

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

**КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ**

**Кваліфікаційна робота**  
**перший бакалаврський**  
(рівень вищої освіти)

на тему Проект реконструкції котельної установки типу «Бабкок-Вількокс»  
для використання природного газу Українського родовища

Виконав: студент 5 курсу, групи ТЕ-17-1бз  
спеціальності 144 «Теплоенергетика»

і назва спеціальності)

освітньої програми Теплоенергетика

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації

\_\_\_\_\_ (код і назва спеціалізації)

М.О.Біленко

(підпис, ініціали та прізвище)

Керівник: доцент кафедри теплоенергетики  
та гідроенергетики, к.т.н.

С.В.Ільїн

(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент: доктор технічних наук, професор

А.О.Чейлитко

(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя  
2022

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

Кафедра Теплоенергетики та гідроенергетики

Рівень вищої освіти перший бакалаврський

Спеціальність 144 «Теплоенергетика»

(код та назва)

Освітня програма Теплоенергетика

(код та назва)

Спеціалізація

\_\_\_\_\_ (код та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ (Ц)**

Біленко Максим Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Проект реконструкції котельної установки типу «Бабкок-Вількокс» для використання природного газу Українського родовища

керівник роботи:

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

доцент кафедри теплоенергетики та гідроенергетики, к.т.н. Ільїн С.В.

затвержені наказом ЗНУ від «17» січня 2022 року №91-с

2 Строк подання студентом роботи 1 травня 2022 року

3 Вихідні дані до роботи: джерело теплопостачання – парова котельня, на якій встановлено паровий котел «Бабкок-Вількокс»; вид палива – переведення котла зі спалювання твердого палива на спалювання природного газу, збільшення паропродуктивності котла до 11,11кг/с, система теплопостачання – відкрита, параметри тепломережі 130 - 70°C, Теплові навантаження котельні на опалення і вентиляцію 0,163 ГДж/с; на гаряче водопостачання 0,0233 ГДж/с; на технологію 0,04 ГДж/с; параметри котла: продуктивність – 0,058 ГДж/с, паливо газ, мазут, температура вихідних газів - 250°C, ККД при навантаженні 60% - 92.3%, ККД при максимальному навантаженні – 87.8%; Циркуляція води у

системі теплопостачання здійснюється мережевими насосами типу 14Д – 6; В якості рециркуляційних насосів прийняті насоси НКУ - 250; підживлюючі насоси типу НКУ – 250.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1 Аналіз об'єкта дослідження. 2 Розрахунки палива 3 Визначення об'ємів повітря і продуктів згоряння. 4 Підрахунок ентальпій. 5 Конструктивний розрахунок топки котла. 6 Теплові розрахунки та висновок.

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

## 1 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Загальний розділ	С.В.Ільїн, доцент кафедри теплоенергетики та гідроенергетики		
Спеціальний розділ	С.В.Ільїн, доцент кафедри теплоенергетики та гідроенергетики		

<sup>2</sup> Дата видачі завдання 12 квітня 2022 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз об'єкта дослідження	12.04.2022-18.04.2022	
2	Розрахунки палива	19.04.2022-24.04.2022	
3	Визначення об'ємів повітря і продуктів згоряння.	25.04.2022-27.04.2022	
4	Підрахунок ентальпій	28.04.2022-02.05.2022	
5	Конструктивний розрахунок топки котла	3.05.2022-06.05.2022	
6	Теплові розрахунки	07.05.2022-17.05.2022	
7	Висновок	18.05.2022-20.05.2022	

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

М.О.Біленко

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) \_\_\_\_\_

(підпис)

С.В.Ільїн

(ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер \_\_\_\_\_

(підпис)

А.О.Чейлитко

(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

КОТЕЛЬНЯ, КОТЕЛ, ПРИРОДНИЙ ГАЗ, ПАРОПЕРЕГРІВАЧ, ЕКОНОМАЙЗЕР, ПРОДУКТИ ЗГОРЯННЯ, ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК, ЕФЕКТИВНІСТЬ

Пояснювальна записка до дипломної роботи на тему «Проект реконструкції котельної установки типу «Бабкок-Вількокс» для використання природного газу Українського родовища» містить: 67 сторінок, 2 таблиці, 23 джерела використаної літератури.

Об'єкт дослідження – джерело тепlopостачання – парова котельня, на якій встановлено паровий котел «Бабкок-Вількокс».

Мета роботи – реконструкція парового котла «Бабкок-Вількокс» на паровій котельні.

Метод дослідження - метод фізичного моделювання для вивчення параметрів парового котла в залежності зміни його режиму роботи.

Реконструкція котла передбачає збільшення паропродуктивності котла до 11,11 кг/с.

Реконструкція котла дозволить не тільки підвищити ефективність роботи котла, але й знизити собівартість виробленої котлом пара.

## ЗМІСТ

### ВСТУП

## 1 ХАРАКТЕРИСТИКА КОТЕЛЬНОГО ЦЕХУ І ЙОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1 Характеристики котельні підприємства

1.2 Водогрійна частина котельної

1.3 Котельний агрегат

1.4 Парова частина котельної

## 2 РОЗРАХУНОК КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТИПУ «БАБКOK- ВІЛЬКОКС»

2.1 Класифікація котелень

2.2 Розрахунки палива, визначення об'ємів повітря і продуктів згоряння, підрахунок ентальпій

2.3 Об'єм повітря і продуктів згоряння палива

2.4 Ентальпії повітря і продуктів згоряння

2.5 Тепловий баланс котельні установки і визначення витрати палива

2.6 Конструктивний розрахунок топки котла

2.7 Геометричні характеристики топки

2.8 Тепловий розрахунок фестона

2.9 Тепловий розрахунок першої частини кипятильного пучка

2.10 Тепловий розрахунок пароперегрівача

2.11 Тепловий розрахунок другої частини кипятильного пучка

2.12 Тепловий розрахунок економайзера

2.13 Уточнення теплового балансу

### ВИСНОВКИ

### ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

## ВСТУП

Реконструкція парового котла «Бабкок-Вількокс» включає в себе переведення котла зі спалювання твердого палива на спалювання природного газу та збільшення паропроодуктивності до 11,11 кг/с.

Рішення поставлених завдань потребує глибокої реконструкції котла, яка полягає в наступному:

- повністю розбирається обмурування котла: демонтуються – топкова гарнітура, газові перегородки, арматура, ланцюгові решітки, тракт вуглеподачі, подові пальники і газопроводи в межах котла, екрани, трубопроводи у межах котла;
- задня стіна топки відповідно відділяється, з фронту споруджується виносний передтопок, а під топки розміщується безпосередньо на залізобетонному фундаменті котла;
- об'єм топкової камери збільшується. У топці збільшеного об'єму розміщуються: два бічних, фронтний, задній екрани;
- величина продувки знизиться з 10% до 3% . З цією метою передбачається установка бічних екранів, що включаються в виносні циклони, що утворюють сольові відсіки ступеневого випаровування;
- реконструюється котел обладнується газомазутними пальниками;
- діаметр барабана котла «Бабкок-Вількокс» дорівнює 1700 мм. Це дозволяє частину екранів – фронтний і задній – ввести безпосередньо в барабан котла;
- внутрішньобарабанний сепараційний пристрій, у зв'язку з різким підвищенням продуктивності котла, демонтується і замінюється новим;
- котел обладнується пароперегрівачем, що забезпечує перегрів пари до 230 °С і, утворюючим хвостову поверхню нагріву, гладкотрубним економайзером;

- існуючі димосос і вентилятор демонтуються, і на їх місці, після відповідної реконструкції фундаментів, встановлюється нове обладнання.

## 1 ХАРАКТЕРИСТИКА КОТЕЛЬНОГО ЦЕХУ І ЙОГО ОБЛАДНАННЯ

### 1.1 Характеристики котельні підприємства

Котельня підприємства пароводогрійна. В котельні встановлено 3 водогрійних котла ПТВМ-50 і 4 модернізованих парових котла “БабкокВилькокс”.

Система теплопостачання -відкрита, параметри тепломережі 130 – 70°C.

Теплові навантаження котельні на опалення і вентиляцію  $0,163 \frac{\text{ГДж}}{\text{с}}$ ; на гаряче водопостачання  $0,0233 \frac{\text{ГДж}}{\text{с}}$ ; на технологію  $0,04 \frac{\text{ГДж}}{\text{с}}$ .

Для технологічних потреб необхідна пара тиском 0,5 МПа і температурою 230 °С. Повернення конденсату від технологічних споживачів 50 %.

Перегріта пара тиском 0,8 МПа і температурою 230°C з котлів надходить у дві редуційні установки продуктивністю  $11,11 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$  кожна, в яких редукується до 0,5 МПа, далі пара надходить на виробництво. Пар на мазутне господарство і підігрівачі надходить не редукований. Для деаерації надходить пара з тиском 0,16 МПа. Конденсат надходить безпосередньо в деаератори, або в конденсатні баки, розташовані в котельні. Конденсат, який повертається від технологічних споживачів і надходить у конденсатні баки, змішується з хімічноочищеною водою, а потім конденсатними насосами подається в деаераторні баки.

У схемі на лінії безперервної продувки котлів передбачені сепаратори безперервної продувки. В сепараторах за рахунок зниження тиску до 0,06 МПа частково виділяється пар, а також знижується температура води з 194 °С до 112 °С. Конденсат з сепаратора, пройшовши через підігрівач хімічноочищеної води, що подається в барбатер і далі в каналізацію. Пара, що виділяється з сепаратора, йде на деаерацію живильної води.

### 1.2 Водогрійна частина котельної

Навантаження водогрійної частини котельні на опалення, вентиляцію і гаряче водопостачання складає  $0,163 \frac{\text{ГДж}}{\text{с}}$ .

Існуюча котельня (3 котла ПТВМ – 50) забезпечує навантаження  $0,175 \frac{\text{ГДж}}{\text{с}}$ .

Параметр тепломережі 130-70 °С, напір в подаючому трубопроводі 0,6МПа, в зворотному -0,28 МПа

### 1.3 Котельний агрегат

Котельний агрегат Дорогобузького котельного заводу ПТВМ – 50 має баштове компонування і виведений в загальну димову трубу.

Характеристики котла:

- продуктивність  $-0,058 \frac{\text{ГДж}}{\text{с}}$  ;
- паливо - газ, мазут;
- температура вихідних газів - 250 °С;
- ККД при навантаженні 60 % - 92,3 % ;
- ККД при максимальному навантаженні - 87,8 %.

Циркуляція води у системі теплопостачання здійснюється мережевими насосами типу 14Д – 6.

Характеристики мережевих насосів:

- продуктивність  $(850 \dots 1700) \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ ;
- напір  $(137 \dots 100)$  м. вод. ст.

В якості рециркуляційних насосів прийняті насоси типу НКУ – 250.

Характеристики рециркуляційних насосів:

- продуктивність  $250 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ ;
- напір 32 м. вод. ст.

Підживлюючі насоси типу НКУ – 250.



