

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОНИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна робота

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз режимів роботи стаціонарних  
магнетронних підігрівачів мазуту типу ЛМ

Виконав: студент І курсу, групи \_\_\_\_\_  
спеціальності 144 Теплоенергетика

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Теплоенергетика

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

Мельникенко Е.В.

(підпис та прізвище)

Керівник доц.к.т.н. Назаренко А.

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

Рецензент Жуков Р.О.

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

Запоріжжя  
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики  
Рівень вищої освіти другий магістерський  
Спеціальність 144 Теплоенергетика  
(код та назва)  
Освітня програма Теплоенергетика  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ року

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Мельниченку Євгену Володимировичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи (проекту) Аналіз режимів роботи стаціонарних мадсотрубних підігрівачів мазуту типу ТМ  
керівник роботи Назаренко Зіна Анатоліївна, і.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- затверджені наказом ЗНУ від « 10 » 09 2019 року № 1537-с
- Строк подання студентом роботи 26.12.2019р.
- Вихідні дані до роботи підігрівач ТМ-2.5-Б. Намакимальна витрата 1,667 м<sup>3</sup>/год. Температура нагріваної пари 191,6 °С. Термічний опір забруднень R=9,001 м<sup>2</sup>/Вт
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Загальна характеристика об'єкту дослідження 2. Режим роботи підігрівача ТМ-2.5-Б.
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
1. Залежність  $t_{вх} = f(t_{вх})$  2. Залежність  $st = f(t_{вх})$  3. Залежність  $q = f(t_{вх})$  4. Залежність  $d_{н} = f(t_{вх})$  5. Залежність  $\epsilon = f(t_{вх})$  6. Креслення ТМ-2.5-Б.
- Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	завдання видав	завдання пройдено
Розділ 1	Нозаренко Т.А., к.т.н., доцент		
Розділ 2	Нозаренко Т.А., к.т.н., доцент		
Сторонка праці	Нозаренко Т.А., к.т.н., доцент		

7 Дата видачі завдання 18.09.2019р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
1	Загальна характеристика об'єкту досліджень	18.09-19.12.18.	виз.
2	Аналіз режимів роботи шароструміних підгрівачів	20.02.18-20.06.19	виз.
3	Об'єкція праці	1.09.19-15.11.19	виз.
4	Розробка креслень	15.11-20.12.19	виз.

Студент

(підпис)

Мельниченко Е.В.

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)

(підпис)

Нозаренко Т.А.

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

(підпис)

Лавров Ю.О.

(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Мельниченко Є.В. Аналіз режимів роботи стаціонарних гладкотрубних підігрівачів мазуту типу ПМ.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник І.А. Назаренко. Запорізький національний університет. Інженерний інститут. Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій, кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2020.

Виконано аналіз режимів роботи стаціонарних гладкотрубних підігрівачів мазуту типу ПМ. Виконано тепловий розрахунок теплообмінника. Знайдено залежності температури мазуту на виході з підігрівача від температури на виході Побудовано залежності різниці температур мазуту на виході з підігрівача та температури на вході до нього для різних значень витрати мазуту.

Ключові слова: коефіцієнт теплопередачі, паровий реєстр, мазут, тепловий потік, температурний напір.

## ABSTRACT

Melnichenko EV Analysis of operating modes of stationary smooth-tube fuel oil type PM heaters.

Qualification graduation work for the degree of higher education of master's degree in specialty 144 - Thermal power engineering, supervisor I. Nazarenko. Zaporizhzhya National University. Engineering Institute. Faculty of Energy, Electronics and Information Technology, Department of Heat Power Engineering and Hydropower Engineering, 2020.

The modes of operation of stationary smooth-tube fuel oil type PM heaters have been analyzed. Thermal calculation of the heat exchanger was performed. The dependence of the heating oil temperature at the outlet of the heater on the outlet temperature was found.

Keywords: heat transfer coefficient, steam register, fuel oil, heat flow, temperature head.

## АННОТАЦИЯ

Мельниченко Е.В. Анализ режимов работы стационарных гладкотрубных подогревателей мазута типа ПМ.

Квалификационная выпускная работа для получения магистра по специальности 144 - Теплоэнергетика, научный руководитель И.А. Назаренко. Запорожский национальный университет. Инженерный институт. Факультет энергетика, электроники и информационных технологий, кафедра теплоэнергетики и гидроэнергетики, 2020.

Выполнен анализ режимов работы стационарных гладкотрубных подогревателей мазута типа ПМ. Выполнен тепловой расчет теплообменника. Найдены зависимости температуры мазута на выходе из подогревателя от его температуры на входе. Построены зависимости разности температур мазута на выходе из подогревателя и температуры на входе в него для различных значений расхода мазута.

Ключевые слова: коэффициент теплопередачи, паровой регистр, мазут, тепловой поток, температурный напор.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
1.1 Класифікація та характеристика мазуту, як палива.....	9
1.2 Призначення та класифікація підігрівачів мазуту ТЕС.....	11
1.3 Схеми включення підігрівачів мазуту в системи підготовки рідкого палива на теплових електричних станціях.....	22
2 АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ СТАЦІОНАРНИХ ПІДІГРІВАЧІВ МАЗУТУ ТИПУ ПМ.....	31
2.1 Постановка завдання.....	31
2.2 Методика теплового повір очного розрахунку підігрівачів мазуту.....	33
2.3 Тепловий розрахунок підігрівачів мазуту	45
2.4 Вихідні дані для теплового розрахунку підігрівача мазуту ПМ-25-6.....	47
2.5 Тепловий розрахунок підігрівача мазуту ПМ-25-6.....	48
2.6 Тепловий розрахунок підігрівачів мазуту великої потужності...	56
2.7 Вихідні дані для теплового розрахунку підігрівача мазуту	58
2.8 Тепловий розрахунок підігрівача мазуту ПМ-120-10	59
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	68
3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих факторів.....	68
3.2 Заходи з поліпшення умов праці.....	69
3.3 Виробнича санітарія.....	72
3.4 Електробезпека.....	76
3.5 Пожежна безпека.....	78
3.6 Розрахунок захисного заземлення.....	79
ВИСНОВКИ.....	81
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	83

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Мазут на електростанціях використовується не тільки як основне, але й як допоміжне паливо, що застосовується для розпалювання котлів, які працюють на твердому паливі. У залежності від призначення мазуту на КЕС споруджується або основне, або розпалювальне мазутне господарство. Основне господарство розраховується на подачу такої кількості мазуту, яка забезпечує роботу всіх котлів з номінальним навантаженням; розпалювальне – тільки для одночасного розпалювання двох котлів до навантаження, рівного 30% номінального.

Для забезпечення надійності транспорту мазут доводиться підігрівати на всій довжині тракту його руху. Первинний підігрів до температури (35...45) °С відбувається у прийомно - завантажувальному пристрої при зливі із цистерн і русі по самопливних лотках. У резервуарах мазут підігрівається до 90 °С. Остаточний підігрів до температури (120...150) °С, що вибирається за умовами розпилювання мазуту у форсунках пальникових пристроїв котлів, здійснюється у підігрівачах, які встановлюються в насосній станції.

*Об'єкт дослідження* – процеси теплообміну при нагріванні мазуту.

*Предмет дослідження* - вплив температури мазуту на вході до підігрівача на кінцеву температуру мазуту при різних значеннях витрати пари.

*Мета роботи* – визначення впливу температури мазуту на вході до підігрівача на кінцеву температуру мазуту при різних значеннях витрати пари.

*Задачі дослідження.* Для досягнення поставленої мети в роботі визначені наступні задачі:

- аналіз сучасного стану питання, щодо систем нагрівання мазуту;
- визначення факторів, що впливають на процес нагрівання мазуту;
- тепловий та конструктивний розрахунок підігрівача мазуту марки ПМ;

- отримання результатів досліджень та побудова графіків залежності кінцевої температури мазуту від початкової для різних значень витрати пари.

*Методи та засоби дослідження.* Задачі дослідження вирішувались шляхом математичного моделювання та зі застосуванням розрахункового методу.

*Практична цінність роботи* полягає в розробці режимів нагрівання з метою підвищення енергоефективності систем нагрівання мазуту.

*Особистий внесок здобувача* полягає у наступному:

- проведення комплексного аналізу літературних джерел щодо існуючих систем нагрівання мазуту;

Постановка завдання та формулювання висновків виконувались під керівництвом к.т.н., доц. Назаренко І.А.

*Апробація роботи.* Положення роботи викладені на наступних конференціях:

- XXIV науково - технічна конференція студентів магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (м. Запоріжжя, 2019).

- IV Всеукраїнської науково – практичної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики». (м. Херсон, 2019).

*Структура та обсяг роботи.* Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилань. Загальний обсяг \_\_ сторінок .



# 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.4 Класифікація та характеристика мазуту, як палива

На стаціонарних паротурбінних установках достатньо широко застосовується органічне паливо, основним видом якого є нафтяний мазут. У невеликих кількостях у якості рідкого палива використовують остаточні рідкі продукти напівкоксування вуалей та горючих сланців, які називаються відповідно вугільним або сланцевим мазутами.

Нафтові мазути в залежності від галузі застосування підрозділяють на флотський мазут, пічне паливо та топочні мазути – котельне паливо. На електростанціях та в промислових котельнях використовують топочні мазути [1-5].

Нафтові мазути отримують на нафтопереробних заводах в процесі виробництва інших нафтопродуктів, наприклад, олій, бензину, керосину і т.ін. в залежності від технологічних умов (тиску та температури), переробка нафти може бути не глибокою (часто називають розгонкою) та глибокою (крекінг – процес). При неглибокій переробці нафта розділяється на вузькі фракції за температурами кипіння без руйнування молекулярної структури фракцій. Крекінг - процес або глибока переробка нафти створюють нові сполуки з меншою молекулярною вагою, але на ряду з ними створюються складні та важкі рідкі сполуки (гудрон та напівгудрон), а також тверді речовини [6-9].

Мазут, який отримують при неглибокій переробці нафти називають прямогонним, при глибокій – крекінг – мазутом.

В залежності від в'язкості існують декілька марок нафтових мазутів. В основу маркірування положена величина так званої умовної в'язкості, що представляє собою відношення часу витікання визначеного об'єму мазуту при заданій температурі до часу витікання такого ж об'єму дистильованої води при 20 °С. У відповідності з [10] мазут, який отримано при переробці

нафти та призначений для електростанцій, транспортних та стаціонарних котлів, а також технологічних установок, поділяється на:

- флотський марок Ф5, Ф12;
- топочний високої якості марок 40В, 100В
- топочний марок М40, М100.

Флотські мазути відносяться до категорії легких палив, топочні мазути М40В та М40 – до категорії середніх палив, топочні марок М100В та М100 – до категорії важких палив. Флотський мазут призначений для судових котлів, газових турбін та двигунів. За складом він представляє собою суміш нафтових залишків прямої перегонки з дистилятами, тому його густина та в'язкість значно нижче, ніж у інших сортів мазуту. Флотський мазут марки Ф5 складається з (60...70) % мазуту та (30...40) % газойля, які отримані при прямій перегонці сірчатої нафти[11].

Топочний мазут складається з важких крекінг – залишків або представляє собою суміш крекінг – залишків з мазутом прямої перегонки. Мазут марки М40 використовують у судових котлах, промислових печах та котельнях, рідко на електростанціях. Топочні мазути марки М100 призначені для електростанцій. Топочні мазути цієї марки підрозділяються на три сорти в залежності від вмісту в них сірки:

- малосірчасті ( $S^p < 0,5 \%$ );
- сірчасті ( $S^p = (0,5...2) \%$ );
- високосірчасті ( $S^p > 2 \%$ ).

Важливою характеристикою рідких органічних палив є в'язкість. Від значення в'язкості мазуту залежать витрати енергії на транспортування по трубопроводам, тривалість зливних та завантажувальних процедур, ефективність роботи форсунок в камерах горіння палива, швидкість осадження та відстоювання домішок.

Крім традиційних понять в'язкості, таких як динамічна та кінематична, для мазутів часто використовують умовну в'язкість та час витікання в секундах визначеного об'єму мазуту через капіляр заданого розміру при

заданому тиску. Для високов'язких мазутів більш точним є визначення динамічної в'язкості [12].

Саме висока в'язкість топочних мазутів є основною причиною чому паливне господарство електростанцій обов'язково включає в себе підігрівачі мазуту.

### 1.5 Призначення та класифікація підігрівачів мазуту ТЕС

Підготовка мазуту до спалювання полягає в його підігріві з метою отримання необхідної в'язкості, очищення від механічних домішок, обробки присадками та диспергування вологи. Призначення підігрівачів мазуту в технологічних схемах є підігрів мазуту для забезпечення необхідного температурного режиму і в'язкості за усім паливним трактом, починаючи з резервуарів – сховищ до форсунок топки котла.

Таким чином, система високоефективного та економічного спалювання високов'язких мазутів складається з основних елементів:

- теплообмінників - підігрівачів мазуту;
- обладнання рециркуляції підігрітого мазуту;
- обладнання змішування частини підігрітого мазуту з мазутом, який знаходиться в витратних ємностях – резервуарах.

