 891,8                     | 916,5                  |
| 973                                    | 1031  | 1040,6                      | 1050,7                    | 1080                   |
| 1073                                   | 1194  | 1205.3                      | -                         | -                      |
| 1173                                   | 1362  | 1375                        | -                         | -                      |

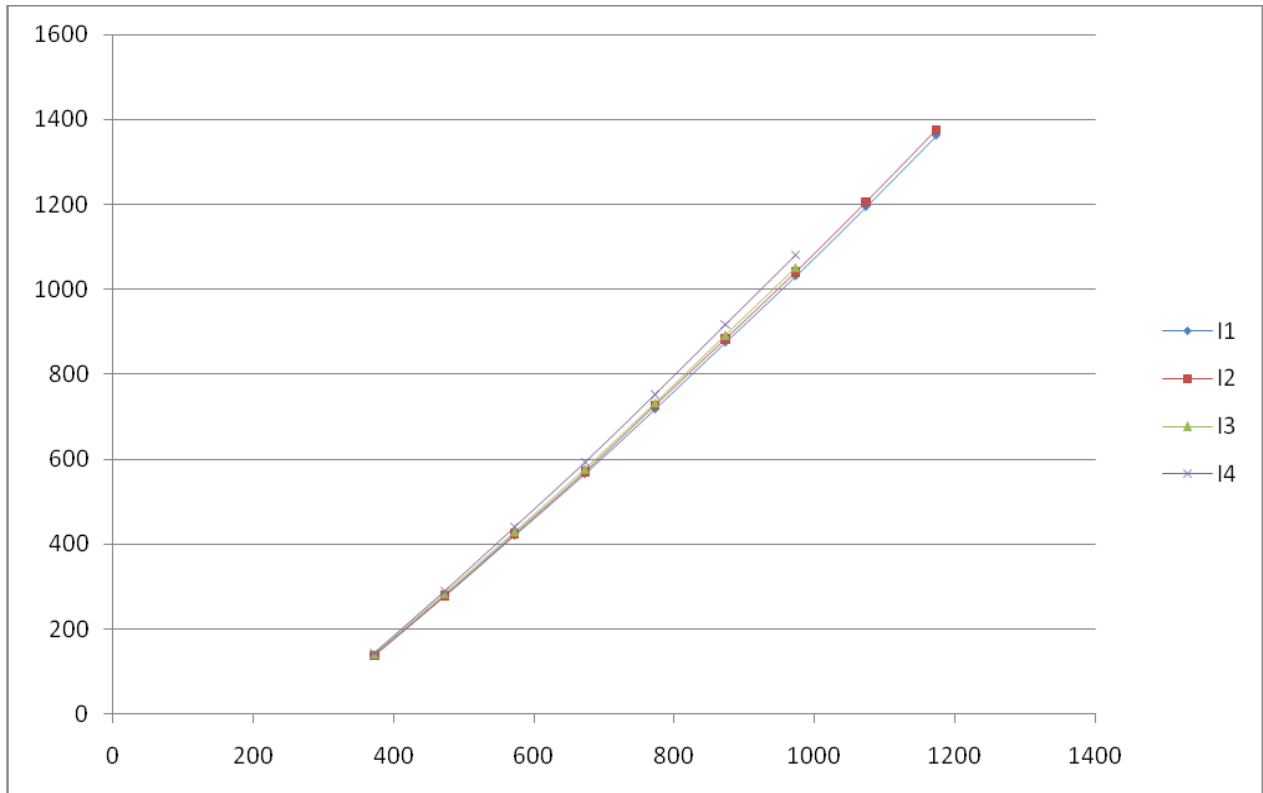


Рисунок 2.1 – Ентальпії продуктів згоряння

### 2.3 Розрахунок паропродуктивності котла

Витрата продуктів згоряння (згідно табл. 2.1), м<sup>3</sup>/с

$$V_{n.z.}^0 = 25$$

Температура продуктів згоряння (див. табл. 2.1), К

$$T_{n.z.}^0 = 1123$$

Ентальпія продуктів згоряння перед котлом (див. табл. 2.3 і рис. 2.1), кДж/м<sup>3</sup>

$$I_{n.z.}^0 = 1280$$

Температура продуктів згоряння після котла (див. табл. 2.1), К

$$T_{n.з.}^{yx} = 543$$

Ентальпія продуктів згоряння на виході з котла (див. табл. 2.3 та рис. 2,1),  
кДж/м<sup>3</sup>

$$I_{n.з.}^{yx} = 362$$

Ентальпія всмоктуваного повітря кДж/м<sup>3</sup>

$$I_{вз} = V_{np} \cdot c \cdot (T_{вз} - T^0) = 0,05 \cdot 40 = 2$$

Кількість теплоти, переданої продуктами згоряння, кВт

$$Q = (I_{n.з.}^0 - I_{n.з.}^{yx} + I_{np}) \cdot V_{n.з.}^0 = (1280 - 362 + 2) \cdot 22 = 22,18 \cdot 10^3$$

Тиск пари, МПа  
перегріта пара

$$p_{n.n} = 1,8$$

в барабані

$$p_{\bar{o}} = 1,9$$

Температура пари, К

$$T_{n.n} = 653$$

Ентальпія перегрітої пари (при РПП), кДж/кг

$$i_{n.n} = 3211$$

Ентальпія рідини в барабані (при  $p_{\sigma}$ ), кДж/кг

$$i_{\text{кин}} = 893$$

Ентальпія живильної води (при  $p_{\sigma}$ ), кДж/кг

$$i_{n.в} = 420,6$$

Кількість тепла видування, кДж/кг

$$i_{np} = 0,01 \cdot P \cdot (i_{\text{кин}} - i_{n.c}) = 0,01 \cdot 8 \cdot (893 - 420,6) = 37,8$$

де  $P$  - величина безперервного видування %.

Кількість теплоти, що поглинається в котлі 1 кг пари, кДж/кг

$$\Delta i_{np} = i_{n.n} - i_{n.в} + i_{np} = 3211 - 420,6 + 37,8 = 2828$$

Коефіцієнт, що враховує тепловиділення за рахунок огороження

$$\varphi = 0,98$$

Розрахункова паропродукція котла, кг/с

$$D = \frac{Q \cdot \varphi}{\Delta i} = \frac{22180 \cdot 0,98}{2828} = 7,68$$

## 2.4 Розрахунок поверхонь випарного нагріву

Температури продуктів згоряння на виході з пакету, К

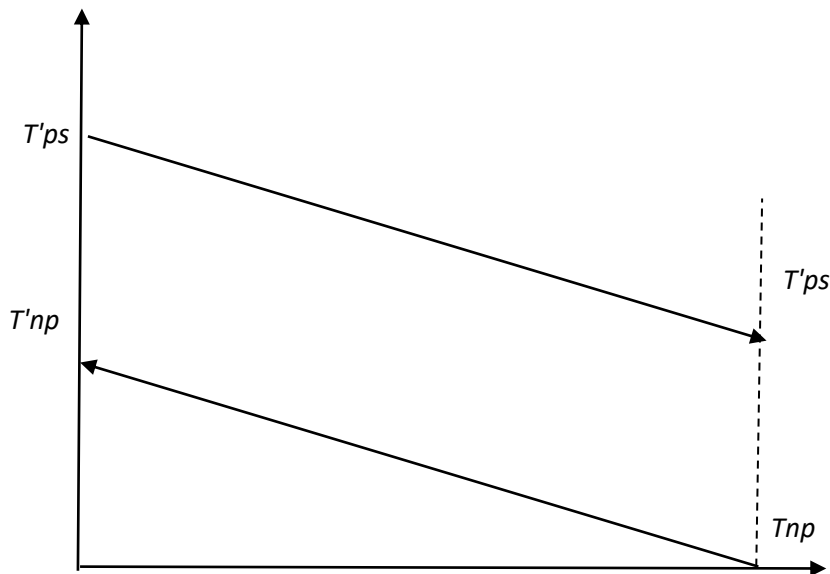
$$T''_{n.з.} = 1010$$

Розрахунковий температурний тиск, К

$$\Delta T = \frac{(T_{n.з.}^0 - T_{н.п.}) - (T''_{n.з.} - T_{н.п.})}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta T_{\delta}}{\Delta T_m}} = \frac{(1123 - 482) - (1010 - 482)}{2,3 \cdot \lg \frac{641}{528}} = 582$$

Розрахункова температура подачі, К

$$T_{ном} = T_{н.п.} + \Delta T = 482 + 582 = 1064$$



*продукти горіння* →

Рисунок 2.2 – Температурний графік пакета випаровування І (протиток).