Характеристики рециркуляційних насосів:

- продуктивність  $250 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$  ;
- напір 32 м. в. ст.

Деаерація підживлювальної води відбувається в термічних атмосферних деаераторах типу ДСА – 150 у кількості двох штук, з деаераторними баками ємністю  $35 \text{ м}^3$  кожний. Деаератор комплектується деаераторною колонкою типу ДСА – 150, барботажним пристроєм ДСА – 150/50, охолоджувачем випару ОВА – 16 і гідрозатворів.

Деаератори підживлювальної води розташовуються на покрівлі котельні. З деаераторних баків підживлююча вода може подаватися або безпосередньо на всмоктування підживлювальних насосів, або в два бакаакумулятора. Підживлюючими насосами вода, з баків-акумуляторів або деаераторних баків, подається у зворотний трубопровід тепломережі, на всмоктування мережевих насосів.

Трубопроводи водогрійної котельні запроектовані у відповідності з «Правилами пристроїв і безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води».

Тепловій ізоляції підлягають деаераторні колонки і баки, бакиакумулятори гарячої води, все обладнання і трубопроводи з температурою на поверхні не вище  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  при розташуванні як в приміщенні, так і на відкритому повітрі. Ізоляційні конструкції включають в себе основний теплоізоляційний шар, армуючі і кріпильні матеріали, покривний шар та зовнішню обробку поверхні ізоляції.

#### 1.4 Парова частина котельної

Навантаження парової частини котельні на технологічні потреби ( пар тиском  $0,5 \text{ МПа}$ , з температурою  $230 \text{ }^\circ\text{C}$  ) складає  $17,78 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ .

Крім технологічних потреб, пара використовується на власні потреби котельні:

- на деаераційну установку  $4 \text{ } 61 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$  ;
- на мазутне господарство  $0,56 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$  ; - на підігрів вихідної води у ХВО  $3,11 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$  ;

- втрати  $0,47 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ .

Загальна витрата пари становить  $29,56 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ .

Існуючі котли «Бабкок-Вилькокс» реконструйовані і продуктивність доведена до  $11,11 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$  при роботі на газі та  $8,33 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$  при роботі на мазуті. Таким чином, паропроductивність котельні задовольняє заданим витратам пари. Повернення конденсату від технологічних споживачів становить 50 % тобто  $8,89 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ , повернення конденсату від підігрівачів -100 %.

Котельний агрегат «Бабкок-Вилькокс» після реконструкції має паропроductивність  $11,11 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$  і температуру перегрітого пару 230 °С.

Котел комплектується димососом типу Д – 135 та дутьєвим вентилятором ВД – 12,5.

Деаерування живильної води проводиться у двох термічних атмосферних деаераторах типу ДСА – 100, встановлених на покрівлі ХВО. Деаератори комплектуються деаераторними колонками, барботажним пристроєм типу ДСА – 100/50, охолоджувачем випара - ОВА – 8 та гідрозатвором. Із деаераційних баків живильні насоси типу 4МСГ – 10Х4 подають воду у котли.

У приміщенні конденсатного господарства на позначці 5,2 м встановлено два циліндричних конденсатних бака ємністю  $35 \text{ м}^3$  та  $7,5 \text{ м}^3$ , сполучені між собою як сполучені судини. На баку ємністю  $7,5 \text{ м}^3$  встановлена деаераційна колонка типу ДСА – 10, в яку подається хімоочищена вода для охолодження випару.

Конденсатні насоси типу ЗК-6а перекачують конденсат в деаераційну установку живильної води.

Для відкачування дренажних вод передбачені два насоси, один з яких резервний.

Безперервна продувка здійснюється в сепаратор безперервної продувки типу ОСТ 24.838.11. Проектом передбачено дренаж всіх трубопроводів і обладнання, а також встановлення повітряників. Всі дренажні трубопроводи виводяться з котельні в продувний колодязь.

Трубопроводи котельні прокладені, в основному, уздовж стін і колон на індивідуальних опорах і підвісках. Монтаж трубопроводів і арматури проведений у відповідності з проектом і «Правилами пристроїв і безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води».

Хімоводоочистка розташована у прибудові котельні. Продуктивність

ХВО -  $305,15 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ , у тому числі:

- на підживлення тепломережі  $232,3 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ ;
- на живлення парових котлів  $72,85 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ .

Схема водопідготовки двохступінчаста. У приміщенні ХВО розташовуються фільтри, насоси, обладнання для регенерації та промивки; бакове господарство для регенераційного розчину солі і баки промивної води. Склад мокрогрозного зберігання солі — окремо стоячий, доставка солі - залізничним транспортом. Ємність складу -  $260 \text{ м}^3$ , забезпечує добовий запас і добовий резерв. Перекачування міцного розчину солі в бак-дозатор здійснюється насосами типу ЭСН – 2/1.

Джерело водопостачання - господарсько-питний водопровід. Насоси сирової води типу 8К – 12а - 3шт. Перша ступінь — натрій-катіонування застосовується для всієї води, що надходить на ХВО, тобто для водогрійної та парової частин котельні. Продуктивність першого ступеня ХВО -  $305,15 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ . Друга щабель - хлор-іонування, застосовується для обробки води, яка надходить після першого ступеня для живлення парових котлів.

Продуктивність -  $72,85 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ .

Кількість регенерацій фільтрів першого ступеня – 2 і в добу, кількість регенерацій фільтрів другого ступеня — 0,5 регенерацій в добу. Витрата технічної солі на регенерацію фільтрів першого ступеня -  $3680 \frac{\text{кг}}{\text{доб}}$ .

Кількість одночасно регенованих фільтрів - 1. Витрата технічної солі на регенерацію фільтрів другого ступеня -  $208 \frac{\text{кг}}{\text{доб}}$ .

Залишкова жорсткість води після першої ступені -0,1 мг – екв./л, після другої ступені -0,02 мг – екв./л, що відповідає нормі.

Димова труба встановлена за котельною. Підключення зовнішніх металевих газоходів до труби виконано з таким розрахунком, щоб кількість димових газів, що надходять від котлів з двох сторін в трубу, було приблизно однаковим.

Для водогрійних котлів встановлені димососи типу Д – 18Х2.

Димососи встановлені поза будівлею котельні. Газоходи і підземні борова від парових котлів мають запобіжні вибухові клапани.

Газопостачання котельні здійснюється від існуючих ГРП, що знаходяться на території підприємства.

Для водогрійної частини котельні потрібно витрата газу рівна

$20100 \frac{\text{нм}^3}{\text{год}}$ . Для парової частини -  $11400 \frac{\text{нм}^3}{\text{год}}$ . В ГРП для водогрійних котлів встановлено регулятор РДУК – 28 – 200/140, який забезпечує необхідну пропускну спроможність. Для парової частини котельні встановлено регулятор РДУК – 2Н – 200/140, який також забезпечує необхідну пропускну здатність.

## РОЗРАХУНОК КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТИПУ «БАБКОК-ВІЛЬКОКС»

### 2.1 Класифікація котелень

Залежно від характеру теплових навантажень районні котельні і котельні підприємств поділяються на:

- промислові, які використовуються для технологічного постачання паром або гарячою водою промислових підприємств;
- опалювальні, призначені для забезпечення опалення, вентиляції та гарячого водопостачання;

- промислово-опалювальні, які застосовуються для технологічного теплопостачання та постачання теплотою систем опалення, вентиляції та гарячого водопостачання промислових підприємств, житлових і громадських будівель.

Квартальні та групові котельні, як правило, опалювальні.

Котельні всіх типів класифікуються за такими ознаками:

- за типом використовуваних котлів (парові; водогрійні;

пароводогрійні - з паровими і водогрійними котлами);

- за видом спалюваного палива (котельні, що працюють на газоподібному, рідкому або твердому паливі);

- за виглядом теплоносія і схеми відпустки теплоти (котельні, які виробляють пар з поверненням або без повернення конденсату; котельні, які відпускають теплоту гарячої води при закритій або відкритій системі теплопостачання; котельні, які відпускають пар і теплоту гарячої води по перерахованих схемах в їх різних поєднаннях);

- за способом розміщення на генеральному плані (вбудовані, прибудовані, відокремлені)

- по технологічній структурі (блочні, неблочні);

- щодо компонування обладнання (закриті, напіввідкриті і

відкриті);

- по режиму роботи (базові районні; пікові, які працюють спільно з ТЕЦ).

2.2 Розрахунки палива, визначення об'ємів повітря і продуктів згорання, підрахунок ентальпій

Паливом є природний газ з теплотою згорання,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_H^c = 33,763.$$

Склад сухого газу в об'ємних відсотках, %:

$$CH_4 = 95,598;$$

$$C_2H_6 = 2,079;$$

$$C_3H_8 = 0,46;$$

$$O_2 = 0,009;$$

$$N_2 = 1,458;$$

$$CO_2 = 0,18.$$

Так само в паливі міститься 0,172% неграничних вуглеводнів.

Прийmemo їх складеними з етилену ( $C_2H_4$ )[1,стр.10].

Вологовміст газу,  $\frac{г}{м^3}$

$$d = 10.$$

### 2.3 Об'єм повітря і продуктів згоряння палива

Об'єм повітря, теоретично необхідного для повного згоряння палива,

$\frac{м^3}{м^3}$

$$\begin{aligned}
 V_B^0 &= 0,0476 \cdot \left[ 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n - O_2 \right] = \\
 &= 0,0476 \cdot \left[ \begin{aligned} &\left( 1 + \frac{4}{4} \right) \cdot 95,598 + \left( 2 + \frac{6}{4} \right) \cdot 2,079 + \\ &+ \left( 3 + \frac{8}{4} \right) \cdot 0,46 + \left( 2 + \frac{4}{4} \right) \cdot 0,172 - 0,009 \end{aligned} \right] = 9,58.
 \end{aligned}$$

Об'єм продуктів згоряння, що утворюються при горінні палива з

теоретичним об'ємом повітря,  $\frac{3}{\text{м}^3}$ :

- трьохатомних газів

$$\begin{aligned}
 V_{RO_2} &= 0,01 \cdot \left[ CO_2 + CO + H_2S + \sum m \cdot C_m H_n \right] = \\
 &= 0,01 \cdot [0,18 + 95,598 + 2 \cdot 2,079 + 3 \cdot 0,46 + 2 \cdot 0,172] = 1,0166;
 \end{aligned}$$

- азоту

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_d^0 + \frac{N_2}{100} = 0,79 \cdot 9,58 + \frac{1,458}{100} = 7,5827;$$

- водяних парів

$$\begin{aligned}
 V_{H_2O}^0 &= 0,01 \cdot \left[ H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + 0,124 \cdot d \right] + 0,0161 \cdot V_d^0 = \\
 &= 0,01 \cdot [2 \cdot 95,598 + 3 \cdot 2,079 + 4 \cdot 0,46 + 2 \cdot 0,172 + 0,124 \cdot 10] + \\
 &\quad + 0,0161 \cdot 9,58 = 2,163.
 \end{aligned}$$