Підігрівачі мазуту відносяться до рекуперативних поверхневих теплообмінних апаратів [13]. За конструктивними ознаками підігрівачі мазуту поділяються на:

- кожухотрубні з прямими гладкими трубами (гладкотрубні);
- кожухотрубні з U-образними трубами ;
- кожухотрубні секційні;
- секційні типу «труба в трубі»;
- кожухотрубні з оребреними трубами.

Для забезпечення необхідної в'язкості ( $16 \cdot 10^{-6}$  м/с) температура підігріву для мазуту марки М40 повинна скласти 110 °С, для мазуту М100 -

125 °С. При цьому часто використовують перегріту пару з відборів турбіни з тиском до 1,6 МПа і температурою до 300 °С.

Рекомендована температура підігріву мазуту перед форсунками повинна мати значення не менше тих, що вказані у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Рекомендовані мінімальні значення температури підігріву мазуту, °С для основних конструкцій форсунок

Тип форсунок	Марка мазуту	
	М40	М100
Механічні та паромеханічні	100	115
Механічні та ротаційні	90	110
Повітряні низьконапірні	85	100
Парові високонапірні	80	95
Форсунки «Титан-М», механічні двухконтурні з зворотнім зливом, двухступеневі ВТИ-БРЕН	120	135
Форсунки ГМГ-м	110	125

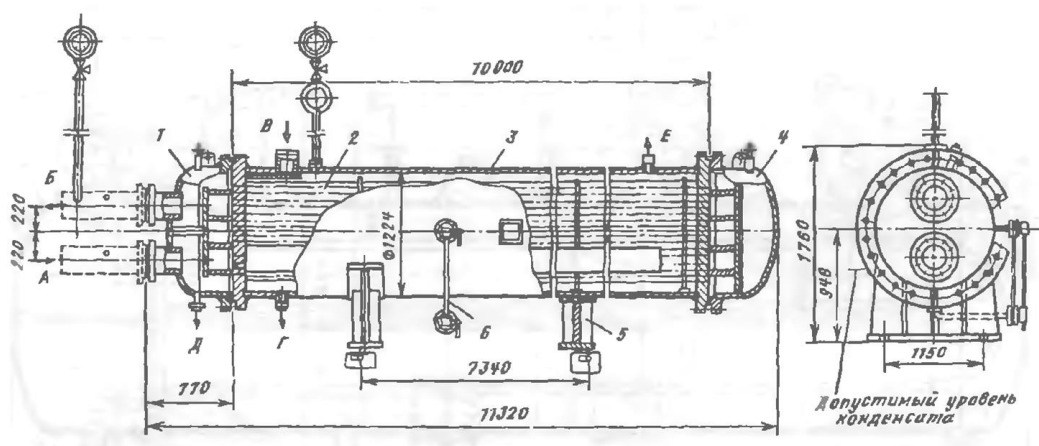
Також слід відмітити, що для мазуту марок М40 та М100 перед ротаційними форсунками допускається зниження температури до 60 °С. При обробці мазуту різними присадками температура розігрівання повинна бути не менше ніж 110 °С.

Горизонтальні гладко трубні підігрівачі мазуту типу ПМ застосовуються в одноступеневих (марки апаратів ПМ-40-15 та ПМ-40-30) і двохступеневих (марки апаратів ПМ-10-60 та ПМ-10-120) схемах мазутопідготовки. Технічні характеристики підігрівачів типу ПМ наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Технічні характеристики підігрівачів типу ПМ

Характеристика	Марка апарату			
	ПМ-40-15	ПМ-40-30	ПМ-10-60	ПМ-10-120
Витрата мазуту, т/год	15	30	60	120
Тиск мазуту, МПа	4	4	1	1
Тиск пари, МПа	1	1	1	1
Температура пари, °С	200	200	200	200
Температура мазуту М100 на вході, °С	70	70	60	60
Температура мазуту М100 на виході, °С	95	95	115	115
Гідравлічний опір при номінальній продуктивності, МПа	0,265	0,265	0,265	0,265
Маса апарату, кг	2730	7730	12500	26800
Площа поверхні, м <sup>2</sup>	30	100	200	400

Конструкція підігрівача марки ПМ-10-120 представлена на рисунку 1.1.



1- мазутна камера; 2 – трубний пучок; 3 – корпус; 4 – мазутная камера; 5 – опора; 6 – водомірне скло; А,Б – вхід та вихід мазуту; В – вхід пари; Г – відведення конденсату; Д- дренаж мазуту; Е – відсос повітря.

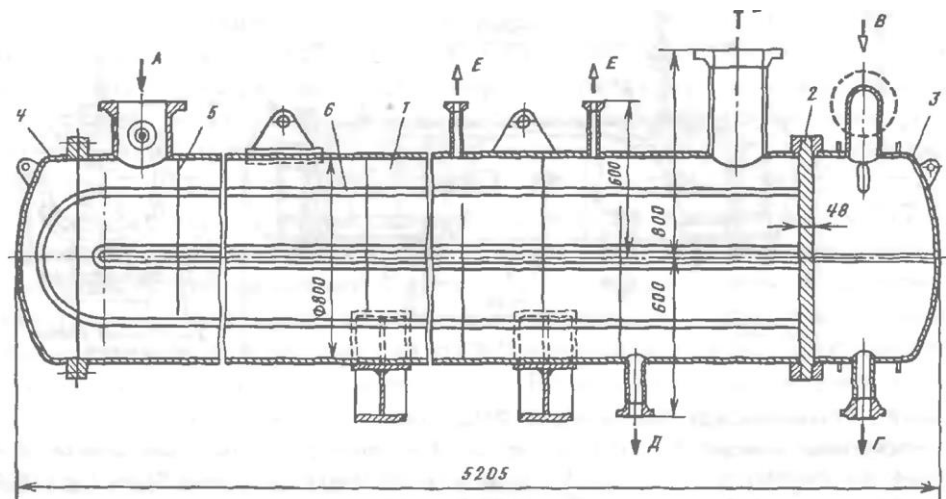
Рисунок 1.1 - Конструкція підігрівача марки ПМ-10-120

Дані мазутопідігрівачі конструктивно виконані однаково та представляють собою теплообмінники горизонтального типу. Теплообмінна поверхня складається з прямих гладких труб, діаметром 38x2,5 мм. Мазут подається в трубний простір, а водяна пара - в між трубний простір. Обидві трубні дошки в апаратах закріплені жорстко. Усі деталі підігрівачів виконані з вуглецевої конструкційної сталі. Труби в трубних дошках закріплюються розвальцовкою. Апарати марки ПМ мають 12 ходів мазуту та розраховані на максимальний його нагрів 125 °С, парою з тиском до 1,3 МПа і температурою до 250 °С [14].

В процесі експлуатації даних підігрівачів мазуту виявлено ряд недоліків:

- значні габарити та висока металоємність внаслідок низької теплопередачі;
- труднощі з очисткою внутрішньої поверхні труб від відкладень мазуту внаслідок великої їх довжини (10 м) і відносно невеликого внутрішнього діаметру (33 мм);
- низька герметичність мазутної порожнини апаратів, і як наслідок, неможливість використання конденсату без додаткового очищення.

Підігрівачі кожухотрубні з U – образними трубами вважаються технологічними у виробництві, менш дорогими та надійними в експлуатації за рахунок вільного пересунення трубного пучка. В підігрівачах такого типу мазут рухається в між трубному просторі, а пара - в середині труб. Підігрівачі кожухотрубний з U – образними трубами показано на рисунку 1.2.

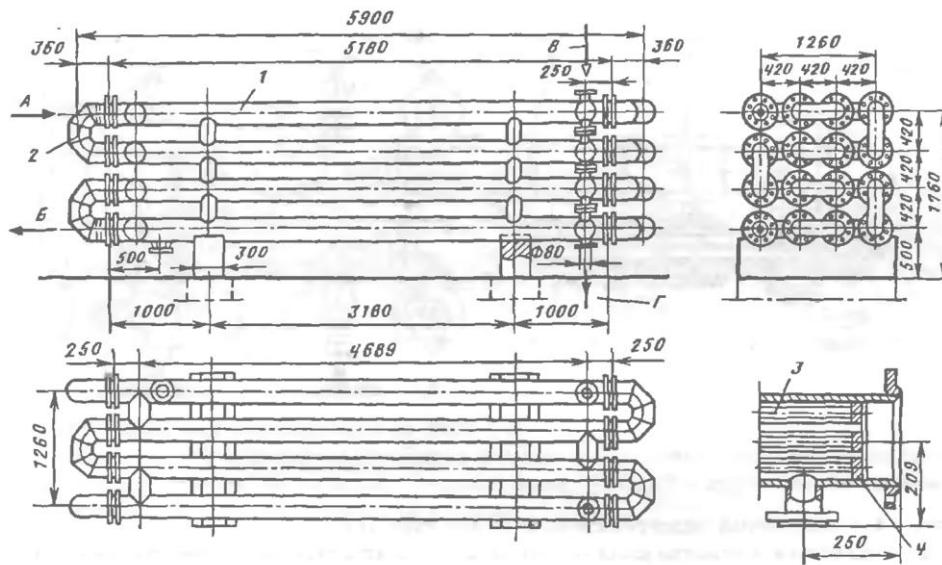


1- корпус; 2 – трубна дошка; 3 –парова камера; 4 – мазутная камера; 5 – перегородка трубного пучка; 6 – U – образна труба; А,Б – вхід та вихід мазуту; В – вхід пари; Г – відведення конденсату; Д- дренаж мазуту; Е – відсос повітря.

Рисунок 1.2 - Конструкція кожухотрубного підігрівача з U – образними трубами

Звичайно апарати такої конструкції складаються з трьох основних частин: корпусу з фланцем, трубної дошки з развальцованими у неї U – образними трубами та камери з патрубками підводу та відводу робочої рідини. Трубний пучок, який складається з трубної дошки з развальцованими у неї U – образними трубами, може бути вийнятий з корпусу апарату для ремонту та очищення. Поперечне омивання трубного пучка забезпечується системою сегментних перегородок. Основними недоліками таких апаратів є труднощі з очисткою поверхонь нагріву та практична можливість заміни окремих труб.

Кожухотрубні секційні підігрівачі мазуту ( див. рис. 1.3) складаються з набору секцій, кожна з яких, представляє собою трубний підігрівач з 12 труб діаметром і товщиною 38x4,5 мм та довжиною 5 м. Кінці труб закріплені у нерухомих трубних дошках. В середині труб рухається мазут, в між трубний простір поступає пара з тиском 0,8 МПа. Підігрівач складається з 16-25 секцій, які з'єднані послідовно за ходом мазуту. Розрахункова швидкість 1,7 м/с [15].



1- секція підігрівача; 2 – поворотне коліно; 3 – труба поверхні нагріву; 4 – трубна дошка; А,Б – вхід та вихід мазуту; В – вхід пари; Г – відведення конденсату; Д- дренаж мазуту; Е – відсос повітря.

Рисунок 1.3 - Конструкція кожухотрубного секційного підігрівача

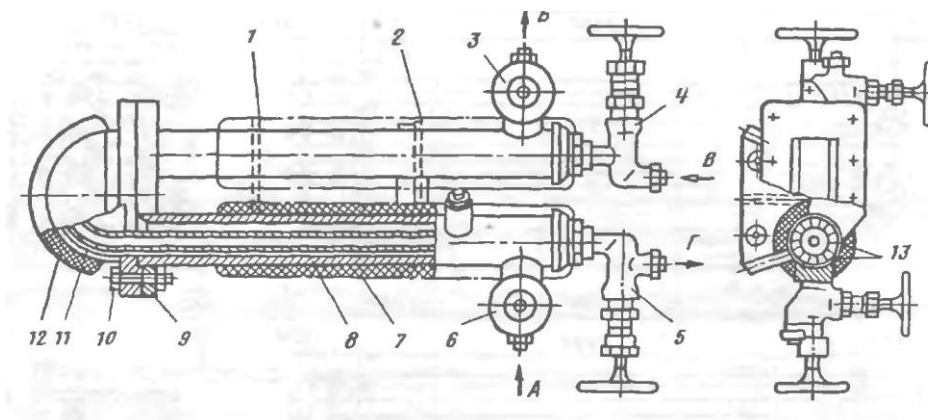
До недоліків таких теплообмінників слід віднести складність очищення внаслідок великої кількості разголуджених з'єднань та наявності відкладень на поверхнях нагріву, що приводить до зниження теплової ефективності апаратів та росту гідравлічного опору.

Секційні підігрівачі типу «труба в трубі» застосовуються для мало потужних енергоустановок з невеликими витратами палива. Вони відрізняються простотою та надійністю в експлуатації. Шляхом комбінації необхідної кількості числа паралельно з'єднаних секцій можливо компоувати підігрівачі палива в необхідній послідовності для різних тисків граючої пари та допустимих втрат натиску по паливу.

Секційний підігрівач ПТС показано на рисунку 1.4. Він використовується для нагріву рідкого палива в судових транспортних енергетичних установках. Конструктивно підігрівач типу ПТС складається з двох секцій, які з'єднані послідовно по ходу палива і пари. В кожній секції є



три основних вузла: корпус, фланцева кришка та нагрівальна трубка, яку розташовано коаксиально в середині корпусу [16].