Середній об'єм продуктів згоряння, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V=I$$

Витрата продуктів згоряння, м<sup>3</sup>/с

$$V_{n.c.} = \frac{V \cdot V_{n.3}^0 \cdot T_{nom}}{273} = \frac{1 \cdot 25 \cdot 1064}{273} = 94,7$$

Площа прозорого перерізу для проходу продуктів згоряння, м<sup>2</sup>

$$F = 6,96$$

Середня швидкість продуктів згоряння, м/с

$$\omega_{n.3} = \frac{V_{n.3}}{F} = \frac{94,7}{6,69} = 13,6$$

Коефіцієнт теплопередачі конвекцією, Вт/(м<sup>2</sup> К)

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot C_\phi \cdot \alpha_n = 1 \cdot 1 \cdot 0,98 = 114$$

Загальна поглинальна здатність триатомних продуктів згоряння, м/МПа

$$p_n Sp = (r_{H_2O} + r_{RO_2}) Sp = (0,105 + 0,12) 0,122 \cdot 0,1 = 0,0274$$

Сумарна сила поглинання продуктів згоряння

$$KPS = K_z \cdot r_n \cdot Sp = 4,4 \cdot 0,225 \cdot 0,122 = 0,12$$

Коефіцієнт забруднення (м<sup>2</sup> К) /кг

$$\varepsilon = 0,0043$$

Температура забрудненої стінки, К

$$T_3 = T_{н.п.} + \varepsilon \frac{Q_1 V_{n.3}^0}{H_1} \cdot 10^3 = 482 + 0,0043 \frac{184 \cdot 25}{93} \cdot 10^3 = 694$$



де  $H_1$  – розрахункова площа поверхні нагріву,  $m^2$

Коефіцієнт радіаційної тепловіддачі,  $Вт/(m^2K)$

$$\alpha_{\lambda} = \alpha_n a C_{\epsilon} = 144,3 \cdot 0,12 \cdot 0,94 = 16,24$$

Коефіцієнт видалення

$$\omega = 1$$

Коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згоряння до стіни,  $Вт/(m^2K)$

$$\alpha_1 = \omega \alpha_K + \alpha_{\lambda} = 1 \cdot 114 + 16,24 = 130,24$$

Коефіцієнт тепловіддачі,  $Вт/(m^2K)$

$$K = \frac{\alpha_1}{1 + \epsilon \alpha_1} = \frac{130,24}{1 + 0,004 \cdot 130,24} = 83,4$$

Кількість теплоти, що поглинається поверхнею нагріву,  $кДж/м^3$

$$Q_1 = \frac{H_1 K \Delta T}{V_{пз} \cdot 10^3} = \frac{93 \cdot 83,4 \cdot 582}{25 \cdot 10^3} = 180,07$$

Ентальпія продуктів згоряння на виході з упаковки

$$I''_{пз} = I_{пз}^0 - \frac{Q}{\varphi} = 12800 - \frac{180,07}{0,98} = 1095$$

Температури продуктів згоряння на виході з пакету,  $K$

$$T_{пз} = 1012 \text{ (табл. 2.3 та рис. 2.1)}$$

Кількість пари, що виробляється 1 випарним пакетом,  $кг/с$

$$D = \frac{QV}{(i'' - i')} = \frac{180,07 \cdot 25}{(2796,8 - 893)} = 2,36$$

У процесі розрахунку I пакету випаровування довжини змійовиків та їх кількість у пакеті збільшували шляхом зміни поздовжнього та поперечного кроків.

Розрахункова площа поверхні нагріву склала 93 м<sup>2</sup>. Основна площа поверхні нагріву становила 60 м<sup>2</sup>.

Температура перегрітої пари, К

$$T_{pp} = 653$$

Ентальпія перегрітої пари, кДж/м<sup>3</sup>

$$i_{pp} = 3210,7$$

Кількість тепла, що поглинається пароперегрівачем, кДж/м<sup>3</sup>

$$Q_{пп} = \frac{D(i_{пп} - i_{пп})}{V_{пс}} = \frac{7,68(3210,7 - 2796,8)}{25} = 127,14$$

Температура продуктів згоряння після пароперегрівача, К

*прямий потік*

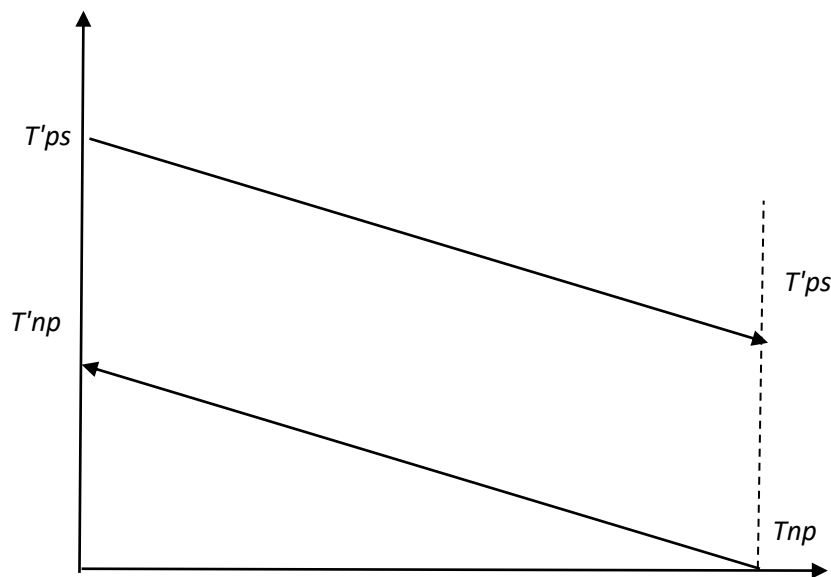
$$\Delta T_{пп} = \frac{(T_{пз} - T_{пп}) - (T''_{пз} - T_{пп})}{2,3 \lg \frac{\Delta T_B}{\Delta T_M}} = \frac{(1010 - 653) - (935 - 482)}{2,3 \lg \frac{453}{357}} = 364,9$$

*протитечія*

$$\Delta T_{\text{ПРО}} = \frac{(T'_{\text{ПЗ}} - T'_{\text{НП}}) - (T''_{\text{ПЗ}} - T''_{\text{НП}})}{2,3 \lg \frac{\Delta T_{\text{Б}}}{\Delta T_{\text{М}}}} = \frac{(1010 - 482) - (896 - 653)}{2,3 \lg \frac{528}{243}} = 367$$

Розрахунковий температурний тиск, К

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{\text{ПР}} + \Delta T_{\text{ПРО}}}{2} = \frac{367 + 364,9}{2} = 365,8$$



продукти горіння →

Рисунок 2.3 – Температурний графік пароперегрівача

Середня температура пари, К

$$\bar{T} = \frac{T_{\text{ПЗ}} + T_{\text{НП}}}{2} = \frac{653 + 482}{2} = 567,5$$

Розрахункова температура подачі, К

$$T_{\text{ПОГ}} = \bar{T} + \Delta T = 567,5 + 365,8 = 933,3$$

Середній об'єм продуктів згоряння, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V=1$$

Витрата продуктів згоряння, м<sup>3</sup>/с

$$V = \frac{VV_{ПЗ}^0 T_{ПОТ}}{273} = \frac{1 \cdot 25 \cdot 960,1}{273} = 85,4$$

Площа прозорого перерізу для проходу продуктів згоряння, м<sup>3</sup>

$$F = 6,96$$

Коефіцієнт видалення

$$\omega = 1$$

Коефіцієнт теплопередачі конвекцією, Вт/(м<sup>2</sup> К)

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot C_\phi \cdot \alpha_n = 1 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 107 = 102,8$$

Загальна поглинальна здатність триатомних продуктів згоряння, м/МПа

$$p_n Sp = (r_{H_2O} + r_{RO_2}) Sp = 0,225 \cdot 0,122 \cdot 0,1 = 0,0275$$

Сумарна сила поглинання продуктів згоряння

$$KPS = K_z \cdot r_n \cdot Sp = 7,3 \cdot 0,225 \cdot 0,122 = 0,123$$

Температура забрудненої стінки, К

$$T_3 = \bar{T}_n + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q_{n,n} V_{n,3}^0}{H_{n,n}} \cdot 10^3 = 567,5 + \left( 0,004 + \frac{1}{1163,8} \right) \cdot \frac{127,14 \cdot 25}{140} \cdot 10^3 = 694$$

Коефіцієнт радіаційної тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup> К)

$$\alpha_n = \alpha_n a C_2 = 144,4 \cdot 0,132 \cdot 0,95 = 14,2$$

Коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згоряння до стіни, Вт/(м<sup>2</sup> К)

$$\alpha_1 = \omega \alpha_k + \alpha_n = 1 \cdot 105 + 21,4 = 126,4$$

Середній питомий об'єм пари, м<sup>3</sup>/кг

$$v = \frac{v + v}{2} = \frac{0,1662 + 0,1066}{2} = 0,1364$$

Площа прозорого перерізу для проходу пари, м<sup>2</sup>

$$f_n = 0,026$$

Середня швидкість пари, м/с

$$w = \frac{D v_n}{f_n} = \frac{7,68 \cdot 0,1364}{0,026} = 40,2$$

Коефіцієнт теплопередачі від стіни до пари Вт/(м<sup>2</sup> К)

Коефіцієнт забруднення, м<sup>2</sup> К/Вт

$$\varepsilon = 0,0043$$

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup> К)

$$K = \frac{\alpha_1}{1 + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \alpha_1} = \frac{117}{1 + \left( 0,0043 + \frac{1}{1198,8} \right) 117} = 73,09$$

Розрахункова площа поверхні нагріву пароперегрівача, м<sup>2</sup>

$$H_{n.n} = \frac{Q_{n.n} V_{n.3}^0}{K \Delta T} = \frac{127,14 \cdot 25 \cdot 10^3}{73,09 \cdot 365,8} = 119,02$$

Кількість пари, що виробляється пароперегрівачем, кг/с

$$D = \frac{Q \cdot V_{n.3}}{(i'' - i')} = \frac{127,14 \cdot 25}{(3210,7 - 2796,8)} = 7,68$$

У процесі розрахунку пароперегрівача довжини змійовиків і їх кількість в пакеті збільшувалися шляхом зміни поздовжнього і поперечного кроків. Розрахункова площа поверхні нагріву склала 120 м<sup>2</sup>. Основна площа поверхні нагріву склала 87 м<sup>2</sup>.