Об'єм водяної пари в продуктах згоряння при горінні палива з надлишком повітря підраховується за формулою,  $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha_{\text{сп}} - 1) \cdot V_B^0.$$

Об'єм продуктів згоряння при горінні палива з надлишком повітря підраховується за формулою,  $\frac{м^3}{м^3}$

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha_{cp} - 1) \cdot V_B^0.$$

Чисельні значення об'ємів водяних парів та газоподібних продуктів згоряння, підрахованих за наведеними формулами; об'ємні частки трехатомних газів і водяних парів, обчислені як відношення наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1- Об'ємні характеристики продуктів згоряння в поверхнях нагріву

Найменування величин і розрахункові формули	Газоходи котельної установки			
	Топка, фестони	Пароперегрівач	Кипятильний пучок	Економайзер
Коефіцієнт надлишку повітря за поверхнею нагріву $\alpha$	1,1	1,13	1,13	1,21
Середній коефіцієнт надлишку повітря в поверхні нагріву $\alpha_{cp}$	1,1	1,115	1,13	1,17
Об'єм водяної пари в продуктах горіння, $\frac{м^3}{м^3}$ $V_{H_2O}^H \square V_{H_2O}^0 \square 0,0161 \square \alpha \square \alpha_{cp} \square 1 \square V_B^0$	2,178	2,18	2,183	2,189
Повний об'єм продуктів згоряння, $\frac{м^3}{м^3}$ $V_{\Gamma} \square V_{RO_2} \square V_{N_2} \square V_{H_2O} \square \alpha \square \alpha_{cp} \square 1 \square V_B^0$	11,735	11,881	12,028	12,8
Об'ємна частка водяних парів $V_{H_2O}$ $\frac{V_{H_2O}}{V_{\Gamma}}$	0,186	0,183	0,181	0,171



	$V_2$			
Об'ємна частка трьохатомних газів	$r_{H_2O} \square \frac{V}{V_2} \square \frac{RO_2}{V_2}$	0,087	0,086	0,085
			0,085	0,079

Приймаємо надлишок повітря в кінці топки [1]

$$\alpha_T = 1,1.$$

Приймаємо присоси повітря в газоходи [1]:

- в газохід фестона  $\Delta\alpha_\phi = 0;$
- в газохід кип'ятельного пучка (1-ша частина)  $\Delta\alpha_{к.п.1} = 0;$
- в газохід пароперегрівача  $\Delta\alpha_{пп} = 0,03;$
- в газохід кип'ятельного пучка (2-га частина)  $\Delta\alpha_{к.п} = 0;$  - в газохід економайзера  $\Delta\alpha_{эк} = 0,08.$

Підраховуємо надлишки повітря по газоходам:

- за газоходом фестонів і кип'ятельного пучка  $\alpha''_{\phi,к.п} = 1,1;$
- за газоходом пароперегрівача  $\alpha''_{пп} = 1,13;$
- за газоходом кип'ятельного пучка  $\alpha''_{к.п} = 1,13;$  - за газоходом економайзера (в вихідних газах)  $\alpha''_{эк} = 1,21.$

Числові значення величин у табл.3.1 підраховані по середнім величинам надлишків повітря, знайденим як середнє арифметичне

$$\alpha_{cp} = \frac{\alpha' + \alpha''}{2}$$

#### 2.4 Ентальпії повітря і продуктів згоряння

Ентальпії повітря, необхідного для теоретичного процесу горіння, розраховуються за формулою,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I_B^0 = V_B^0 \cdot (c \cdot \vartheta)_B.$$

Ентальпії продуктів згорання, що утворюються при горінні палива з теоретичним об'ємом повітря, розраховуються за формулою,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I_{\Gamma}^0 = V_{RO_2} \cdot (c \cdot \vartheta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 \cdot (c \cdot \vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot (c \cdot \vartheta)_{H_2O}.$$

У розрахунках питома ентальпія трьохатомних газів взята рівною ентальпії вуглекислоти.

Ентальпії продуктів згорання при горінні палива з надлишком повітря підраховуються за формулою,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1) \cdot I_B^0.$$

Числові значення підрахованих величин в інтервалі температур від 100 °С до 1800 °С, зводимо в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2- Залежність ентальпії повітря і продуктів згорання від температури

$t, ^\circ\text{C}$	Ентальпії продуктів згорання, що утворюються при горінні палива з теоретичним об'ємом повітря, розраховуються за формулою $I_{\Gamma 0},$ $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$	Ентальпії повітря, необхідного для теоретичного процесу горіння $I_{B0},$ $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$	Ентальпії продуктів згорання при горінні палива з надлишком повітря $I_{\Gamma} = I_{\Gamma 0} + (\alpha - 1) \cdot I_{B0},$ $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$		
			$\alpha_m = 1,1$	$\alpha_{nn} = 1,13$	$\alpha_{\text{ЭК}} = 1,21$

	<i>m</i>				
100	1,484	1,268			1,75
200	2,996	2,552			3,532
300	4,544	3,862			5,355
400	6,138	5,194			
500	7,773	6,559		8,626	
600	9,438	7,956		10,472	
700	11,150	9,392	12,089	12,371	
800	12,917	10,838	14,001	14,326	
900	14,720	12,283	15,948	16,317	
1000	16,554	13,768	17,931		
1100	18,393	15,293	19,922		
1200	20,245	16,819	21,927		
1300	22,147	18,344	23,981		
1400	24,085	19,910	26,076		
1500	26,009	21,475	28,157		
1600	27,965	23,04	30,269		
1700	29,934	24,606	32,283		
1800	31,913	26,171	34,230		

## 2.5 Тепловий баланс котельні установки і визначення витрати палива

Нижча теплота згоряння палива,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_{\text{н}}^{\text{с}} = 33,763.$$

Підігрів палива не передбачений, тому фізичне тепло палива дорівнює нулю,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$i_{\text{ТЛ}} = 0.$$

Температура холодного повітря, °С

$$t_{\text{х.п.}} = 30.$$

Ентальпія холодного повітря,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I_{\text{х.в.}}^{\circ} = 0,37362.$$

Знаходиться тепло одиниці маси робочого палива,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_{\text{р}}^{\text{р}} = Q_{\text{н}}^{\text{с}} = 33,763.$$

Приймаємо втрату теплоти від механічного недопалу, %

$$q_4 = 0.$$

Приймаємо втрату теплоти від хімічного недопалу, %

$$q_3 = 0,5.$$

Приймаємо температуру вихідних газів, °С

$$\vartheta_{\text{ух}} = 180.$$

Ентальпія продуктів згоряння при  $\vartheta_{\text{ух}} = 180^{\circ}\text{С}$ ,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I_{yx} = 3,1756.$$

Коефіцієнт надлишку повітря у відхідних газах

$$\alpha_{yx} = 1,21.$$

Втрати теплоти з відхідними газами, %

$$q_2 = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} \cdot I_{xв}^o)}{Q_p^p} \cdot (100 - q_4) = \frac{(3175,6 - 1,21 \cdot 373,62)}{33,763 \cdot 10^3} \cdot 100 = 8.$$

Втрати теплоти в навколишнє середовище, %

$$q_5 = 1,1.$$

Сума теплових втрат, %

$$\sum q_{\text{пот}} = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 8 + 0,5 + 0 + 1,1 = 9,6.$$

Коефіцієнт корисної дії котельної установки, %

$$\eta_{к.у} = 100 - \sum q_{\text{пот}} = 100 - 9,6 = 90,4.$$

Ентальпія перегрітої пари при  $P = 0,8 \text{ МПа}$  и  $t = 230 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

$$h_{\text{пп}} = 2910.$$

Ентальпія живильної води при  $P_{\text{в}} = 1,1 \cdot P_0 = 1,1 \cdot 0,84 = 0,924 \text{ МПа}$

та  $t_{\text{п.в}} = 100^\circ\text{C}$ ,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

$$h_{п.в} = 419,6.$$

Витрата котлової води на продувку,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

$$D_{\text{пр}} = \frac{p_{\text{пр}}}{100} \cdot D = \frac{3}{100} \cdot 11,11 = 0,33.$$

Ентальпія котлової води при тиску в барабані при  $P_6 = 0,84 \text{ МПа} (t_{\text{кип}} = 172,45), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

$$h_{\text{к.в}} = 729,8.$$

Тепло, що використовується в котельній установці корисно, МВт

$$\begin{aligned} Q_{\text{к.у}} &= D \cdot (h_{\text{пп}} - h_{\text{п.в}}) + D_{\text{пр}} \cdot (h_{\text{к.в}} - h_{\text{п.в}}) = \\ &= 11,11 \cdot (2910 - 419,6) + 0,33 \cdot (729,8 - 419,6) = 27,771. \end{aligned}$$

Фактична витрата палива в котельній установці,  $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$

$$B = \frac{Q_{\text{к.у}} \cdot 100}{Q_{\text{р}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к.у}}} = \frac{27,771 \cdot 100}{33,763 \cdot 90,4} = 0,897.$$

Розрахункова витрата палива,  $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$

$$B_{\text{р}} = B \cdot \frac{100 - q_4}{100} = 0,897 \cdot \frac{100 - 0}{100} = 0,897.$$

## 2.6 Конструктивний розрахунок топки котла

Приймаємо значення теплової напруги об'єму топки [1, табл. XX],

МВт

$$q_v = 0,405.$$

По допустимій теплонарузі знаходимо об'єм топкової камери, м<sup>3</sup>

$$V_T = \frac{B_p \cdot Q_H^p}{q_v} = \frac{0,897 \cdot 33,763}{0,405} = 75.$$

Приймаємо значення температури продуктів згоряння на виході з топки, °С

$$\vartheta_T'' = 1267,5.$$

Ентальпія продуктів згоряння при цій температурі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$

$$I_T'' = 23,213.$$

Приймаємо ефективну товщину випромінюючого газового шару, м

$$S = 2,63.$$

Приймаємо значення параметра, що визначає місце розташування максимуму температур [2,стр.10]

$$M = 0,48.$$

Приймаємо середнє значення коефіцієнта теплової ефективності

$$\eta_{cp} = 0,6134.$$

Коефіцієнт надлишку повітря в топці

$$\alpha_T = 1,1.$$

Приймаємо присос повітря в топку

$$\Delta\alpha_T = 0,05.$$

Температура холодного повітря, °С

$$t_{x.B} = 30.$$

Ентальпія холодного повітря,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I_{x.B}^0 = 373,62.$$

Кількість теплоти, що вноситься з повітрям в топку,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_B = \Delta\alpha_T \cdot I_{x.B} = 0,05 \cdot 0,37362 = 0,0188.$$

Корисне тепловиділення в топці,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_T = Q_p^p \cdot \frac{100 - q_3 - q_4}{100 - q_4} + Q_B = 33,763 \cdot \frac{100 - 0,5 - 0}{100 - 0} + 0,0188 = 33,68.$$