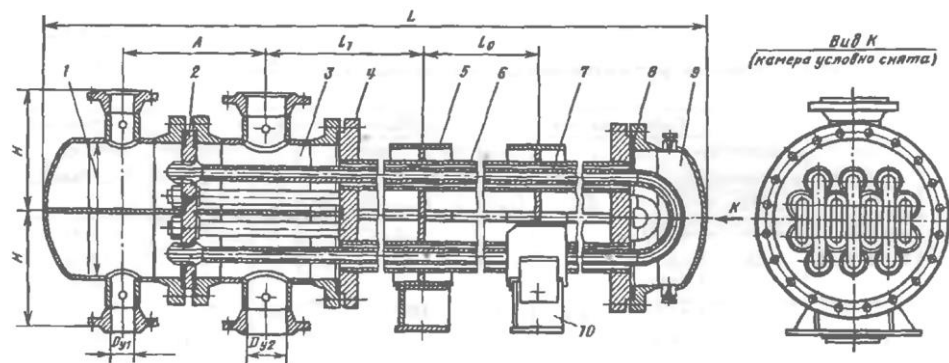
1,2 - рухома та нерухома опори; 3,5 - клапани виходу відповідно палива та конденсату; 6,4 - клапани входу відповідно палива та пари; 7 - трубка нагрівальна; 8- корпус нагрівача; 9 - фланець корпусу; 10 - болт; 11- кришка; 12 - ізоляція; 13 - ребра нагрівальної трубки; А,Б - вхід та вихід мазуту; В - вхід пари; Г - відведення конденсату; Д- дренаж мазуту; Е - відсос повітря.

Рисунок 1.4 - Конструкція секційного підігрівача ПТС

Достатньо великий ряд типорозмірів апаратів типу «труба в трубі» випускається заводами хімічного та нафтового машинобудування. Розбірні теплообмінники типу «труба в трубі» (ТТ) виготовляються галузевими нормлями. Нормлями охоплюються багато – і одно поточні підігрівачі з теплообмінними трубками різного діаметру (25...133) мм. В їх трубних пучках можуть застосовуватись гладкі та ребристі труби: з привареними повздовжніми ребрами; з видавленими повздовжніми ребрами; з привареними шипами; з поперечно гвинтовою накаткою на поверхні. В апаратах забезпечується компенсація температурних подовжень трубної системи відносно корпусу.

Теплообмінники ТТ можна розбирати з метою заміни труб і очищення їх зовнішньої поверхні від забруднень. Робочі параметри цих апаратів наступні: тиск середовища в середині труб до 6,4 МПа, зовні – 1; 5; 7; і 22 МПа. Температура середовища в середині труб від -40 до 500 °С.

Конструкція теплообмінників ТТ представлена на рисунку 1.5.



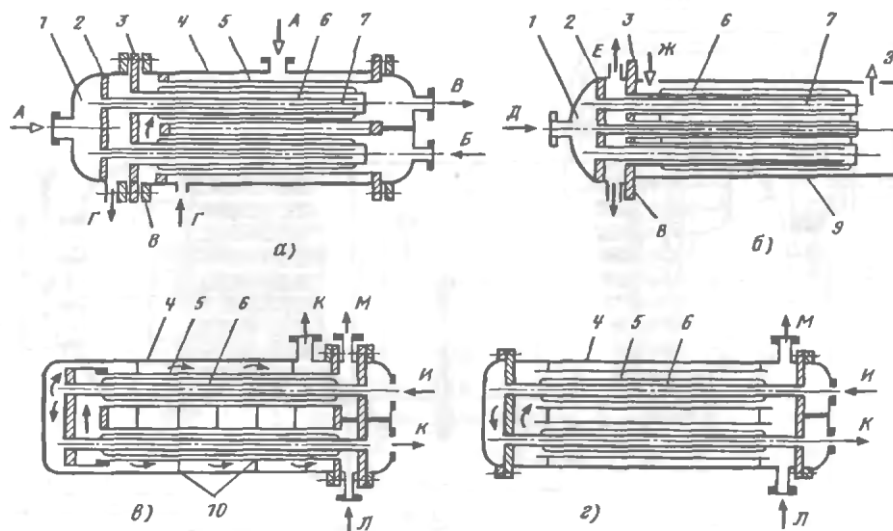
1,3 - перша та друга розподільчі камери; 2 - решітка теплообмінних труб; 4 - фланець; 5 - обичайка опорна; 6- кожухова труба; 7 - труба теплообмінна; 8 - прокладка; 9- задня камера; 10 - опора

Рисунок 1.5 - Конструкція підігрівача типу ТТ

Необхідна поверхня нагріву може бути отримана підбором числа паралельно та послідовно з'єднаних секцій з вибором для кожного конкретного випадку оптимальних розмірів каналів. У вітчизняній енергетиці використовуються підігрівачі типу «труба в трубі», які складаються з 96 горизонтально розташованих нагрівальних елементів. В кожному проти точному нагрівальному елементі довжиною 5100 мм, що створено зовнішньою (діаметром 108x4 мм) і внутрішньою (діаметром 59x4 мм) трубами, мазут рухається в середині малих труб. Секції по ходу мазуту поєднуються між собою «калачами» з труб діаметром і товщиною стінки 59x4 мм. Паливо, що підігрівається проходить через теплообмінник двома паралельними потоками. Загальна витрата мазуту складає 20 т/ год при середній швидкості руху 1,4 м/с [17].

На рисунку 1.6 показані можливі компоновальні рішення для теплообмінників блочно – елементного типу, які використовуються у якості парорідинних ( див. рис. 1.6а), газорідинних ( див. рис. 1.6б), а також рідиннорідинних (див. рис. 1.6 в,г) підігрівачів з двостороннім та одностороннім підігрівом елементів. Перераховані апарати виконуються

цельнозварними з одностороннім закріпленням внутрішніх труб, яке допускає температурне розширення кожної труби в сторону заглушеного кінця та забезпечує надійну герметизацію порожнини в'язкої рідини в апараті.



а – паро рідинний підігрівач; б – газорідинний підігрівач; в, г – рідиннорідинні підігрівачі; 1- парова камера; 2 – проміжна трубна дошка; 4 – обичайка корпусу; 5 – пучок зовнішніх труб блоку корпусу; 6 – пучок внутрішніх оребрених труб; 7 – додаткова внутрішня парова труба; 8 – фланець корпусу; 9 – кожух; 10 – поперечні перегородки в теплообміннику; А – вхід пари в підігрівач мазуту ПМР; Б,В – вхід та вихід мазуту; Г – вихід конденсату; Д – вхід води в підігрівачі мережевої води утилізатору ГТУ; Е – вихід мережевої води; Ж,З – вхід і вихід газу; И,К – вхід і вихід охолоджуваної води в маслоохолоджувачі МБРГ; Л,М – вхід і вихід масла.

Рисунок 1.6 – Компоновка блочно – елементних теплообмінників

Основними недоліками даної конструкції є:

- великі габарити;
- висока металоємність;
- велика кількість фланцевих з'єднань
- незадовільно організоване відведення конденсату, внаслідок чого може відбуватися його переохолодження, зниження температурного натиску в апараті та температури нагріву палива.

Експлуатація таких підігрівачів мазуту показала, що при підвищеній швидкості палива зменшується випадання карбідів та механічних домішок на поверхні нагріву, це допускає більш тривалу роботу підігрівача між чистками.

Апарати ПМР призначені для заміни гладко трубних підігрівачів ПМ. Загальний вид підігрівача мазуту ПМ продуктивністю 120 т/год показано на рисунку 1.7.

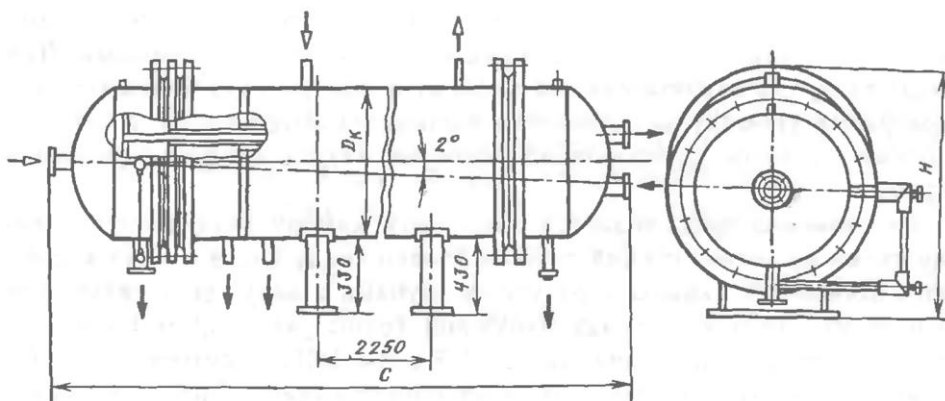


Рисунок 1.7 – Загальний вид підігрівача мазуту типу ПМ

Всі апарати серії МПР (див. рис. 1.8) мають горизонтальне виконання та фланцевий роз'єм на корпусі, що забезпечує можливість виїмки пучка внутрішніх труб для очищення та ремонту. Для інтенсифікації теплопередачі у кільцевому каналі на поверхні внутрішньої труби встановлені повздовжні пластичні ребра. Ці апарати призначені для нагріву різних в'язких рідин, парою, що конденсується або гарячою водою. Вони випускаються на два робочих тиску 1,3 та 6,4 МПа і розраховані на використання пари з тиском до 1,6 МПа і температурою до 300 °С [18].

Основними вузлами апаратів ПМР є: блок – корпус, трубний пучок з нагрівальних елементів, парова та мазутна камери, які утворені трубними дошками та еліптичними днищами. При введенні пучка нагрівальних елементів в середину труб блока – корпусу утворюються кільцеві нагрівальні

канали, в яких здійснюється двосторонній нагрів мазуту паром, що конденсується.

Середовище, що нагрівається подається в мазутну камеру, яка розділена перегородками на вісім секцій відповідно до числа ходів мазуту в апараті.

Зовнішні труби, які закріплені в трубних дошках корпусу і обігріваються паром, яка поступає в між трубний простір, утворюють блок – корпус. В нагрівальні елементи пара потрапляє по додатковим трубам, які закріплені в проміжній трубній дошці. Простір в камері між трубними дошками служить відсіком для збору конденсату, який поступає з нагрівальних елементів. Додаткова труба має перфорацію.

В мазутній камері встановлені перегородки, які визначають кількість ходів рідини в апараті. В паровій ємності є проміжна трубна дошка, яка направляє потоки пари та конденсату.

Охолодження конденсату здійснюється в нижніх елементах, через які конденсат проходить по внутрішнім трубкам, нагріваючи при цьому мазут. Для поліпшення дренажу оребрених труб нагрівальних елементів передбачено нахил апарату в сторону парової камери.

Мазут поступає до теплообміннику через вхідну камеру, а з неї в кільцеві канали нагрівальних елементів першого ходу. Пройшовши відповідну секцію поворотної камери, мазут потрапляє до другого ходу та подальше проходить послідовно через елементи останніх шести ходів апарату. Число труб в наступних за першим ходом змінюється пропорційно зменшенню в'язкості мазуту при підігріві рідини, що дозволяє не збільшуючи опору відповідних ділянок (ходів), допустити на них більш високі швидкості середовища, що нагрівається. Підвищення швидкості мазуту сприяє зменшенню відкладень на поверхні труб та збільшує коефіцієнт теплопередачі [19].

### 1.3 Схеми включення підігрівачів мазуту в системи підготовки рідкого палива на теплових електричних станціях

На електростанціях і в котельних мазутні господарства відрізняються за способом доставки, використання та підведення палива до форсунок. В залежності від способу використання мазуту на електростанціях відрізняють чотири типи мазутних господарств: основне, резервне, аварійне та розтопочне [20].

*Основне* мазутне господарство будується на теплових електростанціях, де мазут є основним видом палива, а газ спалюється як буферне паливо в період його надлишків.

*Резервне* мазутне господарство будується на теплових електростанціях, де основним паливом є газ, а мазут спалюється в періоди відсутності газу.

*Аварійне* мазутне господарство передбачається на таких станціях, на яких основним і єдиним видом палива є газ, а мазут використовують тільки при аварійному припиненні його подачі.

*Розтопочне* мазутне господарство є на усіх електростанціях, які використовують тверде паливо при камерному спалюванні. Мазут служить для розпалу та підсвітлювання факелу в топках котлів. У випадку встановлення на таких електростанціях газо – мазутних пікових водогрійних котлів їх мазутне господарство з'єднується з розтопочним.

На теплових електростанціях застосовуються три схеми підведення рідкого палива до форсунок: тупикова, циркуляційна, та комбінована.

*Тупикова схема* застосовується, як правило, у невеликих котелях, які працюють на малов'язких мазутах марок М20 и М40 в якості аварійного та розтопочного палива, а також у котельнях, які споживають рідке паливо як основне, резервне або аварійне. Підігрів палива до температури 85...90 °С за такою схемою здійснюється в витратному баку. Висота від підлоги котельної до нижшого рівня мазуту в баку повинна бути не менше 4м. Це потрібно для того, щоб тиск мазуту перед форсункою був не менше 0,02 МПа.