Температура продуктів згоряння на виході з упаковки, К

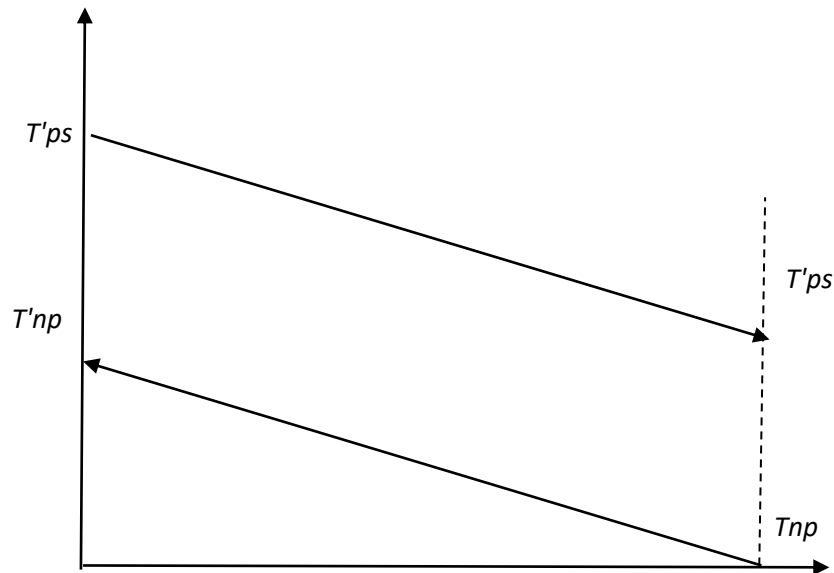
$$T''_{n.3} = 603$$

Розрахунковий температурний тиск, К

$$\Delta T = \frac{(T'_{n.3} - T_{n.n.}) - (T''_{n.3} - T_{n.n.})}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta T_{\delta}}{\Delta T_m}} = \frac{(896 - 482) - (603 - 482)}{2,3 \cdot \lg \frac{414}{121}} = 246$$

Розрахункова температура подачі, К

$$T_{ном} = T_{n.n.} + \Delta T = 482 + 246 = 728$$



продукти горіння →

Рисунок 2.4 – Температурний графік II, III випарного пакета (протиток).

Середній об'єм продуктів згоряння, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V=1,025$$

Витрата продуктів згоряння, м<sup>3</sup>/с

$$V_{n.c.} = \frac{V \cdot V_{n.з}^0 \cdot T_{nom}}{273} = \frac{1,025 \cdot 25 \cdot 728}{273} = 68,33$$

Площа живого перетину для проходу продуктів згорання, м<sup>2</sup>

$$F=6,96$$

Середня швидкість продуктів згорання, м/с

$$\omega_{n.з} = \frac{V_{n.з}}{F} = \frac{68,33}{6,96} = 9,7$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_{\kappa} = C_z \cdot C_s \cdot C_{\phi} \cdot \alpha_n = 1 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 90,7 = 88,88$$

Сумарна поглинаюча здатність трьохатомних продуктів згорання, м·МПа

$$p_n Sp = (r_{H_2O} + r_{RO_2}) Sp = (0,1045 + 0,12) 0,1 \cdot 0,122 = 0,00268$$

Сумарна сила поглинання продуктів згорання

$$KPS = K_z \cdot r_n \cdot Sp = 41 \cdot 0,224 \cdot 0,122 \cdot 0,1 = 0,112$$

Коефіцієнт забруднення, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\varepsilon = 0,0043$$

Температура забрудненої стінки, К

$$T_z = T_{н.п.} + \varepsilon \frac{Q_1 V_{н.с}^0}{H_1} \cdot 10^3 = 482 + 0,0043 \frac{471 \cdot 25}{468} \cdot 10^3 = 554$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_l = \alpha_n a C_z = 573 \cdot 0,111 \cdot 0,95 = 6,07$$

Коефіцієнт омивання

$$\omega = 1$$

Коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згорання до стінки, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_1 = \omega \alpha_{\kappa} + \alpha_l = 1 \cdot 88,88 + 6,07 = 94,95$$

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К)



$$K = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \alpha_1} = \frac{94,95}{1 + 0045 \cdot 94,95} = 67,42$$

Кількість теплоти, сприйнятої поверхнею нагріву, кДж/м<sup>3</sup>

$$Q_1 = \frac{H_1 K \Delta T}{V_{n.c} \cdot 10^3} = \frac{468 \cdot 67,42 \cdot 246}{25 \cdot 10^3} = 465$$

Ентальпія продуктів згоряння на виході з пакета, кДж/м<sup>3</sup>

$$I''_{n.з} = I^0_{n.з} - \frac{Q}{\varphi} = 928,1 - \frac{465}{0,98} = 454,8$$

Температура продуктів згоряння на виході з пакета, К

$$T_{n.з.} = 588$$

Кількість пари, виробленої II, III випарними пакетами, кг/с

$$D = \frac{Q \cdot V_{nc}}{(i'' - i')} = \frac{465 \cdot 25}{(2796,8 - 893)} = 6,11$$

У процесі розрахунку II, III випарного пакета довжини зміювиків і їх кількість в пакеті збільшувалися шляхом зміни поздовжнього і поперечного кроків. Розрахункова площа поверхні нагріву склала 468 м<sup>2</sup>. Площа базової поверхні нагріву склала 463 м<sup>2</sup>.

Температура продуктів згоряння перед економайзером, К

$$T'_{n.з.} = 588$$

Ентальпія продуктів згоряння перед економайзером, кДж/м<sup>3</sup>

$$I'_{n.з.} = 454,8$$

Температура продуктів згоряння після економайзера, К

$$T''_{ек} = 503$$

Ентальпія продуктів згоряння після економайзера, кДж/м<sup>3</sup>

$$I'_{ек} = 319,22$$

Тепло, поглинене економайзером, кДж/м<sup>3</sup>

$$Q_e = \varphi(I'_{n.з} - I''_{n.з} + I_{в.з}) = 0,98(454,8 - 319,22 + 0,84) = 133,69$$

Тепло, передане в економайзері 1 кг води, кДж/кг

$$\Delta i = \frac{Q_e V_{n.з}^0}{(1 + 0,01P) D_k} = \frac{133,69 \cdot 25}{1,08 \cdot 7,68} = 402,95$$

Ентальпія води після економайзера, кДж/кг

$$i''_e = i' + \Delta i = 420,6 + 402,95 = 823,55$$

Температура води після економайзера, К

$$T''_e = 466$$

Розрахунковий температурний натиск, К

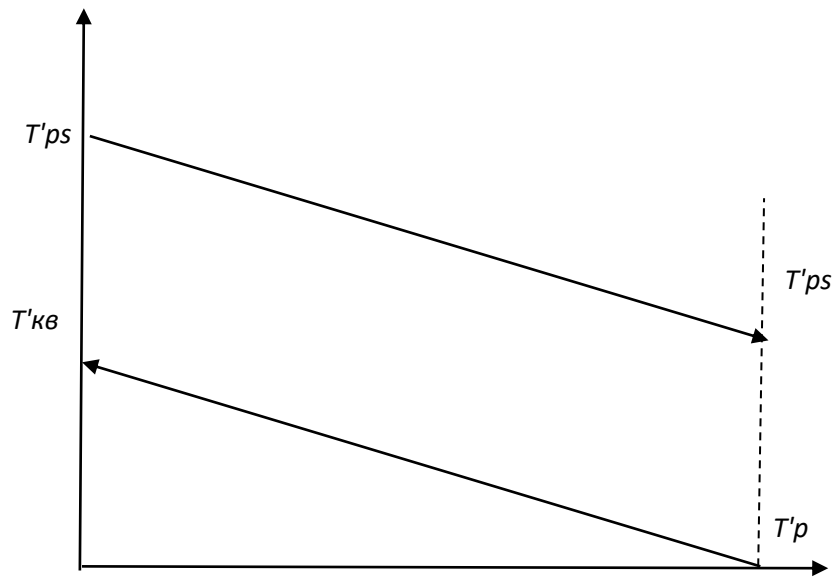
$$\Delta T = \frac{(T'_{n.з} - T''_e) - (T''_{n.з} - T''_e)}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta T_{\sigma}}{\Delta T_m}} = \frac{(588 - 466) - (503 - 374)}{2,3 \cdot \lg \frac{129}{122}} = 125,46$$

Середня температура води, К

$$\bar{T}_e = \frac{T''_e + T'_e}{2} = \frac{466 + 374}{2} = 420$$

Розрахункова температура води, К

$$T_{nom} = \bar{T}_e + \Delta T = 420 + 123,46 = 545,46$$



продукти горіння →

Рисунок 2.5 – Температурний графік економайзера (протиток).