Теоретична температура горіння, відповідна корисному тепловиділенню в топці, °С

$$\vartheta_a = 1761,6.$$



Використовуючи значення  $\vartheta_T^{\text{в}}$ ,  $\vartheta_a$ ,  $\psi_{\text{ср}}$  визначаємо відношення  $\frac{B_p \cdot Q_T}{F_{\text{ст}}}$ ,

$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

$$\frac{B_p \cdot Q_T}{F_{\text{ст}}} = 0,293.$$

Повна поверхня стін топки, м

$$F_{\text{ст}} = \frac{B_p \cdot Q_T}{0,293} = \frac{0,897 \cdot 33,68 \cdot 10^6}{0,293} = 102,248.$$

Коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta_{\text{к.у}} + q_5}.$$

Об'ємна частка водяних парів

$$r_{H_2O} = 0,186.$$

Об'ємна частка трьохатомних газів

$$r_{RO_2} = 0,087.$$

Тиск продуктів згоряння в топці, МПа

$$p = 0,1.$$

Сумарний парціальний тиск газів, МПа

$$p_{\Pi} = 0,1 \cdot (0,186 + 0,087) = 0,0273.$$

Коефіцієнт ослаблення променів трьохатомними газами,  $\frac{1}{\text{м}\cdot\text{МПа}}$

$$\begin{aligned} k_{\Gamma} &= \left( \frac{0,78 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{0,316 \cdot \sqrt{p_{\Pi} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\Gamma}''}{1000} \right) = \\ &= \left( \frac{0,78 + 1,6 \cdot 0,186}{0,316 \cdot \sqrt{0,0273 \cdot 2,63}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1540,5}{1000} \right) = 5,25. \end{aligned}$$

Коефіцієнт ослаблення променів частиною полум'я, що не світиться що складається з трьохатомних газів,  $\frac{1}{\text{м}\cdot\text{МПа}}$

$$k_{\text{н.с}} = r_{\Pi} \cdot k_{\Gamma} = 0,273 \cdot 5,23 = 1,43.$$

Коефіцієнт ослаблення променів частиною полум'я, що світиться,  $\frac{1}{\text{м}\cdot\text{МПа}}$

$$k_{\text{св}} = k_{\text{н.с}} + k_{\text{сажи}} = 1,43 + 1,53 = 2,96.$$

Ступінь чорноти частиною факела, що світиться і не світиться

$$\begin{aligned} a_{\text{св}} &= 1 - e^{-k_{\text{св}} \cdot p \cdot S} = 1 - 2,72^{-2,96 \cdot 0,1 \cdot 2,63} = 0,541, \\ a_{\Gamma} &= 1 - e^{-k_{\text{н.с}} \cdot p \cdot S} = 1 - 2,72^{-1,43 \cdot 0,1 \cdot 2,63} = 0,314. \end{aligned}$$

Ефективна ступінь чорноти факела

$$a_{\Phi} = m \cdot a_{\text{св}} + (1 - m) \cdot a_{\Gamma} = 0,1 \cdot 0,541 + (1 - 0,1) \cdot 0,314 = 0,337,$$

де  $m$ - коефіцієнт, що вибирається в залежності від виду спалюваного палива (для газу дорівнює 0,1).

Ступінь чорноти топки

$$a_T = \frac{a_\phi}{a_\phi + (1 - a_\phi) \cdot \psi_{cp}} = \frac{0,337}{0,337 + (1 - 0,337) \cdot 0,6134} = 0,453.$$

Кількість теплоти, переданого в топці променистим теплообміном,

$\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_{\text{Л}}^T = \varphi \cdot (Q_T - I_T^{\text{в}}) = 0,99 \cdot (33,68 - 23,213) = 10,362.$$

Середня сумарна теплоємність продуктів згоряння в інтервалі температур от  $\vartheta_T^{\text{в}}$  до  $\vartheta_a$ ,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$V_{c_{cp}} = \frac{Q_T - I_T^{\text{в}}}{\vartheta_a - \vartheta_T^{\text{в}}} = \frac{33,68 - 23,213}{1761,6 - 1267,5} = 21,02.$$

Визначаємо площу стін зайнятих екранами,  $\text{м}^2$

$$F_{\text{ст}} = \frac{\left(0,6 \sqrt{\frac{T_a - 1}{T_T^{\text{в}}}}\right) \cdot \varphi \cdot B_p \cdot V_{c_{cp}}}{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot a_T \cdot \psi_{cp} \cdot T_a^3} = \frac{\left(0,6 \sqrt{\frac{2034,6 - 1}{1540,5}}\right) \cdot 0,99 \cdot 0,897 \cdot 21,02}{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 0,453 \cdot 0,6134 \cdot 2034,6^3} = 68,615$$

Визначаємо кутовий коефіцієнт топкових екранів

$$\chi = \frac{H_{\text{луч}}}{F_{\text{ст}}} = \frac{54,924}{68,615} = 0,8.$$

Приймаємо відстань труб від площин стін, м

$$l_3 = 50.$$

Приймаємо діаметр труб екранів, мм

$$d = 51 \times 2,5.$$

Визначаємо відносний крок труб екранів топки [1, ном.1]

$$\frac{S}{d} = 1,57.$$

Знаходимо крок труб екранів топки, мм

$$S = d \cdot 1,57 = 51 \cdot 1,57 = 80.$$

## 2.7 Геометричні характеристики топки

Ширина призматичної частини топки, мм

$$a_{\text{пр}} = 3000.$$

Глибина топки, мм:

- у верхній частині  $b_1 = 3630;$

- у нижній частині  $b_2 = 4650.$

Висота топки (відстань від поду топки до середини фестонів), мм

$$H_T = 6300.$$

Кут нахилу фестонів, град

$$\alpha_{\text{ф}} = 30.$$

Довжина площини, що проходить через перший ряд фестонів в межах між заднім і фронтним екранами, мм

$$l_{\text{ф}} = 3600.$$

Довжина труб бокового екрану у фронтівій стіні, мм

$$l'_{6.э} = 5760.$$

Довжина труб бокового екрану у задній стіні, мм

$$l''_{6.э} = 4880.$$

Кут нахилу предтопку, град

$$\alpha_{п} = 45.$$

Довжина вертикальних частин фронтowego екрана, мм

$$h'_{\phi} = 1200;$$

$$h''_{\phi} = 1160.$$

Довжина похилої частини фронтowego екрана, мм

$$h_{\phi.э} = 1400.$$

Довжина заднього екрану, мм

$$h_3 = 5080.$$

Відстань крайніх труб фронтowego екрана від площин бічних екранів,

мм

$$m_{\phi} = 420.$$

Відстань крайньої труби заднього екрана від бічних площин екранів,

мм

$$m_3 = 100.$$

Число труб у задньому екрані, шт.

$$n_3 = 36.$$

Число труб у фронтальному екрані, шт.

$$n_\phi = 28.$$

Відстань крайньої труби бокового екрану від площини фронтального екрана,

мм:

- у верхній частині  $n'_\phi = 210;$

- у нижній частині  $n''_\phi = 1170$

Відстань крайньої труби бокового екрану від площини заднього екрану, мм

$$n_3 = 60.$$

Число труб у кожному з бокових екранів, шт.

$$n_6 = 42.$$

Ширина кожного із бічних екранів, мм

$$b_{6.3} = 3360.$$

Ширина фронтального екрану, мм

$$b_{\text{ф.э}} = 2160.$$

Ширина заднього екрану, мм

$$b_{\text{з.э}} = 2800.$$

Площа поверхонь, що обмежують активний об'єм топки, м<sup>2</sup>:

- по задній стіні

$$\begin{aligned} F_{\text{з.с}} &= (h_{\text{з}} - h_{\text{к}} - h) \cdot a + 0,5 \cdot (a_{\text{к}} + a'_{\text{к}}) \cdot h_{\text{к}} + a'_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}} + 0,5 \cdot (a'_{\text{к}} + a''_{\text{к}}) \cdot h_{\text{к}} = \\ &= \left( (5080 - 620 - 140) \cdot 3000 + 0,5 \cdot (2620 + 2300) \cdot 620 + 2300 \cdot 280 + \right. \\ &\quad \left. + 0,5 \cdot (2300 + 1000) \cdot 520 \right) \cdot 10^{-6} = 15,987; \end{aligned}$$

- площа поверхні, що проходить через перший ряд фестонів

$$F_{\text{фест.}} = l_{\text{ф}} \cdot a = (3600 \cdot 3000) \cdot 10^{-6} = 10,8.$$

Повна поверхня стін топки, м<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} F_{\text{ст.}}^{\text{общ}} &= F_{\text{з.с}} + F_{\text{ф.с}} + 2 \cdot F_{\text{б.с}} + F_{\text{фест.}} = \\ &= 15,987 + 23,247 + 2 \cdot 26,107 + 10,8 = 102,248. \end{aligned}$$

Активний об'єм топки становить, м<sup>2</sup>

$$V_{\text{T}} = F_{\text{пр}} \cdot a + F_{\text{кон}} \cdot b_{\text{ср}} = (22351000 \cdot 3000 + 1781600 \cdot 4093,3) \cdot 10^{-9} = 75,$$

$$\text{де } b_{\text{ср}} = \frac{b' + b'' + b'''}{3} = 4093,3 \text{ мм.}$$

Площа поверхонь стін топки, на яких розміщені відкриті екрани, м<sup>2</sup>

$$\begin{aligned}
 F_{\text{ЭК}} &= F_{\text{ЭК}}^{\Phi} + F_{\text{ЭК}}^{\text{З}} + 2 \cdot F_{\text{ЭК}}^{\text{БОК}} = (h'_{\Phi} + h_{\Phi\text{Н}} + h''_{\Phi}) \cdot b_{\Phi,\text{Э}} + ((h_{\text{З}} - h_{\text{К}} - h) \cdot b_{\text{З},\text{Э}}) + \\
 &+ (0,5 \cdot (a_{\text{К}} + a'_{\text{К}}) \cdot h'_{\text{К}} + h \cdot a'_{\text{К}}) + 2 \cdot (0,5 \cdot (l'_{\text{Б},\text{Э}} + l''_{\text{Б},\text{Э}}) + b_{\text{Б},\text{Э}}) = ( (1200 + 1400 + 1160) \cdot 2160 + \\
 &+ ((5080 - 620 - 140) \cdot 2800) + (0,5 \cdot (2620 + 2300) \cdot 620 + 140 \cdot 2300) + \\
 &+ 2 \cdot (0,5 \cdot (5760 + 4880) \cdot 3360) ) \cdot 10^{-6} = 57,815.
 \end{aligned}$$