Тупикова схема не достатньо надійна в експлуатації та має ряд недоліків:

- коливання тиску подачі мазуту внаслідок частої зміни витрати мазуту;
- малі швидкості палива у магістралі при неповному завантаженні обладнання;
- ускладнення подачі палива з магістралі в форсунки після ремонту або тривалої зупинки котлів;
- несприятливі умови роботи тупикових форсунок.

До переваг можна віднести те, що при тупиковій схемі облік витрати палива більш простий, ніж при циркуляційній, так як він ведеться по одному мазутоміру перед котлами.

Тупикова схема застосовується рідко і при цьому треба врахувати та звести до мінімуму вказані вище недоліки, а саме: усі мазутопроводи повинні підігріватися за допомогою паропроводів укладених у кожух з загальною ізоляцією; у самій нижній точці мазутопроводу влаштовується відвод з клапаном для спускання забрудненого палива; мазутопровід повинен мати пристрій для продування парою.

На даний час найбільш зручною в експлуатації є *циркуляційна схема*, яка застосовується при спалювання високов'язких мазутів, а також при роботі котельні постійно на мазуті і короткочасно на газу. При цій схемі обов'язково наявність лінії рециркуляції мазуту з котельні в основну ємність і на всас насосів. Мазутопровід для рециркуляції має менший діаметр, ніж прямий мазутопровід з насосної мазуту до котельні. На рециркуляцію подається приблизно 15 % загальної кількості мазуту, який поступає на котельню. Тиск в мазутопроводі регулюється зливним клапаном. Паропровід, який йде на підігрівачі ізолюється разом з мазутопроводами прямої та зворотної лінії. Для повного обліку витрати мазуту встановлюються мазутоміри, як на прямій лінії, так і на зворотній.

Основний недолік такої схеми – неминучість зливу обробленого та підігрітого мазуту до ємності при зупиненні котлів, що може викликати перегрівання на всасі насосу. До переваг циркуляційної схеми слід віднести:

- наявність лінії рециркуляції, що дозволяє підтримувати мазут в резервуарах в «гарячому» стані, і в свою чергу, уникнути розшарування мазуту;

- при тривалому зберіганні в резервуарах без його витрачання передбачені місцеві секційні парові підігрівачі, наявність яких дозволяє залишати мазут в холоді, при цьому температура мазуту не повинна знижуватися нижче температури застигання;

- запобігається застигання мазуту в трубопроводах.

*Комбінована схема* застосовується при роботі на змінних навантаженнях і частих переходах з газу на мазут, також при роботі на маловязких паливах зі стабільними навантаженнями. Ця схема найбільш прийнятна для котлів, що працюють на високов'язких мазутах.

Мазут на станцію поступає у залізничних цистернах. Для зливу мазуту потрібно попередньо розігріти його до температури 60...70 °С. При відкритому розвантаженні розігрів мазуту здійснюється «відкритою» парою с тиском 0,8...1,3 МПа і температурою 200...250 °С. зливання мазуту здійснюється через нижній зливний прилад само стіканням в зливний лоток. Зливні лотки виробляються з уклоном 1...2 %, що дозволяє мазуту зливатися в прийомну ємність, у якої є трубчаті парові підігрівачі для підтримання необхідної температури мазуту (не нижче 70 °С). Далі мазут попередньо очищується в фільтрах грубої очистки. Після фільтрів він подається в основну ємність, де може зберігатися як в холодному так і в гарячому стані в залежності від роботи котлів. Після резервуару мазут перекачується у витратну ємність. У витратній ємності також підтримується необхідна температура мазуту паровими підігрівачами. Потім він подається на зовнішні мазутні підігрівачі. Перед подачею до котлів мазут проходить останню ступінь очищення – фільтри тонкої очистки. Комбінована схема может



представляють собою тупикову, якщо закрити клапани на лінії рециркуляції від котлів до основного резервуару. Облік палива здійснюється як на прямій так і на зворотній лінії. Регулювання подавання мазуту здійснюється за допомогою регулювального клапану з імпульсом по навантаженню котлів або тиску в них. Переваги комбінованої схеми включають в себе переваги як тупикової так і циркуляційної схем [21].

На даний час циркуляційна схема поділяється на три типи:

1. *Одноступенева (роздільна) схема.* Ця схема з розділенням контурів подачі мазуту, циркуляційного розігріву та перемішування його в резервуарах. Відмінністю схеми є відсутність насосів першого підйому. Мазут зазвичай доставляється залізничним шляхом. Для його прийому встановлюється двоступенева естакада. Надалі розігрітий парою мазут зливається у зливний лоток, звідки само течією потрапляє в прийомні резервуари. У них підтримується певна температура, а також туди зливається рециркуляції з котельні. В резервуарах відбувається підігрів та зберігання мазуту в підігрітому стані. Зберігати мазут в резервуарах «гарячим» вдається при використанні циркуляційного контуру, який представляє собою: резервуар-фільтр грубого очищення – циркуляційні насоси – колектор холодної циркуляції – підігрівачі циркуляційного контуру – колектор гарячої циркуляції – резервуар. Другий контур призначений для підготовки мазуту безпосередньо перед спалюванням. Перевагами такої схеми є: простота обслуговування та висока надійність.

2. *Двоступенева (роздільна) схема.* Ця схема також з розділенням контурів подавання мазуту, циркуляційного підігріву та перемішування його в резервуарах. Після розігріву парою в цистернах та зливу його в зливні лотки мазут само течією зливається до резервуару. Далі він з резервуару відкачується вертикальними погрузними насосами. Мазут зберігається в резервуарах, що обладнані циркуляційним підігрівом. Циркуляційне перемішування та розігрів його в резервуарах здійснюється гарячим мазутом, що подається насосами від підігрівачів мазуту. Циркуляційний контур можна

представити у вигляді: резервуар-фільтр грубого очищення – циркуляційні насоси – колектор холодної циркуляції – підігрівачі циркуляційного контуру – колектор гарячої циркуляції – резервуар. Відмінністю другого контуру, який призначений для підготовки палива до спалювання, від одноступеневої схеми полягає у використанні насосів другого підйому. Надлишки мазуту з котельної лінії циркуляції подаються частково в циркуляційний контур та в контур подачі палива до спалювання. Перевагами такої схеми є: низьконапірні насоси першого підйому, які забезпечують циркуляційний підігрів в резервуарах та подавання мазуту до високо напірних насосів другого підйому; підігрівачі мазуту і фільтри знаходяться під тиском, який створюється насосами першого підйому, що істотно спрощує їх конструкцію; зменшується сумарна витрата електроенергії на привід насосів, так як насоси другого підйому працюють на малов'язкому мазуті.

3. *Двоступенева (сумісна схема).* Це схема з суміщенням контурів подавання мазуту в котельню, циркуляційного розігріву та перемішування його в резервуарах. У даній схемі насосами першого підйому (перша ступень) здійснюється подавання мазуту до насосів другого підйому (друга ступень) на циркуляційний підігрів та перемішування у резервуарах. Попередньо розігрітий мазут з цистерн зливається у зливний лоток. Потім він само течією потрапляє у резервуари, звідки за допомогою насосів подається до резервуарів. Кожен резервуар обладнано пристроями для прийому, підігріву та видачі мазуту. Кожна група резервуарів має наступні загальні магістралі: напорну циркуляційну від насосів першого підйому та підігрівачів; всмоктуючу мазутну, по якій мазут потрапляє до мазутонасосної станції; рециркуляції мазуту. Рециркуляція мазуту необхідна для попередження його розшарування та для циркуляційного його підігріву у резервуарах. Мазут, який поступає на спалювання, прокачується насосами першого підйому до нагрівачів. Далі, очищується в фільтрах тонкого очищення та насосами другого підйому подається до котельні, звідки по лінії рециркуляції потрапляє в напорні циркуляційні мазутопроводи. Перевагами в

порівнянні з одноступеневою схемою є: підігрівачі мазуту та фільтри, що встановлені між насосами першого та другого підйому, знаходяться під тиском низьконапірних насосів першого підйому, що спрощує їх конструкцію та експлуатацію; істотно скорочується сумарна витрата електроенергії на привід насосів. Схема також має ряд недоліків: внаслідок підвищеного тиску мазуту перед форсунками вона більш складна та менш надійна, ніж одноступенева; є можливість обводнення мазуту у підігрівачах, так як в залежності від температури мазуту тиск пари може бути вище тиску мазуту.

В перерахованих схемах підігрів мазуту, що поступає на розігрів та перемішування у резервуарах, здійснюється у виносних підігрівачах. Основна відмінність наведених схем полягає у якості встановленого обладнання, в його типах і марках [22].

На рисунку 1.8 представлена типова схема подачі рідкого палива, який доставляється залізницею у цистернах. Із цистерн 1, які поступають на залізничну естакаду, рідке паливо (мазут) само течією по каналу (трубопроводу) 2 потрапляє до прийомного резервуару 3, звідки перекачується погружними насосами 4 в наземні ( або підземні) витратні резервуари 5.

У резервуари 3 та 5 по лініям 6 та 7 з трубопровода 8 поступає частина підігрітого мазуту, що необхідно для підігріву палива, яке знаходиться у цих баках. Температура мазуту в них при циркуляційному підігріві підтримується на рівні 70...90 °С.

Подача мазуту до парогенераторів виконана за двоступеневою схемою. З колекторів А та Б через механічні фільтри 9 мазут потрапляє до низьконапірних насосів першої ступені 10, за якими розташовані нагрівачі 11,12.

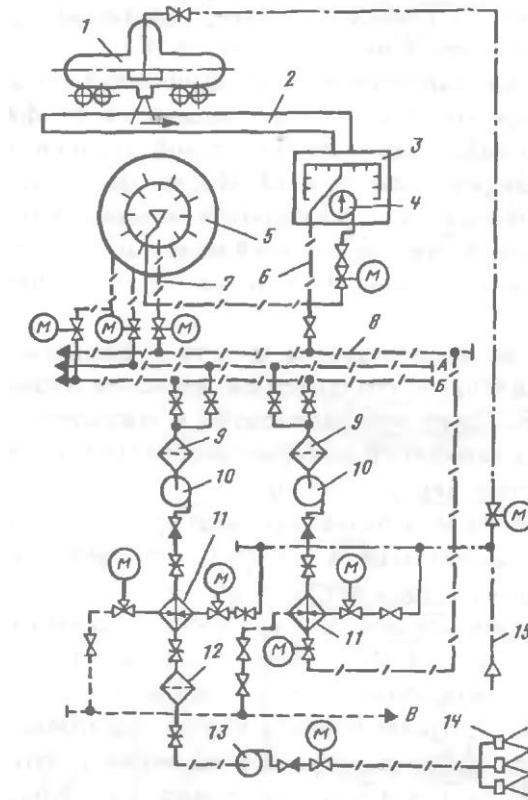


Рисунок 1.8 – Принципова схема мазутного господарства ТЕЦ

Після одного з підігрівачів 11 потік мазуту відводиться в трубопровід рециркуляції 8. Потім через другий фільтр тонкого очищення гарячий мазут потрапляє до високо напірних насосів другого підйому 13 і далі – до пальників котлів 14.

При такій схемі підігрівачі мазуту і фільтри тонкого очищення знаходяться під тиском, який утворюють насоси першого підйому, що дозволить знизити масу цих апаратів та скоротити витрату електроенергії на привід насосів 13, які перекачують підігрітий мазут з меншою в'язкістю.

Насоси першої ступені розвивають максимальний тиск 1,3 МПа. Подача робочих насосів першої і другої ступені приймається рівною 110 % номінальної витрати палива на усі котли з урахуванням надходжень мазуту на рециркуляцію. Після насосів другої ступені 13 тиск мазуту складає 6,4 МПа. Для його підігріву використовується пара з максимальними параметрами  $P=1,6$  МПа,  $t=250$  °С. Він вводиться в схему по лінії 15. Окрім

введення пари до підігрівачів мазуту 11 передбачено також підведення його до цистерни 1, що необхідно для забезпечення зливу мазуту в холодну пору року. Конденсат граючої пари після підігрівачів мазуту відводиться по лінії В. Забруднені нафтопродуктами води повинні проходити очищення, нейтралізацію у спеціальних комплексах. При герметичних підігрівачах мазуту і відсутності забруднень нафтопродуктами конденсат може вводиться безпосередньо у тракт живильної води енергоустановки, інакше, він повинен пройти через систему спеціальної хімічної очистки.

У уніфікованих типових проектах мазутного господарства ТЕЦ та промислово – опалювальних котелень прийнята більш проста схема з однією ступеню насосів (див. рис. 1.9) [23].