Середній об'єм продуктів згорання, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V = 1,04$$

Витрата продуктів згорання, м<sup>3</sup>/с

$$V_{n.z.} = \frac{V \cdot V_{n.z}^0 \cdot T_{nom}}{273} = \frac{1,04 \cdot 25 \cdot 545,4}{273} = 52,1$$

Площа живого перетину для проходження продуктів згорання, м<sup>2</sup>

$$F = 5,38$$

Середня швидкість продуктів згорання, м/с

$$\omega_{n.c} = \frac{V_{n.c}}{F} = \frac{52,1}{5,38} = 9,7$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot C_\phi \cdot \alpha_n = 1 \cdot 1,02 \cdot 0,98 \cdot 107 = 107,03$$

Питомий об'єм води (при T = 373К), м<sup>3</sup>/кг

$$v_g = 0,00104$$

Швидкість води на вході до економайзеру, м/с

$$w_g = \frac{(1+0,01P)D_k v_g}{f} = \frac{(1+0,8) \cdot 7,16 \cdot 0,001104}{0,0127} = 0,63$$

Сумарна поглинаюча здатність трьохатомних продуктів згоряння, м·МПа

$$p_n Sp = (r_{H_2O} + r_{RO_2}) Sp = (0,101 + 0,116) \cdot 0,122 \cdot 0,1 = 0,0026$$

Сумарна сила поглинання продуктів згоряння

$$KPS = K_z \cdot r_n \cdot Sp = 45 \cdot 0,217 \cdot 0,122 \cdot 0,1 = 0,119$$

Коефіцієнт забруднення, (м<sup>2</sup>·К)/Вт

$$\varepsilon = 0,005$$

Температура забрудненої стінки, К

$$T_3 = T_{н.н.} + \varepsilon \frac{Q_1 V_{н.з}^0}{H_1} \cdot 10^3 = 420 + 0,005 \frac{133,69 \cdot 25}{370} \cdot 10^3 = 465$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_{л} = \alpha_{н} a C_2 = 27,9 \cdot 0,112 \cdot 0,98 = 3,06$$

Коефіцієнт омивання

$$\omega = 1$$

Коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згоряння до стінки, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_1 = \omega \alpha_{к} + \alpha_{л} = 1 \cdot 107,03 + 3,06 = 110,09$$

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$K = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \alpha_1} = \frac{110,09}{1 + 0,005 \cdot 110,09} = 71,84$$

Необхідна площа поверхні нагріву, м<sup>2</sup>

$$H_e = \frac{Q_2 V_{н.з}^0}{K \Delta T} \cdot 10^3 = \frac{133,69 \cdot 25}{71,34 \cdot 125,46} = 373,4$$

Приймаємо площу поверхні нагріву, м<sup>2</sup>

$$H_s = 374$$

У процесі розрахунку економайзера довжини котушок були збільшені. Розрахункова площа поверхні нагріву склала 374 м<sup>2</sup>. Площа базової поверхні нагріву склала 321 м<sup>2</sup>.

## 2.5 Аеродинамічний розрахунок котла

Рух продуктів згоряння і розглянутого повітря, як і рух в'язких рідин, носить турбулентний характер і відбувається при зміні температури, оскільки продукти згоряння охолоджуються, а повітря при наявності повітрянагрівача нагрівається.

При русі в'язких продуктів згоряння виникають опори, які перешкоджають руху. Подолання цих опорів забирає частину енергії, якою володіє рухомий потік рідини. Опір обумовлений силами тертя рухомого потоку об стінки каналу і збільшенням внутрішнього тертя в потоці при виникненні на його шляху різноманітних перешкод.

Для подолання опору рухомий потік повинен мати певний надлишковий тиск, який буде падати в міру руху по шляху. Аеродинамічний опір будь-якої ділянки воздуховода складається з опору тертя і місцевого опору, а також опору омиваних пучків труб.

Аеродинамічний опір котла з поперечним обмиванням поверхні нагріву визначається

$$\Delta h = \Delta h_{\text{ПОП}} + \Delta h_{\text{ПОВ}} + \Delta h_t$$

де  $\Delta h_{\text{ПОП}}$  - опір поперечного обмивання гладкотрубних пучків;

$\Delta h_{\text{ПОВ}}$  - місцевий опір повороту газоходу при П- подібній компоновці котла;

$\Delta h_t$  - опір обумовлений зміною динамічного натиску.

Опір пучків, Па

$$\Delta h_{\text{ПОП}} = \Delta h_0 + \xi_0 \cdot (z + 1)$$

де  $\Delta h_0$  - опір одного поперечного ряду труб, визначається залежно від швидкості і температури в пучку;

$z$  - число труб по глибині шахового пучка;

$\xi_0 = C_s C_D$  - коефіцієнт опору форми шахового пучка, залежний від

відношення  $\sigma_1 = \frac{s_1}{d}$  та  $\varphi = \frac{s_1 - d}{s'_2 - d}$ , а також від числа Re

Діагональний шаг труб, м

$$s'_2 = \sqrt{\frac{1}{4}s_1^2 + s_2^2}$$

Для всіх пучків котла геометричний параметр однаковий

$$s'_2 = \sqrt{\frac{1}{4}0,07^2 + 0,05^2} = 0,061,$$

$$\varphi = \frac{0,07 - 0,025}{0,061 - 0,25} = 1,2$$

В залежності від цього параметра визначається  $\xi_0$

$$\xi_0 = 1,2 \text{ ( [2 ном. VII-7], при } 0,1 \leq \varphi \leq 1,7 \text{ ).}$$

Опір повороту газоходу

$$\Delta h_{пов} = \varphi_{пов} \cdot w^2 / 2 \cdot \gamma$$

Коефіцієнт місцевого опору

$$\varphi_{пов} = \varphi_0 k \alpha$$

де  $\varphi_0 = 1,2$  - початковий коефіцієнт опору

$k \alpha = 1,4$  - поправочний коефіцієнт залежний від кута повороту

$$\varphi_{пов} = 1,2 \cdot 1,4 = 1,68$$

Розрахунок опору балки наведено в таблиці 2.4

Таблиця 2.4 – Опір поперечно промитих пучків труб

| Ім'я поверхні опалення          | Середня швидкість газу, м/с | Середня температура газу, °С | z  | z+1 | $\Delta h_0$ | $\xi_0$ | $\Delta h_{ном}$ |
|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----|-----|--------------|---------|------------------|
| I випарний пакет                | 13.6                        | 1064                         | 7  | 8   | 12.26        | 1.2     | 117.6            |
| пароперегрівач                  | 12.2                        | 933                          | 11 | 12  | 9.81         | 1.2     | 141.2            |
| II і III випарні пакети         | 9.7                         | 728                          | 53 | 54  | 8.3          | 1.2     | 537,8            |
| I, II, III пакети економайзерів | 9.7                         | 545                          | 57 | 58  | 8.83         | 1.2     | 588,9            |
| Загальний опір трубних пучків   | 1385                        |                              |    |     |              |         |                  |

Швидкість газу в повороті, м/с

$$\omega = \frac{V \cdot T}{3600 \cdot F \cdot 273} = \frac{92800 \cdot 563}{3600 \cdot 6,2 \cdot 273} = 9,7$$

Опір повороту газоходу, Па

$$\Delta h_{нов} = \varphi_{нов} \frac{\omega^2 \gamma}{2} = 1,68 \cdot 42 = 25,4$$

де-  $\frac{\omega^2 \gamma}{2}$  динамічний натиск, Па



$$\frac{\omega^2 \gamma}{2} = \frac{9,7^2 \cdot 0,54}{2} = 42$$

Опір, обумовлений зміною динамічного натиску

$$\Delta ht = \frac{2(T' - T'')}{T_{cp}} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \gamma}{2} = \frac{2(1064 - 545)}{804,5} \cdot 42 = 54,19$$

де  $T', T'', T_{cp}$  - вхідна, вихідна і середня температура потоку, °С

Повний аеродинамічний опір котла

$$\Delta h = \Delta h_{non} + \Delta h_{нов} + \Delta ht = 1385,5 + 42 + 54,19 = 1481,7$$

## 2.6 Вибір димососа

У котельних в основному застосовуються вентилятори і димососи одностороннього всмоктування правого або лівого обертання. Димососи від вентиляторів відрізняються збільшеною товщиною лопатей крильчатки, наявністю накладок в їх коренях і броні вздовж створюючої спіралі. В даний час промисловість випускає димососи типу ДН.