Коефіцієнт забруднення проміння сприймаючих поверхонь [2, стор.39]

$$\zeta = 0,65.$$

Кутовий коефіцієнт фронтового, заднього та бокових екранів

$$\chi = 0,8.$$

Кутовий коефіцієнт площини, що проходить через перший ряд фестонів [1, стр.23]

$$\chi_{\Phi} = 1.$$

Коефіцієнт теплової ефективності фронтового, заднього та бокових екранів

$$\psi = \chi \cdot \zeta = 0,8 \cdot 0,65 = 0,52.$$

Коефіцієнт теплової ефективності площини, що проходить через перший ряд труб фестонів

$$\psi_{\Phi} = \chi_{\Phi} \cdot \zeta = 0,65 \cdot 1 = 0,65.$$

Сумарна ефективна проміннясприймаюча поверхня топки, м<sup>2</sup>

$$\begin{aligned}
 \sum \psi \cdot F_{\text{ЭК}} &= \psi \cdot (F_{\text{ЭК}}^{\Phi} + F_{\text{ЭК}}^{\text{З}} + 2 \cdot F_{\text{ЭК}}^{\text{БОК}}) + \psi_{\Phi} F_{\text{фест}} = \\
 &= 0,52 \cdot (8,1216 + 13,9432 + 35,7504) + 0,65 \cdot 10,8 = 42,086.
 \end{aligned}$$



Середнє значення коефіцієнта теплової ефективності екранів

$$\psi_{\text{ср}} = \frac{\sum \psi \cdot F_{\text{ст}}}{F_{\text{ЭК}}^{\Phi} + F_{\text{ЭК}}^{\text{З}} + 2 \cdot F_{\text{фест}}^{\text{бок}} + F_{\text{фест}}} = \frac{42,086}{8,1216 + 13,9432 + 35,7504 + 10,8} = 0,6134.$$

Ефективна товщина випромінюючого шару, м

$$S = 3,6 \cdot \frac{V_{\text{T}}}{F_{\text{ст}}} = 3,6 \cdot \frac{75}{102,248} = 2,63.$$

Так як значення  $\psi_{\text{ср}}$  та  $S$  збігаються з раніше прийнятими, конструктивний розрахунок топкової камери вважаємо закінченим.

## 2.8 Тепловий розрахунок фестона

Зовнішній діаметр труб, мм

$$d = 51 \times 2,5.$$

Кількість рядів труб, шт.

$$z = 2.$$

Число труб у кожному ряді, шт.

$$\begin{aligned} n_1 &= 18, \\ n_2 &= 18. \end{aligned}$$

Довжина труб у кожному ряді, мм

$$\begin{aligned} l_1 &= 3640, \\ l_2 &= 3600. \end{aligned}$$

Поздовжній крок труб, мм

$$S_1 = 80.$$

Поперечний крок труб, мм

$$S_2 = 160.$$

Відносний поздовжній крок

$$\frac{S_1}{d} = \frac{80}{51} = 3,14.$$

Відносний поперечний крок

$$\frac{S_2}{d} = \frac{160}{51} = 1,57.$$

Поверхня нагріву пучка, м<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} H_{к.п} &= \pi \cdot d \cdot l_1 \cdot n_1 + \pi \cdot d \cdot l_2 \cdot n_2 = \\ &= 3,14 \cdot 0,051 \cdot 3,64 \cdot 18 + 3,14 \cdot 0,051 \cdot 3,6 \cdot 18 = 16,815. \end{aligned}$$

Ефективна товщина випромінюючого газового шару, м

$$S = 0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2}{\pi \cdot d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,051 \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,08 \cdot 0,16}{3,14 \cdot 0,051^2} - 1 \right) = 0,314.$$

Температура газів на вході у фестон, °С

$$\vartheta'_\phi = 1267,5.$$

Ентальпія продуктів згоряння при цій температурі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I'_{\phi} = 23,213.$$

Приймаємо температуру продуктів згоряння на виході з фестону, °C

$$\vartheta''_{\phi} = 1210,6.$$

Ентальпія продуктів згоряння при цій температурі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I''_{\phi} = 22,145.$$

Коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi = 0,99.$$

Теплосприйняття фестонів,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_a = \varphi \cdot (I'_{\phi} - I''_{\phi}) = 0,99 \cdot (23,213 - 22,145) = 1,157.$$

Середня температура продуктів згоряння, °C

$$\vartheta_{\phi} = 0,5 \cdot (\vartheta'_{\phi} + \vartheta''_{\phi}) = 0,5 \cdot (1267,5 + 1210,6) = 1239,05.$$

Температура води при тиску в барабані, °C

$$t_{\text{кип}} = 172,45.$$

Середній температурний напір, °C

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\phi} - \Delta t_M}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_{\phi}}{\Delta t_M}} = \frac{(1267,5 - 172,45) - (1210,6 - 172,45)}{2,3 \cdot \lg \frac{1267,5 - 172,45}{1210,6 - 172,45}} = 1067,5.$$

Об'єм продуктів згоряння при надлишку повітря в фестони,  $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$

$$V_{\Gamma} = 11,735.$$

Середня швидкість продуктів згоряння,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$

$$W_{\Gamma} = B_p \cdot V_{\Gamma} \cdot \left( \frac{273 + \vartheta_{\phi}}{273 \cdot F_{\phi}} \right) = 0,897 \cdot 11,735 \cdot \left( \frac{273 + 1239,05}{273 \cdot 8,18} \right) = 7,1.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\begin{aligned} \alpha_k &= c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left( \frac{W_{\Gamma} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} = \\ &= 0,36 \cdot 1 \cdot \frac{13,13 \cdot 10^{-5}}{0,051} \cdot \left( \frac{7,1 \cdot 0,051}{224,6 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,55^{0,33} = 63. \end{aligned}$$

Теплофізичні параметри  $\lambda$ ,  $\gamma$ ,  $\text{Pr}$  знаходимо в залежності від середньої температури в фестоні  $\vartheta_{\phi}$  [2, табл. 9].

Об'ємна частка водяних парів і сумарна частка трьохатомних газів

$$\begin{aligned} r_{H_2O} &= 0,186, \\ r_{\Pi} &= 0,273. \end{aligned}$$

Оптична щільність газового потоку,  $\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$

$$\begin{aligned}\tau_{r,\phi} &= \kappa_r \cdot p_{\Pi} \cdot S = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\Pi} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\phi}}{1000} \right) \cdot p_{\Pi} \cdot S = \\ &= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0273 \cdot 0,314}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,37 \cdot 1,5125) \cdot 0,0273 \cdot 0,314 = 0,134.\end{aligned}$$

Ступінь чорноти газового потоку

$$a_{r,\phi} = 1 - e^{-\tau_{r,\phi}} = 1 - 2,72^{-0,134} = 0,125.$$

Температура забрудненої стінки труби, °C

$$t_3 = t_{\text{кип}} + 25 = 172,45 + 25 = 197,45.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{л}} &= \frac{5,13 \cdot 10^{-11} \cdot a_{r,\phi} \cdot T_{\phi}^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T_3}{T_{\phi}} \right)^{3,6} \right]}{\left( 1 - \frac{T_3}{T_{\phi}} \right)} = \\ &= \frac{5,13 \cdot 10^{-11} \cdot 0,125 \cdot 1512,05^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{470,45}{1512,05} \right)^{3,6} \right]}{\left( 1 - \frac{470,45}{1512,05} \right)} = 32.\end{aligned}$$

Коефіцієнт використання поверхні нагріву

$$\zeta = 1.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\alpha_1 = \zeta \cdot (\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}) = 1 \cdot (63 + 32) = 95.$$

Приймаємо коефіцієнт теплової ефективності

$$\psi = 0,6.$$

Коефіцієнт теплопередачі,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,6 \cdot 95 = 57.$$

Теплосприйняття поверхні нагріву за умовами теплопередачі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_{\text{т.ф}} = \frac{k \cdot H_{\text{ф}} \cdot \Delta t}{B_{\text{р}}} \cdot 10^{-6} = \frac{57 \cdot 16,815 \cdot 1067,5}{0,897} \cdot 10^{-6} = 1,15.$$

Розрахунок нев'язки сприйнятої теплоти, %

$$\Delta q = \frac{Q_{\text{ф}} - Q_{\text{т.ф}}}{Q_{\text{ф}}} \cdot 100\% = \frac{1,157 - 1,5}{1,157} \cdot 100\% = -0,6.$$

Так як нев'язка не перевищує 2%, розрахунок фєстонів закїнчено.

## 2.9 Тепловий розрахунок першої частини кипятильного пучка

Зовнїшнїй дїаметр труб, мм

$$d = 102 \times 3,5.$$

Кїлькїсть рядїв труб, шт.

$$z = 8.$$

Число труб в кожному ряду, шт.

$$n = 14.$$

Довжина труб у кожному ряду, мм

$$l = 3600.$$

Поздовжній крок труб, мм

$$S_1 = 152.$$

Поперечний крок труб, мм

$$S_2 = 190.$$

Відносний поздовжній крок

$$\frac{S_1}{d} = \frac{152}{102} = 1,49.$$

Відносний поперечний крок

$$\frac{S_2}{d} = \frac{190}{102} = 1,86.$$

Поверхня нагріву пучка, м<sup>2</sup>

$$H_{к.п} = \pi \cdot d \cdot l \cdot n \cdot z = 3,14 \cdot 0,102 \cdot 3,6 \cdot 14 \cdot 8 = 129,137.$$

Живий перетин для проходу газу, м<sup>2</sup>

$$F_{к.п} = a \cdot l - n \cdot l \cdot d = 3,1 \cdot 3,6 - 14 \cdot 3,6 \cdot 0,102 = 6,019.$$

Ефективна товщина випромінюючого газового шару, м

$$S = 0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2}{\pi \cdot d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,102 \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,152 \cdot 0,19}{3,14 \cdot 0,102^2} - 1 \right) = 0,233.$$

Температура газів на вході в котельний пучок, °С

$$\vartheta'_{к.п} = 1210,6.$$

Ентальпія продуктів згорання при цій температурі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I'_{к.п} = 22,145.$$

Приймаємо температуру продуктів згорання на виході з кипятильного пучка, °С

$$\vartheta''_{к.п} = 922,6.$$

Ентальпія продуктів згорання при цій температурі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I''_{к.п} = 16,396.$$

Коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi = 0,99.$$

Теплосприйняття котельного пучка,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_{к.п} = \varphi \cdot (I'_{к.п} - I''_{к.п}) = 0,99 \cdot (22,145 - 16,396) = 5,7.$$

Середня температура продуктів згорання, °С



$$\vartheta_{\text{к.п}} = 0,5 \cdot (\vartheta'_{\text{к.п}} + \vartheta''_{\text{к.п}}) = 0,5 \cdot (1210,6 + 922,6) = 1066,6.$$

Температура води при тиску в барабані, °С

$$t_{\text{кип}} = 172,45.$$

Середній температурний напір, °С

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{(1210,6 - 172,45) - (922,6 - 172,45)}{2,3 \cdot \lg \frac{1210,6 - 172,45}{922,6 - 172,45}} = 887,3.$$

Об'єм продуктів згорання при надлишку повітря в кипятильному пучку,  $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$

$$V_{\Gamma} = 11,735.$$

Середня швидкість продуктів згорання,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$

$$W_{\Gamma} = V_p \cdot V_{\Gamma} \cdot \left( \frac{273 + \vartheta_{\text{к.п}}}{273 \cdot F_{\text{к.п}}} \right) = 0,897 \cdot 11,735 \cdot \left( \frac{273 + 1066,6}{273 \cdot 6,019} \right) = 8,63.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{к}} &= c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left( \frac{W_{\Gamma} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} = \\ &= 0,343 \cdot 1 \cdot \frac{11,65 \cdot 10^{-5}}{0,102} \cdot \left( \frac{8,63 \cdot 0,102}{187 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,57^{0,33} = 53,1. \end{aligned}$$

Теплофізичні параметри  $\lambda$ ,  $\gamma$ ,  $Pr$  знаходимо в залежності від середньої температури у фестоні  $\vartheta_{к.п}$  [2, табл. 9].