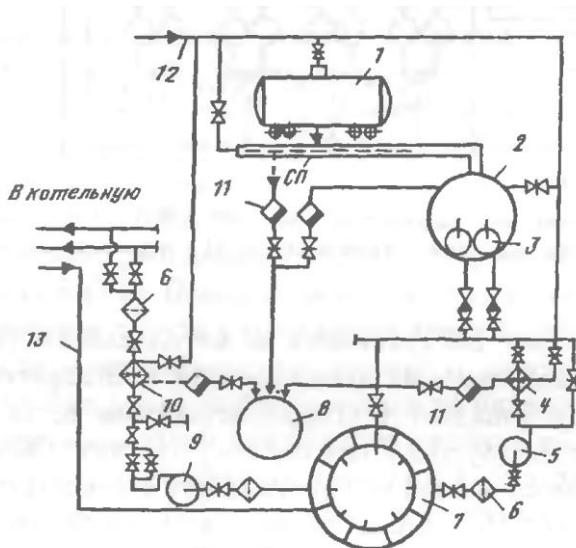


Рисунок 1.9 – Принципова схема мазутного господарства ТЕЦ та промислово – опалювальних котелень

Мазут з цистерн 1 зливається в проміжну ємність, з якої погрузними насосами перекачується в наземний резервуар 7. З нього частина мазуту подається насосом 5 в підігрівач рециркуляції 4 та зворотно в резервуар 7, звідки мазут насосом 9 через підігрівач 10 подається в мазутопроводи котельні, до яких безпосередньо поєднані пальники або форсунки котлів. У необхідних місцях схемою передбачено встановлення механічних фільтрів 6.

Для підігріву мазуту в цистерні 1, ємності 2, підігрівачах 4 та 10 використовується пара, яка поступає з котельні по трубопроводу 12. Конденсат граючої пари з цих резервуарів та апаратів через конденсатовідводчики 11 потрапляє до конденсатного баку 8, з якого відводиться у мазутоловушки або в систему очищення. Обігрів мазутопроводів в необхідних місцях здійснюється за допомогою парових труб - супутників, які укладаються і ізолюються спільно з ними. У схемі передбачено можливість рециркуляційного підігріву мазуту у резервуарі 7 гарячим мазутом по зворотньому трубопроводу<sup>13</sup> [24].

## 2 АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ СТАЦІОНАРНИХ ПІДГРІВАЧІВ МАЗУТУ ТИПУ ПМ

### 2.1 Постановка завдання

Для дослідження режимів роботи підігрівачів, що використовуються при циркуляційному підігріванні мазуту у резервуарних парках, оберемо один підігрівач мазуту, що схематично зображено на рисунку 2.1.

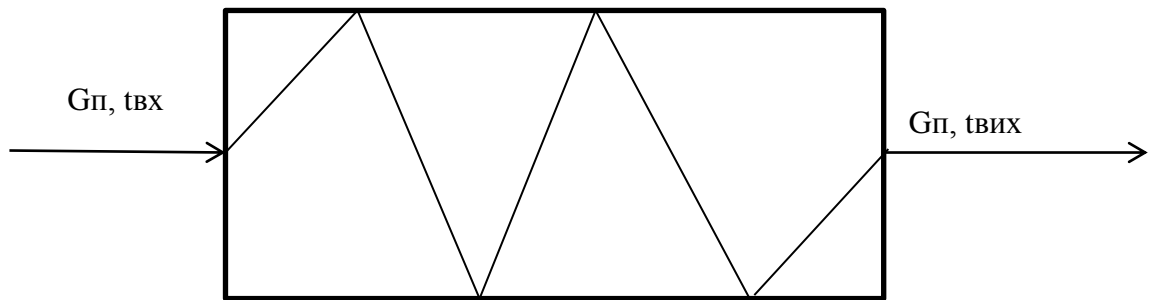


Рисунок 2.1 – Загальна схема підігрівача мазуту

В залежності від конструктивного виконання підігрівачів та режимів роботи температура мазуту на виході з підігрівача може бути постійною або змінною. При невеликій тепловій потужності підігрівача зміною температури на виході з нього можна знехтувати, що відповідає першому режиму роботи підігрівача

$$t_{\text{вих}} = t_{\text{вих0}} = \text{const.} \quad (2.1)$$

При порівняно значній потужності підігрівача по мірі підігрівання мазуту в резервуарах його температура на вході у підігрівач підвищується, що приводить до збільшення температури на виході. При цьому у першому наближенні підвищення температури мазуту у підігрівачі можна вважати постійним.

$$\Delta t_{\Pi} = t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}} = \text{const.} \quad (2.2)$$

Такий режим роботи підігрівача називають другим режимом.

Теплові режими реальних теплообмінних апаратів, у тому числі і підігрівачів мазуту, відрізняються від режимів, що відповідають вище наведеним умовам (2.1) та (2.2), які можуть задовільно відображати реальну картину лише протягом достатньо малого проміжку часу.

У більшості випадків для опису конкретних тепло гідравлічних процесів та режимів роботи теплообмінних апаратів необхідна залежність різниці температур на виході з апарату та вході у нього від температури основного робочого тіла на вході.

$$\Delta t_{\Pi} = f(t_{\text{вх}}). \quad (2.3)$$

При цьому температуру на виході з підігрівача доцільно визначати з (2.3) за допомогою (2.2).

$$t_{\text{вих}} = t_{\text{вх}} + \Delta t_{\Pi}(t_{\text{вх}}). \quad (2.4)$$

Для подальшого дослідження реальних теплових режимів розглянемо конкретні типи стандартних теплообмінних апаратів, що використовуються на сучасних ТЕС.

Таким чином, метою даного дослідження є отримання конкретних розрахункових залежностей температури на виході з підігрівача від його температури на вході для серійних стаціонарних підігрівачів мазуту типу ПМ.

## 2.2 Методика теплового повір очного розрахунку підігрівачів мазуту

Будемо розглядати усі основні характеристики підігрівачів мазуту як функції наступних величин:

$t_{\text{вх}}$  – температура мазуту на вході в підігрівач, °С;

$t_{\text{вих}}$  – температура мазуту на виході з підігрівача, °С;

$R$  – термічний опір забруднень на стінках труб підігрівача, (м·К)/Вт.

Інші параметри підігрівачів мазуту будемо вважати заданими.



Кількість теплоти, що необхідна для підігріву мазуту, Вт

$$Q_M = G_M \cdot c_p (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}). \quad (2.5)$$

Так як поверхня підігрівача має температуру вище ніж температура навколишнього середовища, то в навколишнє середовище передається частка теплоти, яка може бути визначена за формулою

$$Q_{\text{втрат}} = \alpha_k \cdot F_k \cdot \Delta t, \quad (2.6)$$

де  $\alpha_k$  – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні корпусу апарату до зовнішнього середовища, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F_k$  – площа зовнішньої поверхні апарату, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – різниця температур поверхні корпусу та зовнішнього середовища, °С.

Площа зовнішньої поверхні апарату, м<sup>2</sup>

$$F_k = \pi \cdot D_k \cdot H_k, \quad (2.7)$$

де  $D_k$  – діаметр корпусу апарату, м;

$H_k$  – висота корпусу апарату, м.

При наявності ізоляції на корпусі мазутопідігрівача для визначення  $Q_{\text{втрат}}$  використовується наступна формула, Вт

$$Q_{\text{втрат}} = (8,4 + 0,06(t_{\text{із}} - t_{\text{н.с.}})) \cdot F_k \cdot \Delta t, \quad (2.8)$$

де  $t_{\text{із}}$  – температура поверхні ізоляції, °С;

$t_{\text{н.с.}}$  - температура навколишнього середовища, °С.

На практиці часто враховуються втрати теплоти в навколишнє середовище шляхом введення коефіцієнта втрат теплоти в зовнішнє середовище  $\eta_{\text{вт}}$

$$Q_M = (1 - \eta_{\text{ВТ}}) Q_{\text{ВТРАТ}} \quad (2.9)$$

Рівняння теплового балансу для підігрівача мазуту, Вт

$$Q_{\text{П}} = Q_M + Q_{\text{ВТРАТ}}, \quad (2.10)$$

де  $Q_{\text{П}}$  – теплове навантаження підігрівача або кількість теплоти, що віддається парю в підігрівачі за одиницю часу, Вт.

Теплове навантаження підігрівача, Вт

$$Q_{\text{П}} = G_{\text{П}} (h_{\text{П}} - h_{\text{К}}), \quad (2.11)$$

де  $h_{\text{П}}, h_{\text{К}}$  – ентальпія пари, що поступає до апарату та конденсату на виході з нього, кДж/кг.

Різниця ентальпія гріючого теплоносія на вході в підігрівач та на виході з нього для насиченої пари, кДж/кг

$$(h_{\text{П}} - h_{\text{К}}) = r_{\text{К}}, \quad (2.12)$$

де  $r_{\text{К}}$  - теплота конденсації пари при температурі насичення, кДж/кг.

Різниця ентальпія гріючого теплоносія на вході в підігрівач та на виході з нього для перегрітої пари та насиченого конденсату, кДж/кг

$$(h_{\text{П}} - h_{\text{К}}) = c_{\text{рп}} \cdot t_{\text{п.п}} - c_{\text{рп}} \cdot t_{\text{п}} + r_{\text{К}}, \quad (2.13)$$

де  $t_{\text{п.п}}$  – температура перегрітої пари, °С;

$c_{\text{рп}}$  - теплоємність пари при постійному тиску, кДж/(кг·К).

Різниця ентальпія гріючого теплоносія на вході в підігрівач та на виході з нього для перегрітої пари та охолодженого конденсату, кДж/кг

$$(h_{\text{п}} - h_{\text{к}}) = c_{\text{рп}} \cdot t_{\text{п.п}} - c_{\text{рп}} \cdot t_{\text{п}} + r_{\text{к}} \cdot t_{\text{п}} + c_{\text{рк}} \cdot t_{\text{п}} - c_{\text{рп}} \cdot t_{\text{к}}, \quad (2.14)$$

де  $t_{\text{к}}$  – температура охолодженого конденсату, °С;

$c_{\text{рк}}$  - теплоємність конденсату при постійному тиску, кДж/(кг·К).

У більшості випадків температура перегрітої пари та охолодженого конденсату така, що у розглянутому інтервалі температур зміною теплоємностей пари та конденсату можна знехтувати, тобто використовувати середні значення питомих теплоємностей. Тоді рівняння (2.13) та (2.14) приймуть вигляд:

- для перегрітої пари та насиченого конденсату, кДж/кг

$$(h_{\text{п}} - h_{\text{к}}) = c_{\text{рп}} \cdot (t_{\text{п.п}} - t_{\text{п}}) + r_{\text{к}}, \quad (2.15)$$

- для перегрітої пари та охолодженого конденсату, кДж/кг

$$(h_{\text{п}} - h_{\text{к}}) = c_{\text{рп}} \cdot (t_{\text{п.п}} - t_{\text{п}}) + r_{\text{к}} + c_{\text{рк}} (t_{\text{п}} - t_{\text{к}}), \quad (2.16)$$

Витрата гріючої пари, яка необхідна для нагрівання мазуту, кг/с

$$G_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{м}}}{(h_{\text{п}} - h_{\text{к}}) \cdot \eta}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі з зовнішньої сторони трубного пучка від пари, що конденсується, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_{\text{п}} = 2,02 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_{\text{к}} \sqrt{\rho_{\text{к}}^2 \cdot L \cdot n / \mu_{\text{к}} \cdot G_{\text{п}}},$$

де  $\lambda_{\text{к}}$ ,  $\rho_{\text{к}}$ ,  $\mu_{\text{к}}$  – теплопровідність, густина та динамічна в'язкість конденсату;

$n$  – число труб у теплообміннику, од;

$L$  – довжина теплообмінних труб, м;

$\varepsilon$  – поправочний коефіцієнт, що враховує кількість труб у горизонтальному пучці.

Коефіцієнт тепловіддачі від гладкої циліндрової внутрішньої поверхні сталевих труб, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_M = \frac{\lambda_M}{d_{BH}} 1,62 \left( Re_M Pr_M \frac{d_{BH}}{\mu_{CT}} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_M}{\mu_{CT}} \right)^{0,14} \left( 1 + 0,015 Gr_M^{1/3} \right),$$

де  $\lambda_M$ ,  $\mu_M$  – теплопровідність та динамічна в'язкість мазуту при його середній температурі.

Середньологаріфмічний температурний напір, °С

$$\Delta t = \frac{t_{ВИХ} - t_{ВХ}}{\ln \frac{t_{П} - t_{ВХ}}{t_{П} - t_{ВИХ}}}$$

Середня швидкість руху мазуту у гладких трубах, м/с

$$w_M = \frac{4G_M \cdot z_T}{\pi \cdot d_{BH}^2 \cdot n'}$$

де  $z_T$  – число ходів трубного простору.

Число Рейнольдса для мазуту

$$Re = \frac{w_M \cdot d_{BH}}{\nu_M}$$

Коефіцієнт теплопередачі від пари до мазуту, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$k = \left( \frac{1}{\alpha_m} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + R + \frac{1}{\alpha_p} \right)^{-1},$$

де  $R$  – термічний опір шару забруднення стінок,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}$ .