У передпусковий період перевіряється правильність встановлення димососів за паспортними даними. Місцево перевіряється вузол кріплення робочого колеса на валу (наявність шпонки, болта кріплення). Вимірюється зазор між вхідним отвором колеса і впускним конусним кільцем (має становити  $0,002 \cdot D$ , де  $D$  – діаметр колеса; довжина перекриття вхідного кільця робочим колесом повинна бути  $0,01 \cdot D$ ).

Для забезпечення надійної роботи котла-утилізатора був обраний одновсмоктувальний відцентровий димосос ДН-21МГМ, тип 0,55-40-1 [2. рис. VII-32].

Характеристика димососу ДН-21МГМ 0,55-4-1  
машинобудівного заводу «СИБМАШ»

|   |       |
|---|-------|
| Частота обертання валу, об/хв.                  | 980   |
| Продуктивність, тис м <sup>3</sup> /год         | 142   |
| Повний тиск, кПА                                | 5,856 |
| Потужність на валу, кВт                         | 187   |
| Максимальна допустима частота обертання, об/хв. | 1000  |
| Максимальний ККД                                | 85%   |
| Діаметр робочого колеса, мм                     | 2100  |
| Температура потоку, °С                          | 250   |
| Запиленість потоку, г/м <sup>3</sup>            | 8     |

### 2.7 Вибір обладнання для хімічної обробки

Видалення з живильної води теплових мереж розчинених агресивних газів O<sub>2</sub> і CO<sub>2</sub> і NH<sub>3</sub> здійснюється шляхом термічної деаерації.

Термічна деаерація води заснована на законі розподілу речовини між фазами і є окремим випадком його застосування, згідно з яким розчинність газу у воді з урахуванням його парціального тиску в підводному просторі характеризується наступним співвідношенням

$$G = k_p \cdot p_e = k_p (p - p_n)$$

де G - розчинність газу у воді мг/кг або г/т

k<sub>p</sub> - коефіцієнт розчинності газу, залежний від температури води мг/(кг мм.рт. стовпа) або г/(т.мм.рт.ст.)

p - сумарний тиск газу і водяної пари в просторі під водою, мм.рт.ст.

p<sub>n</sub> - парціальний тиск водяної пари в тому ж просторі, мм.рт.ст.

P<sub>г</sub> - парціальний тиск газу в тому ж просторі мм.рт.ст.

Як видно з виразу, розчинність газу у воді дорівнює нулю при p<sub>n</sub> = p, що має місце при кипінні води. Чисельне значення тиску в підводному просторі

практично не впливає на ефект деаерації. Тому термічну деаерацію можна проводити при тиску як вище, так і нижче атмосферного, якщо температура води дорівнює температурі кипіння при заданому тиску.

Однак доведення негазованої води до кипіння не забезпечує повного видалення з неї розчинених газів навіть при нульовому парціальному тиску.

Процес термічної деаерації являє собою сукупність паралельних і пов'язаних процесів нагрівання води, деаерованої до точки кипіння, дифузії розчинених у воді газів і їх десорбції, причому роль останнього процесу є визначальною.

Найважче видалити з води аміак, розчинність якого при температурі 100°C приблизно в 3000 разів перевищує розчинність кисню і в 150 разів перевищує розчинність вуглекислого газу. При загальній присутності в деаераційній воді вуглекислого газу та аміаку, вони утворюють особливо летючий карбонат амонію, який ще більше погіршує ефективність термічної деаерації.

Пристрої, призначені для термічної деаерації, називають термодеаератором.

Теплові деаератори живильної води по ГОСТ 16860-71 умовно поділяються на такі типи:

- 1) Вакуумні - ДСВ, що працюють при тиску до 0,3 кгс/см<sup>2</sup>;
- 2) Атмосферний - SDS, що працює при тиску 1,2 кгс/см<sup>2</sup>;
- 3) Високого тиску - ДСП, що працюють при тиску від 6 до 8 кгс/см<sup>2</sup>.

Конструкції термодеаераторів повинні відповідати таким вимогам:

а) забезпечити надійний нагрів води до температури кипіння, що відповідає тиску в деаераторі;

б) точне розпилення води з метою створення максимальної поверхні для виділення газів;

в) достатній час перебування води в деаераторі, необхідний для виділення газів і розкладання гідрокарбонату натрію;

г) добре видалення з деаератора газів, що виділяються з води;

д) точне регулювання подачі грючої пари для підтримки температури кипіння води та вентиляції деаератора.

На всьому шляху між парою і водою в деаераторі повинні бути забезпечені чітко виражена протитечія і максимальна різниця між рівноважним тиском пари у воді і її парціальним тиском під водою. У деаераторі не повинно бути застійних процесів ні у воді, ні в парі. Для нашої роботи підійде двоступеневий деаератор SDS з зануреним барботажем пристроєм.

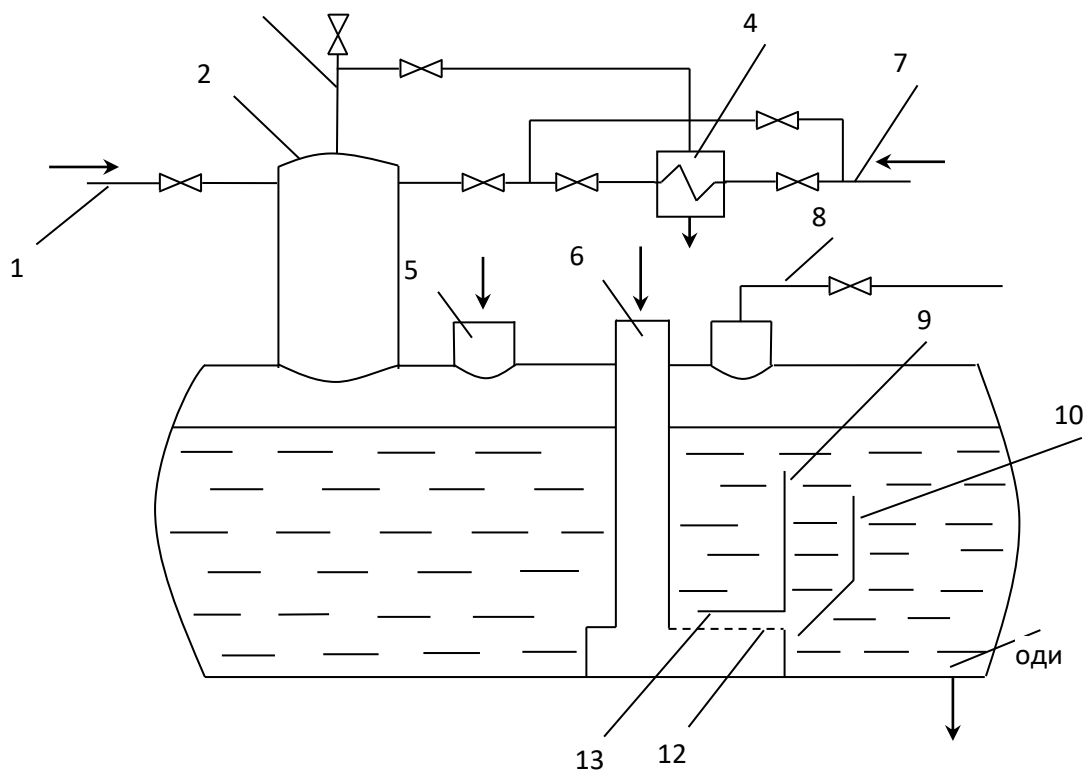


Рисунок 2.6 – Деаератор

Деаератор (рис. 2.6) являє собою горизонтальну циліндричну ємність 14, на якій з одного боку розташована деаераційна колона 2, а з іншого — занурений бульбашковий пристрій. Хімічно очищена вода надходить у деаераційну колону по трубопроводу 7. Основний потік конденсату подається в деаератор по трубопроводу 1. Обидва ці потоки змішуються на першій верхній тарілці деаераційної колони, з якої вода струминними потоками стікає в друга колона, а звідти в танк.

Після витримки в накопичувальній ємності вода направляється в бульбашковий пристрій, що представляє собою перфорований лист 12, під який по трубопроводу 6 подається пара. Через отвори перфорованого листа пара бульбашками потрапляє в шар води, повільно переміщаючись по каналу 13 до трубопроводу 11 для відводу деаерованої води з деаератора. Листи 9 і 10 утворюють вертикальний канал, в якому кипить вода, що виходить з бульбашкового пристрою.