Об'ємна частка водяних парів і сумарна частка трьохатомних газів

$$\begin{aligned} r_{H_2O} &= 0,186, \\ r_{п} &= 0,273. \end{aligned}$$

Оптична щільність газового потоку,  $\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$

$$\begin{aligned} \tau_{г.ф} &= \kappa_{г} \cdot p_{п} \cdot S = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{п} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{к.п}}{1000} \right) \cdot p_{п} \cdot S = \\ &= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,186}{3,16 \cdot \sqrt{0,0273 \cdot 0,233}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,37 \cdot 1,3396) \cdot 0,0273 \cdot 0,233 = 0,113. \end{aligned}$$

Ступінь чорноти газового потоку

$$a_{г.ф} = 1 - e^{-\tau_{г.ф}} = 1 - 2,72^{-0,113} = 0,107.$$

Температура забрудненої стінки труби, °С

$$t_3 = t_{кип} + 25 = 172,45 + 25 = 197,45.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\begin{aligned} \alpha_{л} &= \frac{5,13 \cdot 10^{-11} \cdot a_{г.ф} \cdot T_{к.п}^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T_3}{T_{к.п}} \right)^{3,6} \right]}{\left( 1 - \frac{T_3}{T_{к.п}} \right)} = \\ &= \frac{5,13 \cdot 10^{-11} \cdot 0,107 \cdot 1339,6^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{470,45}{1339,6} \right)^{3,6} \right]}{\left( 1 - \frac{470,45}{1339,6} \right)} = 20,7. \end{aligned}$$

Коефіцієнт використання поверхні нагріву

$$\zeta = 1.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\alpha_1 = \zeta \cdot (\alpha_k + \alpha_l) = 1 \cdot (53,1 + 20,7) = 73,8.$$

Приймаємо коефіцієнт теплової ефективності

$$\psi = 0,6.$$

Коефіцієнт теплопередачі,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,6 \cdot 73,8 = 44,28.$$

Теплосприйняття поверхні нагріву за умовами теплопередачі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_{\text{т.к.п}} = \frac{k \cdot H_{\text{к.п}} \cdot \Delta t}{B_p} \cdot 10^{-6} = \frac{44,28 \cdot 129,137 \cdot 887,3}{0,897} \cdot 10^{-6} = 5,74.$$

Розрахунок нев'язки сприйнятої теплоти, %

$$\Delta q = \frac{Q_{\text{к.п}} - Q_{\text{т.к.п}}}{Q_{\text{к.п}}} \cdot 100\% = \frac{5,7 - 5,74}{5,7} \cdot 100\% = -0,7.$$

Так як нев'язка не перевищує 2%, розрахунок першій частині кипятильного пучка закінчено.

## 2.10 Тепловий розрахунок пароперегрівача

Приймаємо діаметр труб, що широко застосовується в котлах, мм

$$d = 38 \times 3.$$

Приймаємо кроки труб [1, стор.74], мм

- поперечний  $S_1 = 100;$

- поздовжній  $S_2 = 75.$

Витрата пари,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

$$D = 11,11.$$

Тиск в барабані, МПа

$$P_6 = 0,84.$$

Температура насичення при тиску в барабані, °С

$$t_H = 172,45.$$

Ентальпія сухої насиченої пари при цій температурі,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

$$h'' = 2770,3.$$

Приймаємо швидкість середовища в трубах [3, стр.62],  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$

$$w_{\Pi} = 35.$$

Тиск перегрітої пари, МПа

$$P_{\text{пп}} = 0,8.$$

Необхідна температура перегрітої пари, °С

$$t_{\text{пп}} = 230.$$

Ентальпія перегрітої пари,  
 $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

$$h_{\text{пп}} = 2910.$$

Середня температура середовища, °С

$$t_{\text{ср}} = \frac{172,45 + 230}{2} = 201,225.$$

Питомий об'єм пари,  $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

$$v = 0,2.$$

Живий перетин для проходу пара, м<sup>2</sup>

$$f = \frac{v \cdot D}{w_{\text{п}}} = \frac{0,2 \cdot 11,11}{35} = 0,0612.$$

Необхідна кількість змієвиків, шт.

$$z = \frac{f}{0,785 \cdot d_{\text{вн}}^2} = \frac{0,0612}{0,785 \cdot 0,032^2} = 76.$$

Теплота, сприйнята парою в пароперегрівачі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$

$$Q_{\text{пп}} = \frac{D}{B_p} \cdot (h_{\text{пп}} - h'') = \frac{11,11}{0,897} \cdot (2910 - 2770,3) = 1,744.$$

Температура продуктів згорання на вході в пароперегрівач, °С

$$\vartheta'_{\text{пп}} = 922,6.$$

Ентальпія газів при цій температурі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I'_{\text{пп}} = 16,396.$$

Присос повітря в газохід пароперегрівача

$$\Delta\alpha_{\text{пп}} = 0,03.$$

Ентальпія продуктів згорання на виході з пароперегрівача,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$\begin{aligned} I''_{\text{пп}} &= I'_{\text{пп}} - \frac{Q_{\text{пп}}}{\varphi} + \Delta\alpha_{\text{пп}} \cdot I_{\text{х.в}}^{\circ} = \\ &= 16,396 - \frac{1,744}{0,99} + 0,03 \cdot 0,37362 = 14,6. \end{aligned}$$

Температура продуктів згорання при цій ентальпії, °С

$$\vartheta''_{\text{пп}} = 814.$$

Середня температура продуктів згорання, °С

$$\vartheta_{\text{пп}} = 0,5 \cdot (\vartheta'_{\text{пп}} + \vartheta''_{\text{пп}}) = 0,5 \cdot (922,6 + 814) = 868,3.$$

Об'єм продуктів згоряння при надлишку повітря в пароперегрівачі,  $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$

$$V_{\Gamma} = 11,881.$$

Приймаємо середню швидкість газів в пароперегрівачі,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$

$$W_{\Gamma} = 6.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{к}} &= c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left( \frac{W_{\Gamma} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} = \\ &= 0,348 \cdot 1 \cdot \frac{9,5 \cdot 10^{-5}}{0,038} \cdot \left( \frac{6 \cdot 0,038}{136,7 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,58^{0,33} = 63. \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до пару,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_{\text{BH}}} \cdot \left( \frac{W_{\text{п}} \cdot d_{\text{BH}}}{\gamma} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} = \\ &= 0,023 \cdot \frac{0,003 \cdot 10^{-2}}{0,032} \cdot \left( \frac{35 \cdot 0,032}{3,2 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} \cdot 0,96^{0,4} = 604. \end{aligned}$$

Температура забрудненої стінки труби,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_3 = t_{\text{cp}} + 25 = 201,225 + 25 = 226,225.$$

Ефективна товщина випромінюючого газового шару, м

$$S = 0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2}{\pi \cdot d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,1 \cdot 0,075}{3,14 \cdot 0,038^2} - 1 \right) =$$

$$= 0,192.$$

Об'ємна частка водяних парів і сумарна частка трьохатомних газів:

$$r_{H_2O} = 0,183,$$

$$r_{II} = 0,269.$$

Оптична щільність газового потоку,  $\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$

$$\tau_{г.ф} = \kappa_{г} \cdot p_{II} \cdot S = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{II} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{III}}{1000} \right) \cdot p_{II} \cdot S =$$

$$= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,183}{3,16 \cdot \sqrt{0,0269 \cdot 0,192}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,37 \cdot 1,1413) \cdot 0,0269 \cdot 0,192 = 0,132.$$

Ступінь чорноти газового потоку

$$a_{г.ф} = 1 - e^{-\tau_{г.ф}} = 1 - 2,72^{-0,132} = 0,124.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\alpha_{л} = \frac{5,13 \cdot 10^{-11} \cdot a_{г.ф} \cdot T_{III}^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T_{з}}{T_{III}} \right)^{3,6} \right]}{\left( 1 - \frac{T_{з}}{T_{III}} \right)} =$$

$$= \frac{5,13 \cdot 10^{-11} \cdot 0,124 \cdot 1141,3^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{499,225}{1141,3} \right)^{3,6} \right]}{\left( 1 - \frac{499,225}{1141,3} \right)} = 15,2.$$

Глибина щабля, мм



$$l_{\text{ст}} = 800.$$

Глибина газового об'єму, мм

$$l_o = 525.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням  
з урахуванням випромінювання газового об'єму,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\begin{aligned} \alpha'_l &= \alpha_l \cdot \left[ 1 + 0,3 \cdot \left( \frac{T'_{\text{пп}}}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{l_o}{l_{\text{ст}}} \right)^{0,07} \right] = \\ &= 15,2 \cdot \left[ 1 + 0,3 \cdot \left( \frac{1195,6}{1000} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{l_o}{l_{\text{ст}}} \right)^{0,07} \right] = 18,7. \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\alpha_1 = \zeta \cdot (\alpha_k + \alpha'_l) = 1 \cdot (63 + 18,7) = 81,7.$$

Приймаємо коефіцієнт теплової ефективності

$$\psi = 0,65.$$

Коефіцієнт теплопередачі,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$k = \psi \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,65 \cdot \frac{81,7 \cdot 604}{81,7 + 604} = 46,7.$$

Температурні напори на вході і на виході з пароперегрівача, °С:

$$\Delta t_{\text{б}} = \vartheta'_{\text{пп}} - t_{\text{пп}} = 922,6 - 230 = 692,6;$$

$$\Delta t_{\text{м}} = \vartheta''_{\text{пп}} - t_{\text{н}} = 814 - 172,45 = 641,55.$$

Температурний напір в пароперегрівачі, °С

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{692,6 - 641,55}{2,3 \cdot \lg \frac{692,6}{641,55}} = 667.$$

Поверхня нагріву, необхідна для перегріву пари до заданої температури, м<sup>2</sup>

$$H_{\text{пп}} = \frac{Q_{\text{пп}} \cdot B_{\text{р}}}{k \cdot \Delta t} = \frac{1,744 \cdot 10^6 \cdot 0,897}{46,7 \cdot 667} = 50.$$

Пароперегрівач складається з двох однотипних пакетів-блоків.