Для отримання конкретних залежностей  $t_{\text{вих}} = f(t_{\text{вх}})$  для підігрівачів мазуту типу ПМ розглянемо у якості прикладу підігрівач марки ПМ -25-6 з номінальною витратою мазуту 1,667 кг/с та температурою насиченої пари 191,6 °С. діапазон зміни температури на вході від 20 °С до температури насиченої пари. Термічний опір шару забруднення стінок  $R=0,001$   $(\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}$ .

На рисунку 2.2 представлено розрахункові залежності температури мазуту на виході з підігрівача від його температури на вході до підігрівача для різних витрат мазуту.

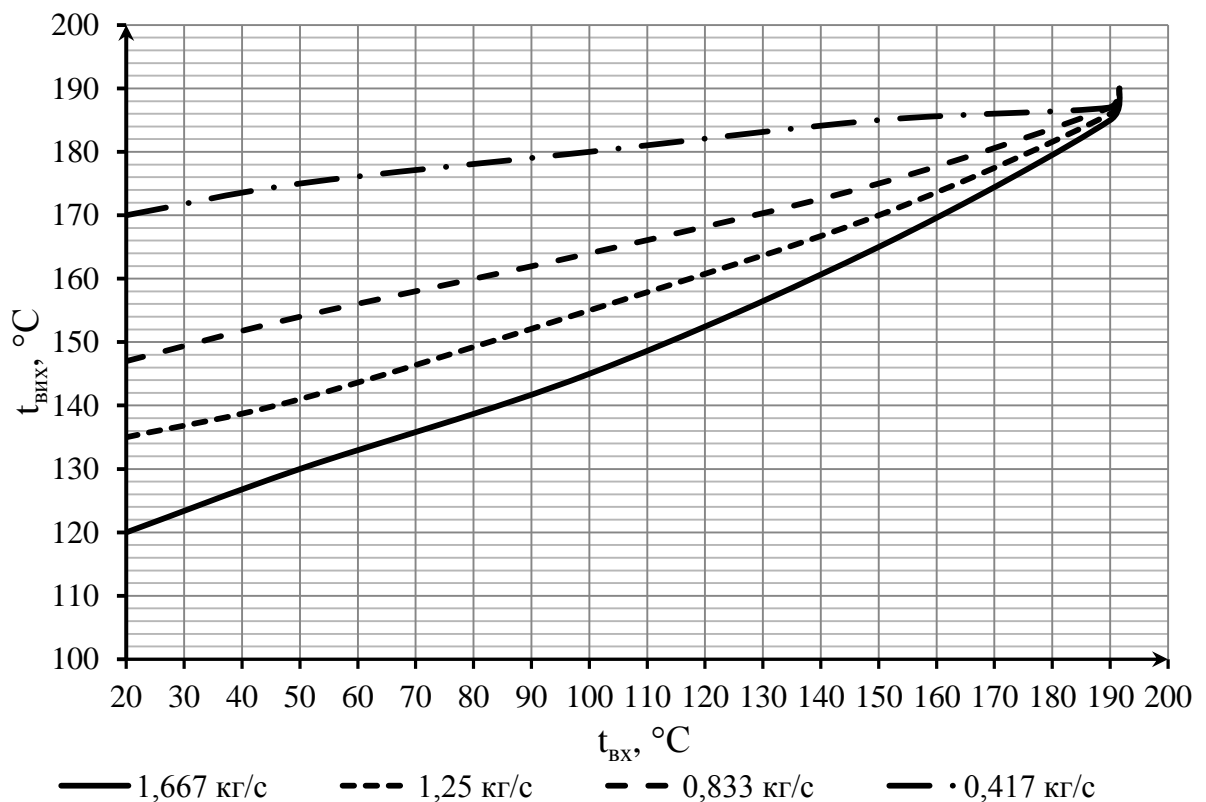


Рисунок 2.2 – Розрахункові залежності температури мазуту на виході з підігрівача ПМ -25-6 від температури на вході

На рисунку 2.3 наведено розрахункові залежності різниці температур мазуту на виході з підігрівача мазуту та на вході до нього від температури мазуту на вході.

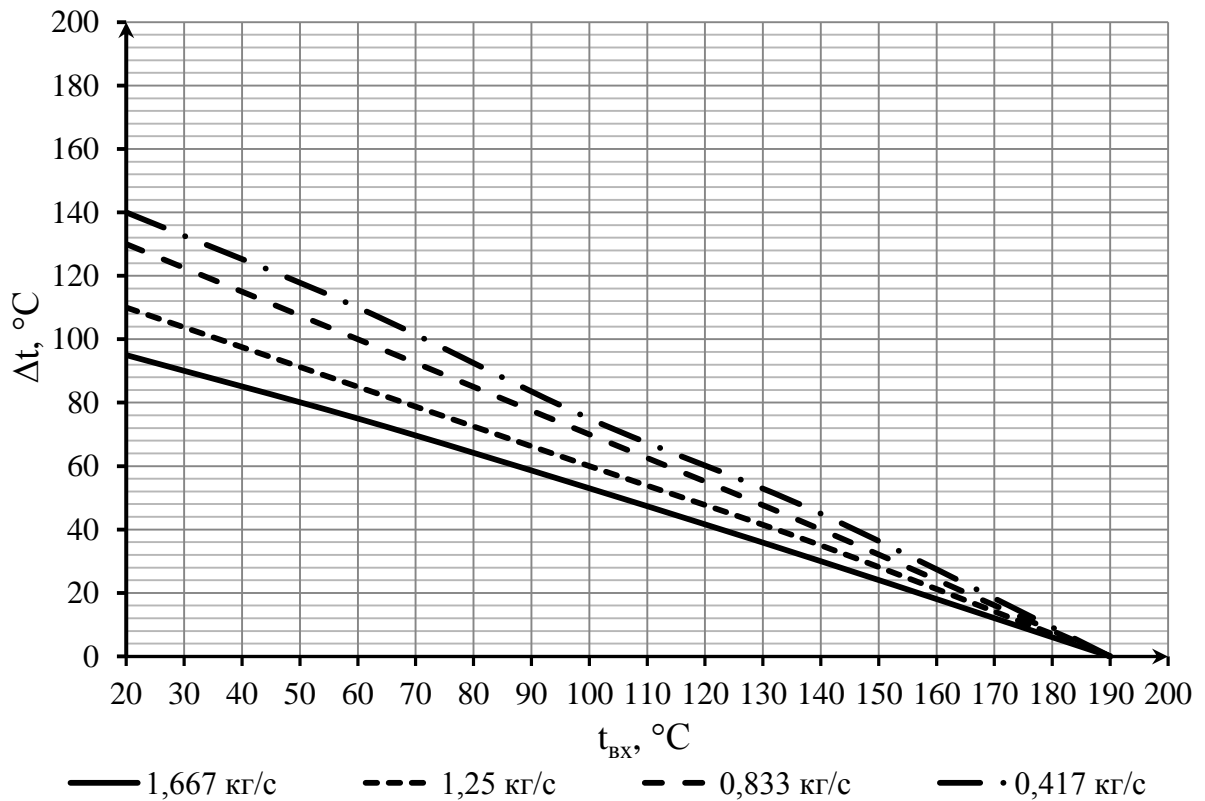


Рисунок 2.3 – Розрахункові залежності різниці температур мазуту на виході з підігрівача ПМ -25-6 та температури на вході до нього

Видно, що на рисунках 2.2 та 2.3 залежності мають лінійних характер та для описання режимів роботи підігрівачів мазуту доцільно побудувати рівняння ліній регресії у вигляді

$$\Delta t_{\Pi}(t_{\text{вх}}) = at_{\Pi} \left( b - \frac{t_{\text{вх}}}{t_{\Pi}} \right).$$

При використанні такої регресійної моделі температура мазуту на виході з підігрівача також лінійно залежить від температури мазуту на вході в нього та може бути представлена у вигляді

$$t_{\text{вих}} = ht_{\text{вх}} + p,$$

де коефіцієнти  $h$  та  $p$  визначаються як

$$h = 1 - a;$$

$$p = abt_{\text{п}}.$$

де  $a$  та  $b$  – коефіцієнти регресійної моделі.

Будемо вважати, що коефіцієнти  $a$  та  $b$  регресійної моделі при заданих значеннях температури пари та термічного опору забруднень є функціями витрати мазуту через підігрівач.

Тоді

$$\Delta t_{\text{п}}(t_{\text{вх}}) = a(G_{\text{м}})t_{\text{п}} \left( b(G_{\text{м}}) - \frac{t_{\text{вх}}}{t_{\text{п}}} \right).$$

Для дослідження характеру цих залежностей необхідно побудувати залежності  $a$  та  $b$  від витрати мазуту через підігрівач для конкретних значень  $t_{\text{п}}$  та  $R$ .

У результаті розрахунків функції  $a(G_{\text{м}})$  за лінійною, квадратичною та логарифмічною апроксимаціям було отримано, що найбільш точною є квадратична апроксимація.

$$a(G_{\text{м}}) = aa \left( \frac{G_{\text{м}}}{G_{\text{мmax}}} \right)^2 + ab \left( \frac{G_{\text{м}}}{G_{\text{мmax}}} \right) + ac.$$

З результатів розрахунку  $b(G_{\text{м}})$  виходить, що на коефіцієнт  $b$  майже не впливає витрата мазуту через підігрівач і цей коефіцієнт приблизно дорівнює 1.

$$b(G_{\text{м}}).$$

Рівнянням, що пов'язує температуру мазуту на виході з підігрівача з температурою на вході до нього є

$$t_{\text{вих}} = h(G_M)t_{\text{вх}} + p(G_{\text{п}}).$$

$$h(G_M) = 1 - a(G_M).$$

$$p(G_M) = a(G_M)b(G_M)t_{\text{п}}.$$

Результати розрахунків коефіцієнтів регресійної моделі, які отримані для умов номінальної температури пари та відсутності забруднень на тепло передаючих поверхнях підігрівачів мазуту типу ПМ наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти регресійної моделі для підігрівачів мазуту типу ПМ

Коефіцієнт	ПМ-25-6	ПМ-40-15	ПМ-40-30	ПМ-10-60	ПМ-10-120
	Температура пари, °С				
	191,6	180	180	180	180
<i>aa</i>	0,146	0,32	0,070	0,070	0,073
<i>ab</i>	-0,539	-0,824	-0,440	-0,441	-0,446
<i>ac</i>	1,051	1,063	1,049	1,049	1,049

Похибка апроксимації складає 1%. На рисунку 2.4 представлено залежності теплової потужності підігрівача ПМ-25-6 від температури на вході до нього для різних значень витрати мазуту при заданих  $R$  та  $t_{\text{п}}$ , які мають лінійний характер.

З рисунку 2.4 бачимо, що по мірі зростання температури мазуту на вході в підігрівач знижується значення його теплової потужності.



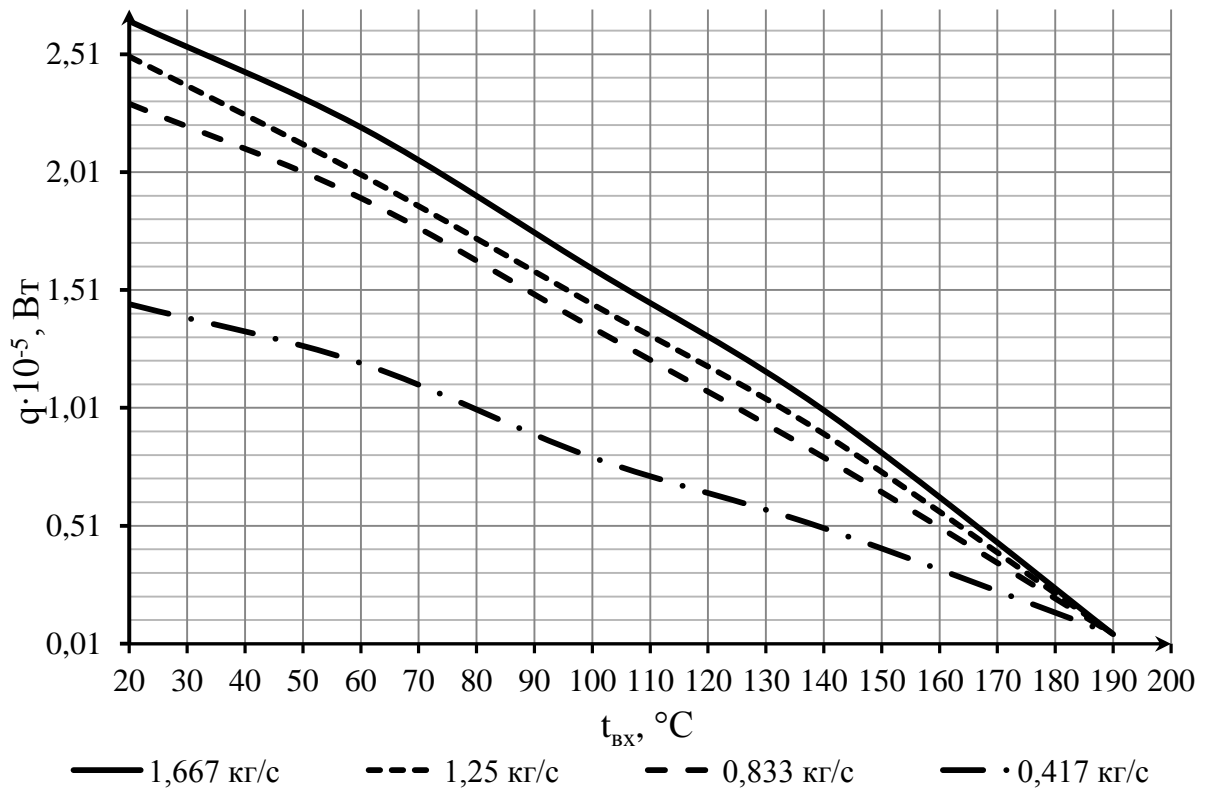


Рисунок 2.4 – Розрахункові залежності теплових навантажень підігрівача ПМ -25-6 від температури на вході до нього для різних значень витрати мазуту

На практиці при циркуляційному підігріванні мазуту в резервуарах розраховується максимально необхідна кількість пари для найменшого значення температури на вході.