Пара після барботажного пристрою потрапляє в паровий простір резервуара і рухається до колони над поверхнею води. Це забезпечує хорошу вентиляцію парового простору резервуара від газів, що виділяються з води. Потрапляючи в колону деаратації, пара піднімається по ній і омиває потоки води, що стікають з тарілок. Неконденсована пара і гази, що виділяються з води, видаляються з деаератора по трубопроводу 3 і надходять у випарний охолоджувач 4, де нагрівається хімічно очищена вода. У пароохолоджувачі пара конденсується, а вивільнені гази видаляються в атмосферу.

Барботування пари сприяє більш повному видаленню з води розчинених газів, які з ряду причин прослизнули з поверхні деаератора в накопичувальну ємність.

Надійна робота термодeaератора можлива тільки при автоматичному підтримці в ньому постійного тиску. Це забезпечує, незалежно від його теплового і гідравлічного навантаження, сталість температурного режиму деаерації, необхідного для найбільшого видалення газів і живильної води.

## 2.8 Принципова схема трубопроводів котла-утилізатора всередині котельні

Живильна вода подається від центральної насосно-відливної станції на дві сторони живлення котла: верхню № 1 і нижню № 2. Кожен котел з'єднаний трубопроводами з колекторами. На підвідних трубопроводах встановлено один імпульсний регулятор потужності типу ОРМ із запірною арматурою № 4 і № 5 і перепускною лінією з арматурою № 3. На лінії подачі встановлені: мірна шайба і манометр. Ці схеми живлення дозволяють жити котел будь-якої комплектації

через регулятор потужності або в обхід. З барабана котла котлова вода по двох трубопроводах, які утворюють колектор, надходить до всмоктувального циркуляційного насоса. На всмоктуванні насоса є клапани № 20, 22, а на нагнітанні регулювальні клапани № 21, 23.

На випуску кожного насоса є зворотний клапан. Для вимірювання витрати оборотної води на загальному напірному трубопроводі циркуляційних насосів встановлена вимірювальна шайба.

Циркуляційні насоси подають воду у вхідні колектори випарних змійовиків через фільтр (шлаковідділювач). Після проходження через випарні змійовики котлова вода перетворюється на пароводяну суміш, яка надходить у барабанний циклон.

Насичена пара з барабана надходить по паропроводу у впускний колектор пароперегрівача. Проби насиченої пари відбирають з лінії насиченої пари.

Після проходження через пароперегрівач насичена пара перегрівається до температури вище температури насичення пари, що відповідає тиску в котлі. Перегріта пара з випускного колектора пароперегрівача надходить у паропровід перегрітої пари, на якому встановлені запірні засувка, вимірювальна діафрагма, термopара, манометр, запобіжний клапан. Перегріта пара з котла № 1 надходить у паропровід ЛПК-2 або ЛПК-1..

Для видалення з котла утвореного шламу в котлі передбачено періодичне продування барабана, фільтра, вихідних колекторів змійовиків випарника, вхідного колектора пароперегрівача, паропроводу перегрітої пари.

Періодичне продування також дозволяє швидко привести сольовий вміст котлової води у відповідність до норм і, при необхідності, може використовуватися для швидкого зливу частини котлової води. Крім того, є спеціальна лінія для екстреного зливу води з барабана котла. Дренажні лінії колекторів пароперегрівача та лінії перегрітої пари виведені в окремий колектор.

Дренажні колектори кожного з двох котлів, встановлених в котельні, об'єднані в один загальний трубопровід, з'єднаний з барботером. Відбувається скидання дренажних колекторів котла в шламову яму. З шламової ями вода відкачується в пульпопровід за допомогою парового інжектора.

У прольоті труб встановлено два барботери, до яких приєднані дренажі КУ № 1 і 2.

У кожній котельні встановлюються пункти відбору проб котлової води з барабана котла і відбору насиченої пари з трубопроводу насиченої пари. Колектор технічної води високого тиску прокладений по стінці мартенівського цеху, вриваючись в мартенівський трубопровід високого тиску по перемичках в районі КУ №7.2.

## 3 БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОТЛА-УТИЛІЗАТОРА

### 3.1 Характеристика потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів

При експлуатації котла-утилізатора виникає багато небезпечних і шкідливих факторів. Основними з них є: пожежо- та вибухонебезпечність, оскільки як паливо використовується газ; надмірне виділення тепла; наявність продуктів окислення. Крім того, на робочих місцях необхідно забезпечити виробничу санітарію, забезпечити необхідне освітлення та вентиляцію.

Шум негативно впливає на здоров'я людини, підвищує стомлюваність працівників, тим самим сприяє виникненню травм і помилок на виробництві, а також знижує працездатність людини.

Заміри проводяться безпосередньо в цеху, де розташований котел-утилізатор, за допомогою приладів компанії Robotron. Тривалість перебування людей в зоні вимірювання: до 4 годин за зміну. Результати вимірювань середнього рівня звукового тиску в стандартних октавних смугах частот зведені в таблицю 3.1.

Усунення шкідливого впливу шуму на людину досягається будівельно-акустичними заходами (звукоізоляція робочого місця оператора котельні), дистанційним керуванням шумоутворюючим обладнанням, а також дистанційним контролем його роботи, проведенням планово-попереджувальних ремонтів (ППР), використанні індивідуального спорядження, протишумних вкладишів.

Місця з рівнем шуму понад 80 дБ повинні бути забезпечені відповідними знаками безпеки.



Таблиця 3.1 – Результати вимірювань середнього рівня звукового тиску в стандартних октавних смугах частот

| Октавні смуги із середньгеометричними частотами, Гц | Рівень звукового тиску, дБ           |   |             |
|---|--------------------------------------|---|-------------|
|   | Середні значення з вимірюваних даних | Допустимий за загальною тривалістю перебування персоналу в робочій зоні |             |
|   |                                      | до 4 годин  | до 1 години |
| 1   | 2                                    | 3   | 4           |
| 63  | 86.3                                 | 105   | 110         |
| 125   | 85                                   | 98  | 104         |
| 250   | 85.3                                 | 92  | 98          |
| 500   | 83.5                                 | 89  | 95          |
| 1000  | 80.7                                 | 86  | 92          |
| 2000  | 78,0                                 | 84  | 90          |
| 4000  | 83.2                                 | 82  | 88          |
| 8000  | 85                                   | 80  | 86          |

Котельний цех, в якому експлуатується реконструйований котел, відноситься до категорії «Г» по вибухо- та пожежонебезпечності. Територія навколо котла обладнана засобами пожежогасіння. Для гасіння електрообладнання встановлено пересувний вуглекислотний вогнегасник ОУ-80. Як первинні засоби пожежогасіння застосовуються ручні вуглекислотні вогнегасники ОУ-5МН і пожежні щити згідно з ГОСТ 12.4.009-83.

Категорії приміщень за вибухонебезпечністю та ступенем вогнестійкості будівель, приміщень і споруд котельного цеху наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Категорії приміщень за вибухо- та пожежною безпекою та ступенем вогнестійкості будівель, приміщень і споруд котельного цеху

| Будівлі, приміщення і споруди               | Категорія приміщень | Ступінь вогнестійкості |
|---|---------------------|------------------------|
| Котельний цех, приміщення димососів         | Г                   | II                     |
| Приміщення хімводопідготовки та деаераторна | Д                   | III                    |
| Приміщення розподільчого пристрою           | Д                   | II                     |
| Матеріальні склади                          | В                   | II                     |

Причиною пожежі можуть бути збої в роботі електрообладнання, внаслідок яких можуть виникнути: нагрівання та спалахування ізоляції кабелю, коротке замикання електропроводки. Причиною пожежі також може бути порушення правил пожежної безпеки при проведенні вогневих робіт під час експлуатації та ремонту котла.

Евакуація обслуговуючого персоналу відбувається через вхідні ворота котла і через аварійний вихід на верхній площадці котла-утилізатора.

Для запобігання вибуху барабана сепаратора котла встановлені запобіжні клапани.

Для захисту конструкції цеху від блискавки встановлюється захист третьої категорії ступеня надійності типу «А» (99,5% і вище)

Особливо небезпечним за безпекою ураження електричним струмом вважається приміщення майстерні, в якому встановлено котел, оскільки є два ознаки підвищеної безпеки:

- залізобетонні струмопровідні перекриття;
- температура повітря 303 К.

При експлуатації котла використовується електрообладнання робочою напругою 380В з ізольованою нейтраллю. Для обладнання з робочою напругою до 1000В передбачено захисне заземлення опором 4 Ом.

Крім того, безпечна робота електрообладнання забезпечується такими захисними заходами: застосуванням ізоляції, недоступністю струмоведучих частин, запобіжними блокуваннями, використанням низької напруги, ізоляцією електричних мереж від землі, компенсацією ємнісної складової до землі шляхом вирівнювання потенціалів, використання ізоляційних прокладок, захисного відключення та іншого електрообладнання.

### 3.2 Виробнича санітарія

У таблиці 3.3 наведені оптимальні значення температури, відносної вологості і швидкості повітря в робочій зоні виробничих приміщень.