Число однотипних секцій, шт

$$n = 19.$$

Довжини змійовиків у секціях, мм

$$l_1 = 1170,$$

$$l_2 = 1150,$$

$$l_3 = 280.$$

Радіус згину труб, мм

$$r = 75.$$

Сумарна довжина труб однієї секції, м

$$\begin{aligned}
 l_{\text{тр}}^{\text{сек}} &= \left(\frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180}\right) \cdot 4 + \left(\frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180}\right) \cdot 2 + 4 \cdot l_1 + 4 \cdot l_2 + 2 \cdot l_3 = \\
 &= \left(\frac{3,14 \cdot 75 \cdot 90}{180}\right) \cdot 4 + \left(\frac{3,14 \cdot 75 \cdot 180}{180}\right) \cdot 2 + \\
 &\quad + 4 \cdot 1170 + 4 \cdot 1150 + 2 \cdot 280 = 10,9.
 \end{aligned}$$

Площа поверхні нагріву пароперегрівача, м<sup>2</sup>

$$H_{\text{пп}} = (\pi \cdot d \cdot l \cdot n) \cdot 2 = (3,14 \cdot 0,038 \cdot 10,9 \cdot 19) \cdot 2 = 50.$$

2.11 Тепловий розрахунок другої частини котельного пучка

Зовнішній діаметр труб, мм

$$d = 102 \times 3,5.$$

Кількість рядів труб, шт

$$z = 8.$$

Число труб у кожному ряді, шт

$$n = 14.$$

Довжина труб, мм:

- довжина труб на вході в пучок  $l' = 2200$ ;

- довжина труб на виході з пучка  $l'' = 2700$ .

Поздовжній крок труб, мм

$$S_1 = 152.$$

Поперечний крок труб, мм

$$S_2 = 190.$$

Відносний поздовжній крок

$$\frac{S_1}{d} = \frac{152}{102} = 1,49.$$

Відносний поперечний крок

$$\frac{S_2}{d} = \frac{190}{102} = 1,86.$$

Поверхня нагріву пучка, м<sup>2</sup>

$$H_{к.п} = \pi \cdot d \cdot l \cdot n \cdot z = 3,14 \cdot 0,102 \cdot 2,7 \cdot 14 \cdot 8 = 96,85.$$

Живий перетин для проходу газу, м<sup>2</sup>

$$F_{к.п} = \frac{2 \cdot F' \cdot F''}{F' + F''} = \frac{2 \cdot 3,106 \cdot 3,812}{3,106 + 3,812} = 3,42.$$

де  $F'$  - живий перетин на вході, м<sup>2</sup>

$$F' = l' \cdot a - n \cdot l' \cdot d = 2,2 \cdot 2,84 - 14 \cdot 2,2 \cdot 0,102 = 3,106;$$

$F''$  - живий перетин на вході, м<sup>2</sup>

$$F'' = l'' \cdot a - n \cdot l'' \cdot d = 2,7 \cdot 2,84 - 14 \cdot 2,7 \cdot 0,102 = 3,812.$$

Ефективна товщина випромінюючого газового шару, м

$$S = 0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2}{\pi \cdot d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,102 \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,152 \cdot 0,19}{3,14 \cdot 0,102^2} - 1 \right) = 0,233.$$

Температура газів на вході у котельний пучок, °С

$$\vartheta'_{к.п} = 814.$$

Ентальпія продуктів згорання при цій температурі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I'_{\text{к.п}} = 14,6.$$

Приймаємо температуру продуктів згорання на виході з кипятильного пучка,  $^{\circ}\text{C}$

$$\vartheta''_{\text{к.п}} = 670.$$

Ентальпія продуктів згорання при цій температурі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I''_{\text{к.п}} = 11,77.$$

Коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi = 0,99.$$

Теплосприйняття котельного пучка,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_{\text{к.п}} = \varphi \cdot (I'_{\text{к.п}} - I''_{\text{к.п}}) = 0,99 \cdot (14,6 - 11,77) = 2,801.$$

Середня температура продуктів згорання,  $^{\circ}\text{C}$

$$\vartheta_{\text{к.п}} = 0,5 \cdot (\vartheta'_{\text{к.п}} + \vartheta''_{\text{к.п}}) = 0,5 \cdot (814 + 670) = 742.$$

Температура води при тиску в барабані,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{кип}} = 172,45.$$

Середній температурний напір,  $^{\circ}\text{C}$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{(814 - 172,45) - (670 - 172,45)}{2,3 \cdot \lg \frac{814 - 172,45}{670 - 172,45}} = 564.$$

Об'єм продуктів згорання при надлишку повітря в котельному пучку,

$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$

$$V_{\Gamma} = 12,028.$$

Середня швидкість продуктів згорання,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$

$$W_{\Gamma} = B_p \cdot V_{\Gamma} \cdot \left( \frac{273 + \vartheta_{\text{к.п}}}{273 \cdot F_{\text{к.п}}} \right) = 0,897 \cdot 12,028 \cdot \left( \frac{273 + 742}{273 \cdot 3,42} \right) = 11,8.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{к}} &= c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left( \frac{W_{\Gamma} \cdot d}{\gamma} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} = \\ &= 0,343 \cdot 1 \cdot \frac{898 \cdot 10^{-5}}{0,102} \cdot \left( \frac{11,8 \cdot 0,102}{118,1 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,598^{0,33} = 62. \end{aligned}$$

Теплофізичні параметри  $\lambda$ ,  $\gamma$ ,  $\text{Pr}$  знаходимо в залежності від середньої температури в фестони  $\vartheta_{\text{к.п}}$  [2, табл. 9].

Оптична щільність газового потоку,  $\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$

$$\begin{aligned} \tau_{\text{г.ф}} &= \kappa_{\Gamma} \cdot p_{\text{п}} \cdot S = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\text{п}} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{к.п}}}{1000} \right) \cdot p_{\text{п}} \cdot S = \\ &= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,181}{3,16 \cdot \sqrt{0,0266 \cdot 0,233}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,37 \cdot 1,012) \cdot 0,0266 \cdot 0,233 = 0,164. \end{aligned}$$

Ступінь чорноти газового потоку

$$a_{г.ф} = 1 - e^{-\tau_{г.ф}} = 1 - 2,72^{-0,164} = 0,151.$$

Температура забрудненої стінки труби, °С

$$t_3 = t_{кип} + 25 = 172,45 + 25 = 197,45.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$

$$\begin{aligned} \alpha_L &= \frac{5,13 \cdot 10^{-11} \cdot a_{г.ф} \cdot T_{к.п}^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{T_3}{T_{к.п}}\right)^{3,6}\right]}{\left(1 - \frac{T_3}{T_{к.п}}\right)} = \\ &= \frac{5,13 \cdot 10^{-11} \cdot 0,151 \cdot 1012^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{470,45}{1012}\right)^{3,6}\right]}{\left(1 - \frac{470,45}{1012}\right)} = 14. \end{aligned}$$

Коефіцієнт використання поверхні нагріву

$$\zeta = 1.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$

$$\alpha_1 = \zeta \cdot (\alpha_k + \alpha_L) = 1 \cdot (62 + 14) = 76.$$

Приймаємо коефіцієнт теплової ефективності

$$\psi = 0,6.$$

Коефіцієнт теплопередачі,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,6 \cdot 76 = 45,6.$$

Теплосприйняття поверхні нагріву за умовами теплопередачі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$Q_{\text{т.к.п}} = \frac{k \cdot H_{\text{к.п}} \cdot \Delta t}{B_p} \cdot 10^{-6} = \frac{45,6 \cdot 96,85 \cdot 564}{0,897} \cdot 10^{-6} = 2,79.$$

Розрахунок нев'язки сприйнятої теплоти, %

$$\Delta q = \frac{Q_{\text{к.п}} - Q_{\text{т.к.п}}}{Q_{\text{к.п}}} \cdot 100\% = \frac{2,801 - 2,79}{2,801} \cdot 100\% = -0,39.$$

Так як нев'язка не перевищує 2%, розрахунок першої частини котельного пучка закінчено.

## 2.12 Тепловий розрахунок економайзера

Температура живильної води, °С

$$t_{\text{пит}} = 100.$$

Ентальпія живильної води,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

$$h_{\frac{\text{п.в}}{\text{кг}}} = 419,6.$$

Витрата води на продувку,  $\frac{\text{с}}{\text{с}}$

$$D_{\text{пр}} = 0,33.$$

Витрата води через економайзер,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$



$$D_{\text{ЭК}} = D + D_{\text{пр}} = 11,11 + 0,33 = 11,44.$$

Температура газів на вході в ступінь, °С

$$\vartheta'_{\text{ЭК}} = 670.$$

Ентальпія газів при цій температурі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I'_{\text{ЭК}} = 11,77.$$

Температура газів на виході з економайзера, °С

$$\vartheta_{\text{УХ}} = 180.$$

Ентальпія при цій температурі,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$I_{\text{УХ}} = 3,1756.$$

Теплосприйняття економайзера по балансу,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$\begin{aligned} Q_{\text{ЭК}} &= \varphi \cdot (I'_{\text{ЭК}} - I_{\text{УХ}} + \Delta\alpha_{\text{ЭК}} \cdot I_{\text{Х.В}}^0) = \\ &= 0,99 \cdot (11,77 - 3,1756 + 0,08 \cdot 0,37362) = 8,54. \end{aligned}$$

Ентальпія води на виході з економайзера,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$

$$h''_{\text{ЭК}} = \frac{Q_{\text{ЭК}} \cdot B_{\text{р}}}{D_{\text{ЭК}}} + h'_{\text{ЭК}} = \frac{8,54 \cdot 0,897}{11,44} + 0,4196 = 1,089.$$

Середня температура середи в економайзері, °С

$$t_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (t_{\text{пит}} + t_{\text{кип}}) = 0,5 \cdot (100 + 172,45) = 136,225.$$

Питомий об'єм вологого пару, —  
 $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

$$v_{\text{пара}} = 0,001082.$$

Приймаємо швидкість води [3, стр.123],  
 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$

$$w_{\text{в}} = 1.$$

Живий перетин для проходу води,  $\text{м}^2$

$$f = \frac{D_{\text{эк}} \cdot v_{\text{пара}}}{w_{\text{в}}} = \frac{11,44 \cdot 0,001082}{1} = 0,0224.$$

Кількість зміювиків, шт.

$$z = \frac{f}{0,785 \cdot d_{\text{вн}}^2} = \frac{0,0224}{0,785 \cdot 0,022^2} = 61.$$

Середня температура газів,  $^{\circ}\text{C}$

$$\vartheta_{\text{эк}} = 0,5 \cdot (\vartheta'_{\text{эк}} + \vartheta''_{\text{эк}}) = 0,5 \cdot (670 + 180) = 425.$$

Приймаємо швидкість продуктів згоряння до поверхні, —  
 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$

$$W_{\Gamma} = 8.$$

Приймаємо діаметр труб [1, стр.74], мм

$$d = 28 \times 3.$$

Приймаємо поперечний крок труб, мм

$$S_1 = 60.$$

Приймаємо поздовжній крок труб, мм

$$S_2 = 38.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\begin{aligned} \alpha_k &= c_s \cdot c_z \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left( \frac{W_r \cdot d}{\gamma} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} = \\ &= 0,355 \cdot 1 \cdot \frac{5,99 \cdot 10^{-5}}{0,028} \cdot \left( \frac{8 \cdot 0,102}{58,1 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,6} \cdot 0,645^{0,33} = 104,3. \end{aligned}$$