Проведені розрахунки підтвердили висновок про слабкий вплив витрати пари на процес нагрівання мазуту у розглянутому діапазоні зміни температури на вході.

Це також підтверджується графіками залежностей коефіцієнта теплопередачі від пари до мазуту (див. рис. 2.5), коефіцієнта тепловіддачі від стінки до мазуту (див. рис. 2.6), коефіцієнта тепловіддачі від пари до стінки (див. рис. 2.7).

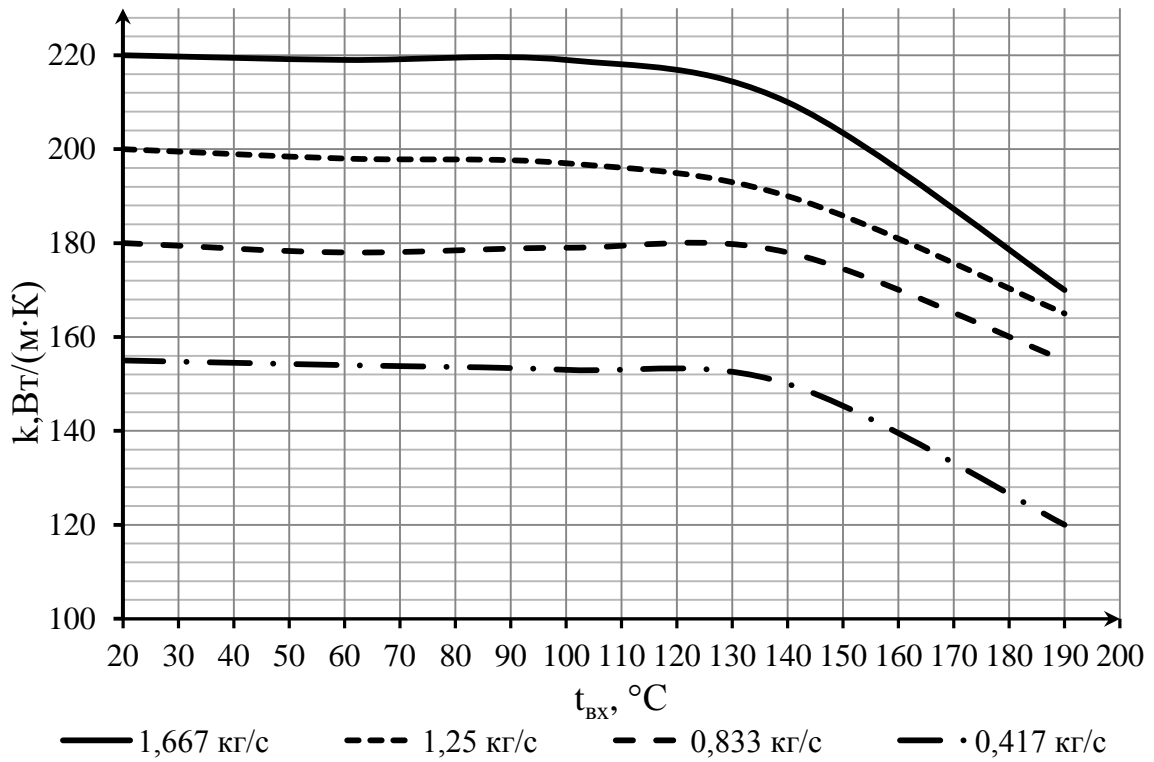


Рисунок 2.5 – Розрахункові залежності коефіцієнту теплопередачі підігрівача ПМ -25-6 від пари до мазуту

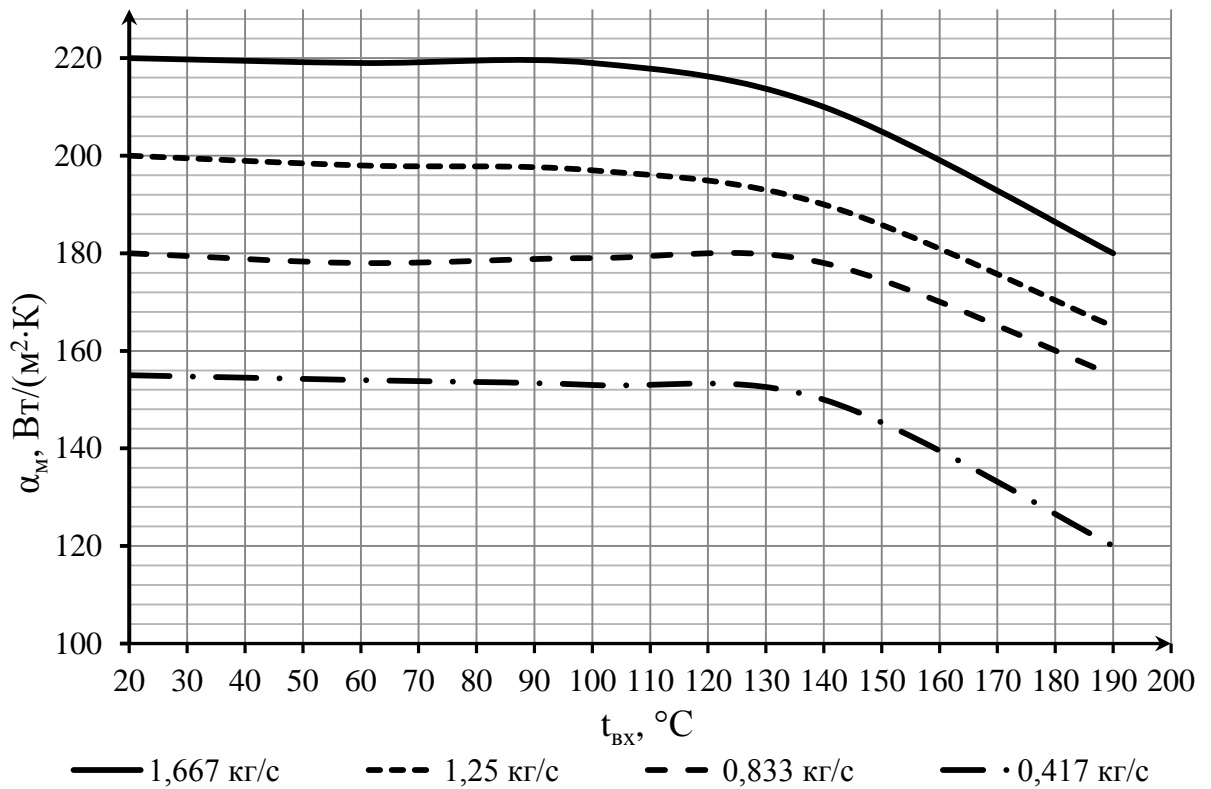


Рисунок 2.6 – Розрахункові залежності коефіцієнту тепловіддачі від стінки до мазуту

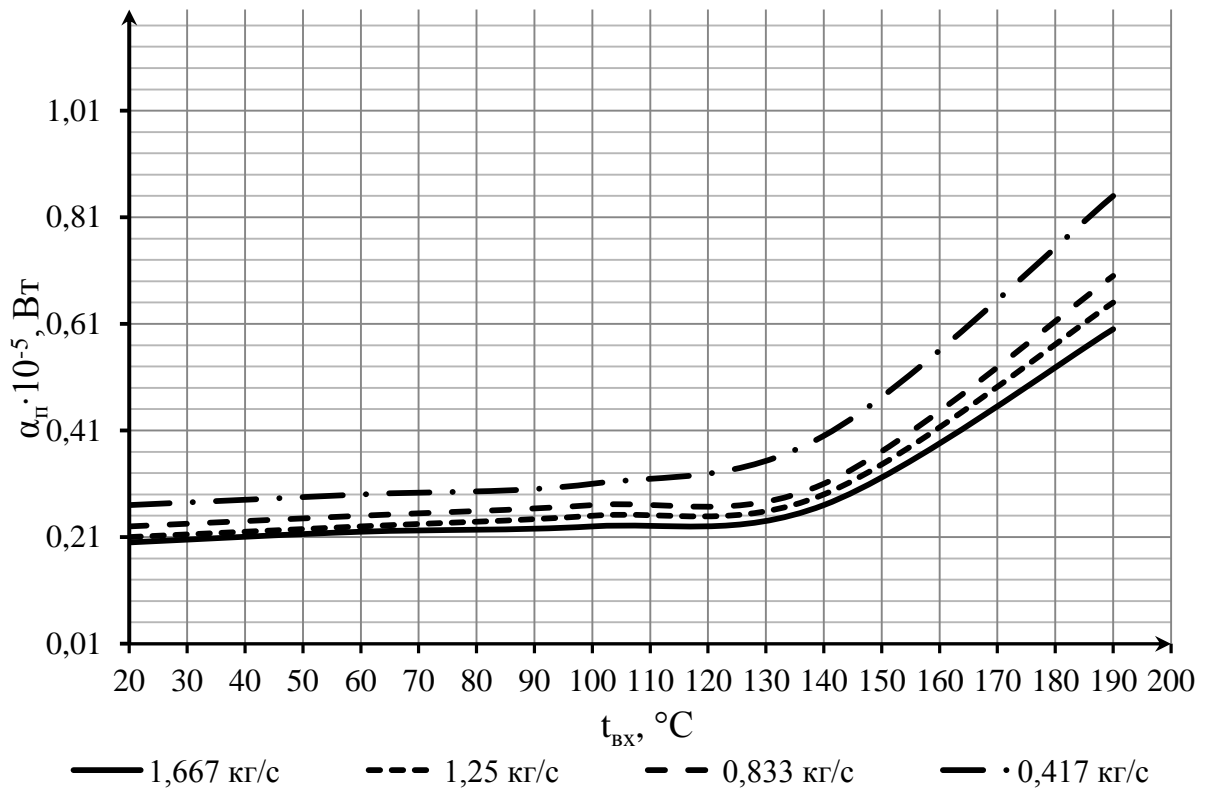


Рисунок 2.7 – Розрахункові залежності коефіцієнту тепловіддачі від пари до стінки

У випадку відсутності даних о значенні термічного опору шару забруднень замість раніше визначеної регресійної моделі можна запропонувати модель, що враховує вплив  $R$  на  $\Delta t_{\pi}$ .

$$\Delta t_{\pi}(t_{\text{BX}}) = a(G_{\text{M}}, R) t_{\pi} \left( b(R) - \frac{t_{\text{BX}}}{t_{\pi}} \right).$$

$$a(G_{\text{M}}, R) = aa(R) \left( \frac{G_{\text{M}}}{G_{\text{Mmax}}} \right)^2 + ab(R) \left( \frac{G_{\text{M}}}{G_{\text{Mmax}}} \right) + ac(R).$$

Характер впливу термічного опору шару забруднень  $R$  на значення  $a(G_{\text{M}}, R)$  та  $b(R)$  показаний на рисунках 2.8 та 2.9 у вигляді залежностей  $aa(R)$ ,  $ab(R)$ ,  $ac(R)$  та  $b(R)$ .