Таблиця 3.3 – Оптимальні значення температури, відносної вологості та швидкості повітря в робочій зоні виробничих приміщень

| Період року          | Категорія роботи               | Температура повітря | Відносна вологість | Швидкість руху, м/сек. |
|----------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| Холодний період року | Па середнього ступеня тяжкості | 19 – 21             | 60 – 40            | 0,2                    |
|                      | Пб середнього ступеня тяжкості | 17 – 19             | 60 – 40            | 0,2                    |
| Теплий період року   | Па середнього ступеня тяжкості | 21 – 23             | 60 – 40            | 0,3                    |
|                      | Пб середнього ступеня тяжкості | 20 – 22             | 60 – 40            | 0,3                    |

Наявність теплового випромінювання, що досягає  $400 \text{ Вт/м}^2$  замість допустимих  $140 \text{ Вт/м}^2$ , заповишене приміщення майстерні створює проблему, яку необхідно вирішити. Ці фактори можна пом'якшити, створивши надійну систему вентиляції.

На підприємстві доцільно використовувати змішану систему вентиляції. В якості загальної вентиляції використовується аерація.

Місцева вентиляція забезпечує вентиляцію безпосередньо на робочому місці оператора котельні і поділяється на припливну і витяжну. В якості місцевої припливної вентиляції приймаємо установку вентиляційної камери з припливним вентилятором типу ВЦ, кількість яких буде визначено в розрахунку нижче.

В якості місцевої витяжної вентиляції можуть використовуватися витяжні шафи, розташовані над джерелами тепла і шкідливих виділень.

Запропонована система вентиляції забезпечить необхідний повітрообмін у цеху.

Вентиляційні установки – це пристрої, які забезпечують у приміщенні такий стан повітряного середовища, при якому людина відчувається нормально, а мікроклімат приміщення не робить негативного впливу на її здоров'я.

Для забезпечення необхідної якості повітря за санітарними нормами необхідно постійно міняти повітря в приміщенні; замість того, що видаляється, вводиться свіже повітря.

У цьому підрозділі буде зроблений розрахунок загальнообмінної вентиляції від надлишку тепла.

Кількість вентиляційного повітря визначається по формулі

$$V_{\text{вент}} = \frac{3600 \cdot Q_{\text{надл}}}{C \cdot \rho \cdot (t_{\text{вид}} - t_{\text{пр}})},$$

де  $Q_{\text{надл}}$  - виділення в приміщенні явного тепла, Вт;

$C$  - теплоємність повітря ( $C=1 \text{ кДж/ м}^3\text{К}$ );

$\rho$  - густина повітря ( $\rho = 1.12 \text{ кг/м}^3$ )

$t_{\text{вид}}$  и  $t_{\text{пр}}$  - температура видаленого та припливного повітря,  $^{\circ}\text{C}$

Температура повітря, що видаляється, визначається з формули

$$t_{\text{вид}} = t_{\text{рз}} + d \cdot (h - 2)$$

де  $t_{\text{рз}}$  - температура повітря в робочій зоні ( $t_{\text{рз}}=30^{\circ}\text{C}$ );

$d$  - коефіцієнт наростання температури на кожен метр висоти ( $d=1.5^{\circ}\text{C/м}$ );

$h$  - висота приміщення ( $h=14$  м).

Звідки 
$$t_{\text{вид}} = 30 + 1,5 \cdot (14 - 2) = 48^{\circ}\text{C}$$

Кількість надлишкового тепла визначається з теплового балансу, як різниця між теплом, що поступає в приміщення і теплом, що видаляється з приміщення і поглинається в ньому.

$$Q_{\text{надл}} = Q_{\text{прих}} - Q_{\text{вид}}$$

Тепло, що поступає в приміщення визначається з формули:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{обор}} + Q_{\text{л}} + Q_{\text{осв}} + Q_{\text{рад}},$$

де  $Q_{\text{обор}}$  - тепло від роботи устаткування, що поступає в зовнішнє довкілля;

$Q_{\text{л}}$  – тепло від людей;

$Q_{\text{осв}}$  - тепло від джерела освітлення;

$Q_{\text{рад}}$  - тепло від сонячної радіації через вікна.

$$Q_{\text{обор}} = \nu \cdot P_{\text{уст}} = 0.02 \cdot 22180000 = 443600 \text{ Вт},$$

де  $\nu$  - доля енергії, яка переходить в тепло;

$P_{\text{уст}}$  – потужність установки.

$$Q_{\text{л}} = n \cdot q = 3 \cdot 90 = 270 \text{ Вт},$$

де  $n$  – кількість людей в залі ( $n=3$ );

$q$  – кількість тепла від однієї людини ( $q=90$  Вт).

$$Q_{\text{осв}} = \mu P_{\text{осв}} = 0.4 \cdot 2000 = 800 \text{ Вт},$$

де  $\mu = 0.4$  для люмінесцентних ламп;

$P_{\text{осв}}$  – потужність установки, що освітлює.

$$Q_{\text{рад}} = A \cdot k \cdot S \cdot m = 127 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 0.8 = 914,4 \text{ Вт},$$

де  $A$  – вступ тепла в приміщення з 1 кв.м скла (127-234 Вт/м );

$S$  - площа вікна ( $S=3$  м );

$m$  - кількість вікон ( $m=3$ );

$k$  - коефіцієнт, що враховує характер скління ( $k=0.8$ ).

З формули отримуємо

$$Q_{\text{прих}} = 443600 + 270 + 800 + 914,4 = 445584,4 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{расх}} = 0.1 \cdot Q_{\text{прих}} = 0,1 \cdot 445584,4 = 44558,4 \text{ Вт}$$

Звідки

$$Q_{\text{надл}} = 445584,4 - 44558,4 = 401026 \text{ Вт}.$$

Знаходимо необхідний повітрообмін, м<sup>3</sup>/год

$$V_{\text{вент}} = \frac{3600 \cdot 401026}{1000 \cdot 1,12 \cdot (48 - 20)} = 46036,14$$

Визначаємо необхідну кратність повітрообміну

$$K = \frac{V_{\text{вент}}}{V_{\text{пр}}}$$

де  $V_{\text{пр}}$  – площа приміщення

$$V_{\text{пр}} = a \cdot b \cdot h, \text{ м}^3$$

де  $a$  (довжина приміщення)=12м;

$b$  (ширина приміщення)=10м;

$h$  (висота приміщення)=14м

$$V_{\text{пр}} = 12 \cdot 10 \cdot 14 = 1680 \text{ м}^3$$

Кратність повітрообміну

$$K = \frac{46036,14}{1680} = 27,4$$

Робимо підбір вентилятора по аеродинамічним характеристикам і спеціальним номограмам, складеним на основі стендових випробувань різних видів вентиляторів.

Вихідними даними для вибору вентилятора є:

- розрахункова продуктивність вентилятора,  $\text{м}^3 / \text{год}$ :

$$V_{\text{розр}} = 1.1 \cdot V_{\text{вент}} = 1.1 \cdot 46036,14 = 50639,754$$

де 1.1 - коефіцієнт, що враховує витоки і підсоси повітря.

За вихідними даними вибираємо відцентровий вентилятор низького тиску ВЦ4-75 №12,5. По номограмах визначаємо його характеристики:

- число обертів - 1000 об/хв;

- ККД вентилятора - 0.8.

Необхідна встановлена потужність електродвигуна, Вт:

$$N = \frac{V_{pac} \cdot H_{\epsilon}}{3600 \cdot \epsilon} = \frac{50639,754 \cdot 406}{3600 \cdot 0,8} = 7138,8$$

де  $\epsilon$  - ККД вентилятора.

Для досягнення необхідного рівня освітлення цеху згідно [6] *разд.VIII* необхідно поєднувати природне і штучне освітлення.

Природне освітлення здійснюється збоку - через отвори в зовнішніх стінах приміщення з обох сторін. Характеристика зорової роботи – середня точність. Розряд наочної роботи – IV. Коефіцієнт природного освітлення, %

$$KEO=1,15$$

Для штучного освітлення ми використовуємо освітлювальні прилади: лампи розжарювання та газорозрядні лампи. Для покращення освітлення безпосередньо на робочих місцях ми встановлюємо світильники непрямого освітлення «Lucent».

Економічними і вигідними з гігієнічної точки зору є газорозрядні люмінесцентні лампи низького тиску, а саме люмінесцентні лампи (ЛД) і люмінесцентні лампи з поліпшеною передачею кольору (КЛ).

На випадок аварії передбачається аварійне освітлення (10% від робочого), яке має автономне джерело живлення. У проходах аварійне освітлення 0,5-1 лк.

Дані про освітленість приміщень котельного цеху наведені в таблиці 3.3.