Ефективна товщина випромінюючого газового шару, м

$$\begin{aligned} S &= 0,9 \cdot d \cdot \left( \frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2}{\pi \cdot d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,028 \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,06 \cdot 0,038}{3,14 \cdot 0,028^2} - 1 \right) = \\ &= 0,068. \end{aligned}$$

Оптична щільність газового потоку,  $\frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$

$$\begin{aligned} \tau_{r,\phi} &= \kappa_r \cdot p_{\Pi} \cdot S = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{\Pi} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_{\text{к.п}}}{1000} \right) \cdot p_{\Pi} \cdot S = \\ &= \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,171}{3,16 \cdot \sqrt{0,025 \cdot 0,068}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,37 \cdot 0,698) \cdot 0,025 \cdot 0,068 = 0,101. \end{aligned}$$

Ступень чорноти газового потоку

$$a_{r,\phi} = 1 - e^{-\tau_{r,\phi}} = 1 - 2,72^{-0,101} = 0,1.$$

Температура забрудненої стінки труби, °С

$$t_3 = t_{cp} + 25 = 136,225 + 25 = 161,225.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\begin{aligned} \alpha_L &= \frac{5,13 \cdot 10^{-11} \cdot a_{r,\phi} \cdot T_{k,\Pi}^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{T_3}{T_{k,\Pi}}\right)^{3,6}\right]}{\left(1 - \frac{T_3}{T_{k,\Pi}}\right)} = \\ &= \frac{5,13 \cdot 10^{-11} \cdot 0,1 \cdot 698^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{434,225}{698}\right)^{3,6}\right]}{\left(1 - \frac{434,25}{698}\right)} = 6,4. \end{aligned}$$

Коефіцієнт використання поверхні нагріву

$$\zeta = 1.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$\alpha_1 = \zeta \cdot (\alpha_k + \alpha_L) = 1 \cdot (104,3 + 6,4) = 110,7.$$

Приймаємо коефіцієнт теплової ефективності

$$\psi = 0,65.$$

Коефіцієнт теплопередачі,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

$$k = \psi \cdot \alpha_1 = 0,65 \cdot 110,7 = 71,96.$$

Температурні напори на вході і на виході з економайзера, °С:

$$\Delta t_{\text{б}} = \vartheta'_{\text{ЭК}} - t_{\text{КИП}} = 670 - 172,45 = 497,55;$$

$$\Delta t_{\text{м}} = \vartheta_{\text{УХ}} - t_{\text{ПИТ}} = 180 - 100 = 80.$$

Температурний напір в економайзері, °С

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{497,55 - 80}{2,3 \cdot \lg \frac{497,55}{80}} = 228,7.$$

Поверхня нагріву економайзера, м<sup>2</sup>

$$H_{\text{ЭК}} = \frac{Q_{\text{ЭК}} \cdot B_{\text{р}}}{k \cdot \Delta t} = \frac{8,54 \cdot 10^6 \cdot 0,897}{71,96 \cdot 228,7} = 467.$$

Площа поверхні нагріву економайзера, м<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} H_{\text{ЭК}} &= (\pi \cdot d \cdot l' \cdot 122) + (\pi \cdot d \cdot l'' \cdot 122) = \\ &= 3,14 \cdot 0,028 \cdot 29,278 \cdot 122 + 3,14 \cdot 0,028 \cdot 14,309 \cdot 122 = 467. \end{aligned}$$

### 2.13 Уточнення теплового балансу

Втрата теплоти з відхідними газами, %

$$q_2 = \frac{(I_{\text{УХ}} - \alpha_{\text{УХ}} \cdot I_{\text{ХВ}}^0)}{Q_{\text{р}}^{\text{р}}} \cdot (100 - q_4) = \frac{(3175,6 - 1,21 \cdot 373,62)}{33,763 \cdot 10^3} \cdot 100 = 8.$$

Сума теплових втрат, %

$$\sum q_{\text{пот}} = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 8 + 0,5 + 0 + 1,1 = 9,6.$$

Коефіцієнт корисної дії котельної установки, %

$$\eta_{к.у} = 100 - \sum q_{пот} = 100 - 9,6 = 90,4.$$

Розрахункова витрата палива,  $\frac{м^3}{с}$

$$B = \frac{Q_{к.у} \cdot 100}{Q_p^p \cdot \eta_{к.у}} \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) = \frac{27,771 \cdot 100}{33,763 \cdot 90,4} = 0,897.$$

Кількість теплоти, що вноситься з повітрям в топку,  $\frac{МДж}{м^3}$

$$Q_B = \Delta\alpha_T \cdot I_{х.в} = 0,05 \cdot 0,37362 = 0,0188.$$

Корисне тепловиділення в топці,  $\frac{МДж}{м^3}$

$$Q_T = Q_p^p \cdot \frac{100 - q_3 - q_4}{100 - q_4} + Q_B = 33,763 \cdot \frac{100 - 0,5 - 0}{100 - 0} + 0,0188 = 33,68.$$

Кількість теплоти, переданої в топці променистим теплообміном,  $\frac{МДж}{м^3}$

$$Q_L^T = \varphi \cdot (Q_T - I_T^*) = 0,99 \cdot (33,68 - 23,213) = 10,362.$$

Нев'язка теплового балансу,  $\frac{МДж}{м^3}$

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q_p^p \cdot \eta_{к.у} - (Q_L^T + Q_\phi + Q_{к.л}^1 + Q_{пп} + Q_{к.л}^2 + Q_{эж}) = \\ &= 33,763 \cdot 0,904 - (10,362 + 1,157 + 5,7 + 1,744 + 2,8 + 8,54) = 0,218. \end{aligned}$$

## ВИСНОВКИ

В дипломному проекті «Проект реконструкції котельної установки типу «Бабкок-Вількокс для використання природного газу Українського родовища»» проведено дослідження можливості підвищення паропродуктивності котла.

Продуктивність котла «Бабкок-Вількокс», що працює на газоподібному паливі зростає за рахунок реконструкції в 4 рази. При цьому обсяг топкової камери збільшиться з 31,8 м<sup>3</sup> до 75 м<sup>3</sup>.

При реконструкції повністю зберігаються всі основні будівельні та технологічні споруди.

Реконструкція котла не вимагає дефіцитного обладнання і може бути здійснена протягом одного сезону.

Відносна нев'язка теплового балансу, %

$$\Delta = \frac{\Delta Q}{Q_p} \cdot 100\% = \frac{0,218}{33,763} \cdot 100\% = 0,495.$$

Так як відносна нев'язка теплового балансу не перевищує 0,5%, розрахунок закінчено.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Кузнєцов, Н.В. Тепловий розрахунок котельних агрегатів: Нормативний метод / Н.В. Кузнєцов. М.: Енергія, 1973. 296 с.
2. Безгрешнов, А. Н. Розрахунок парових котлів у прикладах і задачах. Уч. посібник для вузів / А.Н. Безгрешнов, Ю.М. Липів, Б.М. Шлейфер. М.: Вища школа, 1991. 240 с.
3. Кузнєцов, Н.В. Тепловой расчет котельных установок. Нормативный метод / Н.В. Кузнєцов. - М: Энергия, 1973. 324 с.

4. Мочан, С.И. Аэродинамический расчет котельных установок / С.И. Мочан. - Л: Энергия, 1977.255 с.
5. Чейлитко А. О. Проектування та оптимізація систем теплопостачання : навч.-метод. посіб. для студ. ЗДІА напряму 144 «Теплоенергетика» денної і заочної форми навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 200 с.
6. Частухин, В.И. Тепловой расчет промышленных парогенераторов / В.И. Частухин.– К: Вища школа, 1980.184 с.
7. Макаров, В.Н. Методика поверочного теплового расчета парогенератора / В.Н. Макаров.– М: МЭИ, 1976.52 с.
8. Балдіна, О.М. Гідравлічний розрахунок котельних агрегатів: Нормативний метод / О.М. Балдіна, В.А. Локшина, Д.Ф. Петерсон.М.: Енергія, 1978.256 с.
9. Бобровський, Р.С. Котельні установки малої потужності / Р.С. Бобровський.М.: Машгіз, 1961.331 с.
10. Нечаєв, Р.К. Автоматика і автоматизація виробничих процесів / Р.К. Нечаєв.К.: Вища школа, 1985.279 с.
11. Староверов, К.В. Справочник проектировщика / К.В. Староверов. - М.: Стройиздат, 1976.120 с.
12. Николаев, А.А. Справочник проектировщика. Проектирование топок и печей / А.А. Николаев. - М.: Стройиздат, 1965.236 с.
13. Файерштейн, Л.М. Довідник з автоматизації котелень / Л.М. Файерштейн, Л.С. Этинген, Р.Р. Гохбойн.М.: Вища школа, 1985.296 с.
14. Бузников, Е.Ф. Виробничі та опалювальні котельні / Е.Ф. Бузников, К.Ф. Роддатис.М.: Вища школа, 1984.248 с.
15. Староверов, К.В. Справочник проектировщика / К.В. Староверов. - М.: Стройиздат, 1976.120 с.
16. Николаев, А.А. Справочник проектировщика. Проектирование топок и печей / А.А. Николаев. - М.: Стройиздат, 1965.236 с.



17. Денисенко, Р.Ф. Охорона праці: Уч. посібник для інж.- екон. спец. Вузів / Р.Ф. Денисенко.М.: Вища школа, 1985.248 с.
18. Гаджієв, Р.В. Охорона праці в тепловому господарстві промислових підприємств: Уч. посібник для технікумів / Р.В. Гаджієв, А.А. Вороніна.М.: Енергія, 1980.224 с.
19. Оніщенко, Н.С. Охорона праці при експлуатації котельних установок / Н.С. Оніщенко.М.: Енергія, 1992.350 с.
20. ДНАОП 0.00-1-08.-94. Правила будови і безпечної експлуатації парових і водогрійних котлів – К: Стройиздат, 1995 – 12 с.
21. Прузнер, С.С. Правила пристрої і безпечної експлуатації судин, працюючих під тиском / С.С. Прузнер.М.: Металургія, 1971.45 с
22. Чейлитко А.О. Використання вторинних енергоресурсів: навчально–методичний посібник для студентів ЗДІА напряму 6.050601 “Теплоенергетика” денної і заочної форми навчання. Запоріжжя: ЗДІА, 2014. 246 с.
23. Теплотехнологічні процеси та установки: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів ЗДІА напряму 6.050601 «Теплоенергетика» денної та заочної форми навчання / ЗДІА; уклад.: А.О.Чейлитко, Ю.О.Герасимов, Ю.М. Каюков – Запоріжжя, ЗДІА, 2014.30 с.