Таблиця 3.3 – Освітленість окремих приміщень і виробничих зон ТЕС

| Приміщення, виробнича площа                                  | Площина нормування освітленості та її висота від підлоги, кв. | Освітленість, люкс при освітленні |               |
|--|---|-----------------------------------|---------------|
|  |   | Комбінований                      | Загальний наз |
| Місця обслуговування котелень                                | Вертикальний на топках  | 100                               | 100           |
| Майданчики та сходи котлів, економайзери, проходи за котлами | Поверх<br>Горизонтальний,<br>0,8                              | ---                               | 10            |
| Приміщення для димососів і вентиляторів.                     | Поверх  | ---                               | 100           |
| Хімводопідготовка, деаератор, котельня                       | Горизонтальний,<br>0,8  | ---                               | 100           |
| Приміщення для вентиляційного обладнання                     | Так само  | ---                               | 20            |
| Бювет, теплові пункти  | вертикальний,<br>на пристроях                                 | ---                               | 75            |
| Шкали вимірювального приладу                                 |   | 300-750                           | 150-300       |

## ВИСНОВКИ

Проведені розрахунки (теплові, аеродинамічні) показали, що котел-утилізатор може працювати з паропродуктивністю  $D = 7,68$  кг/с (27,6 т/год) із заданими параметрами перегрітої пари, не вимагаючи зміни конструкції корпусу котла.

У процесі теплових розрахунків довжини котушок і їх кількість в упаковці були збільшені шляхом зміни поздовжнього і поперечного кроків. Для зручності обслуговування поверхонь нагріву пропонується розділити економайзер на три послідовно з'єднаних пакета.

Виходячи з аеродинамічного розрахунку, можна зробити висновок, що зі збільшенням кількості котушок в пакетах зростає аеродинамічний опір. Димосос Д-18 тип 0,7-37 не забезпечить роботу теплообмінника котла з необхідною кількістю продуктів згоряння. Для забезпечення надійної роботи котла-утилізатора обрано одновсмоктувальний відцентровий димосос ДН-21МГМ типу 0,55-40-1.

Реалізація запропонованих у дипломному проекті технічних рішень з реконструкції котла-утилізатора №1 КК №2 ТЕЦ дозволить збільшити річний обсяг виробництва теплової енергії з 1787555 ГДж до 1864810 ГДж.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Мальшин, В.М. Металлургия титана [Текст] / В.М. Мальшин. – М.: Металлургия, 1991. – 208 с.
2. Козловский, Ф.Н. Путь к титану [Текст] / Ф.Н. Козловский. – Днепропетровск : Промінь, 1976. – 120 с.
3. Сергеев, В.В. Металлургия титана [Текст] / В.В. Сергеев. – М.: Металлургия, 1964. – 210 с.
4. Струнский, Б.М. Руднотермические плавильные печи [Текст] / Б.М. Струнский. - М.: Металлургия, 1978. – 368 с.
5. Алиев, Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справочник [Текст] / Г.М. Алиев. – М.: Металлургия, 1986. – 543 с.
6. Гордон, Г.М. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии [Текст] / Г.М. Гордон. - М.: Металлургия, 1977. – 457 с.
7. Старк, С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве [Текст] / С.Б. Старк. - М.: Металлургия, 1990. – 400 с.
8. Русанов, А.А. Справочник по пыли – и золоулавливаю [Текст] / А.А. Русанов. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
9. Гордон, Г.М. Контроль пылеулавливающих установок [Текст] / Г.М. Гордон. - М.: Металлургия, 1973. – 384 с.
10. Муравьев, С.И. Руководство по контролю вредных веществ в воздухе рабочей зоны [Текст] / С.И. Муравьев. – М.: Химия, 1991. – 368 с.
11. Пейсахов, И.Л. Пылеулавливание и очистка газов [Текст] / И.Л. Пейсахов. - М.: Металлургия, 1978. – 292 с.
12. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов от пыли [Текст] / В.Н. Ужов. – М.: Химия, 1983. – 392 с.
13. Гордон, Г.М. Сборник научных трудов по пылеулавливаю и очистке газов в цветной металлургии №24 [Текст] / Г.М. Гордон. - М.: Металлургия, 1985. – 137 с.
14. Сборник материалов по пылеулавливаю в цветной металлургии [Текст]. – М.: Металлургия, 1987. – 472 с.

15. Научные труды государственного научно-исследовательского института цветных металлов №36 под ред. Гордона Г.М [Текст]. - М.: Metallurgy, 1987. – 179 с.
16. Коузов, П.А. Методы определения физико-химических свойств промышленных газов [Текст] / П.А. Коузов. - М.: Химия, 1983. – 143 с.
17. Страус, В.М. Промышленная очистка газов [Текст] / В.М. Страус. - М.: Химия, 1981. – 615 с.
18. Алиев, Г.М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок [Текст] / Г.М. Алиев. - М.: Metallurgy, 1989. – 279 с.
19. Юдашкин, М.Я. Механическое оборудование установок очистки газов [Текст] / М.Я. Юдашкин. - М.: Metallurgy, 1988. – 375 с.
20. Мягков, Б.И. Очистка промышленных газов фильтрацией [Текст] / Б.И. Мягков. - М.: Химия, 1984. – 320 с.
21. Газоочистные аппараты сухого и мокрого типов. Каталог [Текст]. - М.: Цинтихимнефтемаш, 1984. – 95 с.
22. Каплан, В.Г. Промышленная и санитарная очистка газов [Текст] / В.Г. Каплан. - М.: Metallurgy, 1982. – 171 с.
23. Моргулис, М.Л. Рукавные фильтры [Текст] / М.Л. Моргулис. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
24. Андоньев, С.М. Пылегазовые выбросы в цветной металлургии [Текст] / С.М. Андоньев. - М.: Metallurgy, 1989. – 192 с.
25. Алексеенко, Б.А. Оборудование и эксплуатация пылеулавливающих установок [Текст] / Б.А. Алексеенко. - М.: Metallurgy, 1990. – 79 с.
26. Горячев, И.К. Фильтры рукавные – современные тенденции и новые области применения [Текст] / И.К. Горячев. - М.: Цинтихимнефтемаш, 1991. – 45 с.
27. Пирумов, А.И. Обеспыливание газов [Текст] / А.И. Пирумов. - М.: Стройиздат, 1987. – 158 с.
28. Гурвица, А.А. Пылеулавливание в металлургии [Текст] / А.А. Гурвица. - М.: Metallurgy, 1988. – 335 с.

29. Розенгарт, Ю.А. Теплоэнергетика металлургических заводов [Текст] / Ю.А. Розенгарт. - М.: Металлургия, 1985. – 305 с.
30. Кропц, Л.И. Очистка технологических и неорганизованных выбросов от пыли в металлургии [Текст] / Л.И. Кропц. - М.: Металлургия, 1989. – 279 с.
31. Шаприцкий, В.И. Защита атмосферы в металлургии [Текст] / В.И. Шаприцкий. - М.: Металлургия, 1987. – 285 с.
32. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы [Текст] / В.П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
33. Каненко, Г.М. Исследования некоторых работы труб Вентурри по высокоэффективной очистке газов [Текст] / Г.М. Каненко. - М.: Химия, 1974. – 48 с.
34. Кузнецов, И.Е. Защита атмосферного воздуха от загрязнений [Текст] / И.Е. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1991. – 198 с.
35. Пейсахов, И.Л. Атлас диаграмм и номограмм по пылегазовой технике [Текст] / И.Л. Пейсахов. - М.: Металлургия, 1981. – 185 с.
36. Вальдберг, А.Ю. Подготовка промышленных газов к очистке [Текст] / А.Ю. Вальдберг. - М.: Химия, 1983. – 216 с.
37. Справочник химика [Текст]. - М.: Химия, 1989. – 438 с.
38. Андреев, П.И. Рассеяние в воздухе газов, выбрасываемых промышленными предприятиями [Текст] / П.И. Андреев. - М.: Стройиздат, 1972. – 165 с.
39. Болдырев, Т.Е. Очистка промышленных выбросов в атмосферу [Текст] / Т.Е. Болдырев. - М.: Металлургия, 1985. – 385 с.
40. Аникеев, В.А. Технологические аспекты охраны окружающей среды [Текст] / В.А. Аникеев. - М.: Химия, 1987. – 256 с.
41. Рыбинский, А.Г. Современное аппаратное оформление процессов очистки и охлаждения газов [Текст] / А.Г. Рыбинский. - М.: Энергия, 1995. – 287 с.
42. Белоусов, В.В. Теоретические основы процессов газоочистки [Текст] / В.В. Белоусов. - М.: Металлургия, 1989. – 255 с.
43. Богатых, С.А. Циклонно-пенные аппараты [Текст] / С.А. Богатых. - М.: Металлургия, 1985. – 245 с.

44. Денисов, С.И. Улавливание и утилизация пылей и газов [Текст] / С.И. Денисов. - М.: Metallurgy, 1987. – 357 с.
45. Кузнецов, И.Е. Оборудование для санитарной очистки газов [Текст] / И.Е. Кузнецов. - М.: Химия, 1988. – 352 с.
46. Алабовский, А.Н. Газоснабжение и очистка промышленных газов [Текст] / А.Н. Алабовский. - М.: Metallurgy, 1984. – 387 с.