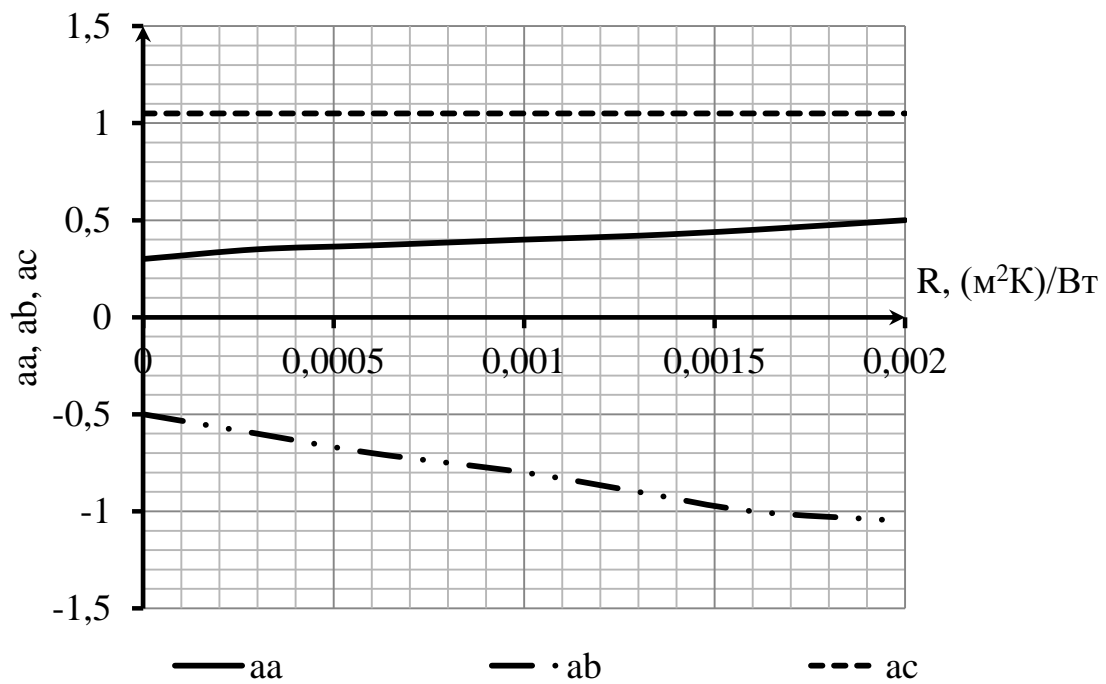


Рисунок 2.8 - Залежності коефіцієнтів  $aa$ ,  $ab$ ,  $ac$  регресійної моделі від термічного опору шару забруднень

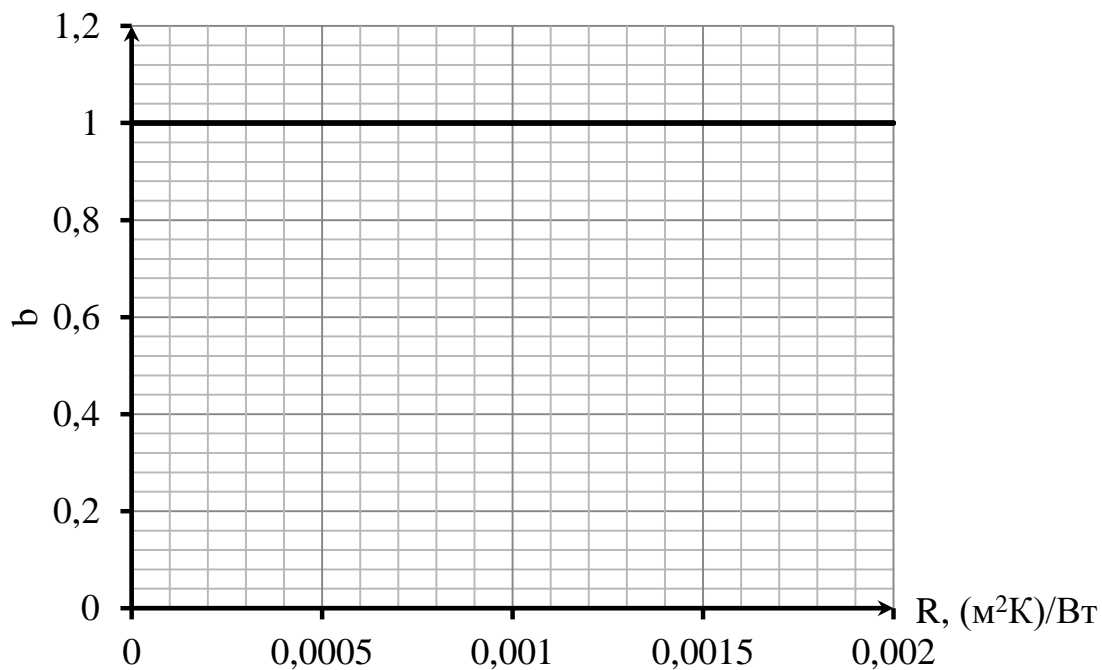


Рисунок 2.9 - Залежність коефіцієнту  $b$  регресійної моделі від термічного опору шару забруднень

Залежності  $aa - ac$  мають майже лінійний характер та можуть бути описані за допомогою рівняння

$$a(G_M, R) = \left(aaa \left(\frac{R}{R_{max}}\right) + aab\right) \left(\frac{G_M}{G_{Mmax}}\right)^2 + \left(aba \left(\frac{R}{R_{max}}\right) + aab\right) \left(\frac{G_M}{G_{Mmax}}\right) + \left(aca \left(\frac{R}{R_{max}}\right) + acb\right).$$

Коефіцієнт  $b(R)$  як видно з рисунку 2.9 не залежить від  $R$ , отже

$$b = 1.$$

Лінійна залежність температури мазуту на виході з підігрівача від температури мазуту на вході в нього прийме вид

$$t_{вих} = h(G_M, R)t_{вх} + p(G_M, R).$$

$$h(G_M, R) = 1 - a(G_M, R).$$

$$p(G_M, R) = a(G_M, R)b(G_M, R)t_{п}.$$

Коефіцієнти нової регресійної моделі були розраховані для кожного підігрівача за допомогою вбудованих функцій Mathcad та зведені до таблиці 2.2.

Таким чином, за значеннями відомих параметрів: витрати мазуту через підігрівач, температур мазуту на вході в підігрівач та на виході з нього та по визначеним коефіцієнтам рівняння регресії може бути розраховано термічний опір шару забруднень як результат вирішення лінійного рівняння.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти регресійної моделі для підігрівачів мазуту типу ПМ

Коефіцієнт	ПМ-25-6	ПМ-40-15	ПМ-40-30	ПМ-10-60	ПМ-10-120
	Температура пари, °С				
	191,6	180	180	180	180
<i>aaa</i>	0,306	0,271	0,220	0,221	0,220
<i>aab</i>	0,151	0,331	0,069	0,070	-0,073
<i>aba</i>	-0,503	-0,401	-0,384	-0,385	-0,384
<i>abb</i>	-0,558	-0,845	-0,448	-0,449	-0,453
<i>aca</i>	0,019	-0,004	0,027	0,027	0,027
<i>acb</i>	1,054	1,066	1,051	1,051	1,051

Іноді на практиці виникають ситуації, коли необхідно використовувати пару з параметрами, що відрізняються від номінальних. В такому випадку рівняння отримані для номінальних параметрів пари не можливо застосовувати і слід використовувати більш повну регресійну модель.

### 2.3 Тепловий розрахунок підігрівачів мазуту

Підігрівачі мазуту, як і інше обладнання ТЕС працюють у непереривному тепловому режимі і характеризуються малою тепловою інерційністю. Тому усі розрахунки проводять при стаціонарному тепловому режимі. Підігрівачі ТЕС відносяться до класу рекуперативних теплових апаратів, відповідно основними рівняннями для їх теплового розрахунку є рівняння теплового балансу та теплопередачі.

В якості гарячого теплоносія використовується пара від відборів турбіни, нагрів мазуту здійснюється за рахунок конденсації пари через стінки каналів. При цьому досить часто використовується перегріта пара. Як показано у [28], процес конденсації перегрітої пари виникає при зіткненні з

по верхньою, яка має температуру нижчу, ніж температура насичення. Це значить, що для початку конденсації в підігрівачах мазуту немає необхідності у зниженні температури усієї маси перегрітої пари до температури насичення, тобто пара стає насиченою лише у стінки каналів по мірі його охолодження, а вдалі від стінки буде залишатися перегрітою.

Теоретично та експериментально доведено [29], що при конденсації перегрітої пари значення питомого теплового потоку майже таке ж саме, як і для насиченої пари. Тому коефіцієнт тепловіддачі для перегрітої пари, що конденсується, можна розраховувати за формулами для насиченої пари але при цьому слід враховувати теплоту перегріву, кВт/кг

$$q_n = c_p \cdot (t_n - t_s),$$

де  $t_n$ ,  $t_s$  – температури перегрітої та насиченої пари, °С;

$c_p$  – теплоємність перегрітої пари при заданому тиску, кДж/(кг·К).

тоді у розрахункові формули необхідно підставляти не теплоту конденсації  $r_k$ , а значення

$$r' = r_k + q_n.$$

За різницю температур, у тому числі і у формулах для розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі, приймають

$$\Delta t = t_s - t_{\text{н}0},$$

де  $t_{\text{ст}}$  – температура поверхні, на якій відбувається конденсація, °С.

Однак різниця незначна і на практиці їй нехтують.

Таким чином, рівняння теплового балансу для підігрівачів мазуту з урахуванням втрат в навколишнє середовище має стандартний вид

$$Q = G_n \cdot c_{pk} \cdot \rho_k \cdot (t_s - t_{cm1}) + Q_{\text{впрат}} = G_m \cdot c_{pm} \cdot \rho_m \cdot (t_{2m} - t_{1m}),$$

де  $G_{\text{п}}$  – витрата пари, кг/с;

$c_{pk}, \rho_k$  - питома теплоємність та густина конденсату, кДж/(кг·К), кг/м<sup>3</sup>;

$c_{pm}, \rho_m$  - питома теплоємність та густина мазуту при середній температурі, кДж/(кг·К), кг/м<sup>3</sup>;

$t_{2m}, t_{1m}$  - початкова та кінцева температура мазуту на вході та виході з підігрівача, °С;

$Q_{\text{втрат}}$  – теплові втрати в навколишнє середовище, Вт.

В загальному випадку, теплові втрати при відсутності ізоляції, Вт

$$Q_{\text{втрат}} = \alpha_k \cdot F_k \cdot \Delta t \quad ,$$

де  $\alpha_k$  - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні корпусу апарату до навколишнього повітря, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F_k$  – площа зовнішньої поверхні апарату, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – різниця температур зовнішньої поверхні корпусу та навколишнього повітря, °С.

Теплофізичні характеристики мазуту розраховуються при його середній температурі у підігрівачі.

При повірочному розрахунку підігрівачів мазуту типу ПМ у першому наближенні задаються кінцевою температурою мазуту  $t_{2m}$ , приймаючи її відмінною від номінальної на деяке значення. Вибір оптимального значення для першого наближення  $t_{2m}$  для усіх марок підігрівачів ПМ рекомендовано розраховувати за формулою

$$(t_{2m})_0 = a + b \cdot P_{\text{сп}} + c \cdot G_m + dt_{1m} \quad ,$$

де значення коефіцієнтів a, b, c і d наведені у таблиці 2.1.



Таблиця 2.3 - Значення коефіцієнтів для вибору у першому наближенні кінцевої температури мазуту при повірочному розрахунку підігрівачів мазуту марок ПМ

Марка підігрівача мазуту	a	b	c	d
ПМ-40-15	142,7	6,7	-9000	0,38
ПМ-40-30	142,7	6,7	-4500	0,38
ПМ-10-60	108,9	35	-1750	0,38
ПМ-10-120	131,5	25	-1125	0,38

#### 2.4 Вихідні дані для теплового розрахунку підігрівача мазуту ПМ-25-6

Вихідні дані:

- марка мазуту – М100;
- витрата мазуту –  $G_m = 0,04 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- початкова температура мазуту –  $t_{1m} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- номінальна кінцева температура мазуту –  $t_{2m} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- тиск гріючої пари –  $P_{гр} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ;
- температура насиченої пари –  $t_s = 191,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- матеріал труб – сталь;
- теплопровідність матеріалу труб –  $\lambda_{ст} = 46,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

Геометричні характеристики апарату:

- число труб –  $n = 388 \text{ од.}$ ;
- число ходів трубного простору  $z_T = 12$ ;
- довжина труб –  $L = 10 \text{ м}$ ;
- зовнішній діаметр труб –  $d_3 = 0,038 \text{ м}$ ;
- внутрішній діаметр труб –  $d_b = 0,033 \text{ м}$ ;
- площа поверхні теплообміну –  $F = 400 \text{ м}^2$ .

Теплофізичні властивості конденсату:

- густина –  $\rho_k = 880 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

- теплопровідність –  $\lambda_k=0,671$  Вт/(м·К);
- кінематична в'язкість –  $\nu_k=0,141 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;
- питома теплота пароутворення –  $r_k=1968 \cdot 10^3$  Дж/кг.

## 2.5 Тепловий розрахунок підігрівача мазуту ПМ-25-6

Для того щоб знайти розрахункові  $t_{2m}$  та  $F$  задаємося кроком зовнішньої ітераційної процедури, виходячи з рекомендацій  $h_t=2$  °С.

Визначаємо середню температуру мазуту, попередньо задаємося, що для підігрівача ПМ-25-6  $t_{2m} = 140$  °С, °С

$$\bar{t}_{2m} = 0,5 \cdot (t_{1m} + t_{2m}),$$

$$\bar{t}_{2m} = 0,5 \cdot (60 + 140) = 100.$$

Визначаємо теплофізичні властивості мазуту при 100 °С:

- густина, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_m = [0,881 - 0,00304 \cdot (t - 68)] \cdot 10^3;$$

$$\rho_m = [0,881 - 0,00304 \cdot (100 - 68)] \cdot 10^3 = 783,72.$$

- коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)

$$\lambda_m = 0,158 - 0,0002093 \cdot (t - 20);$$

$$\lambda_m = 0,158 - 0,0002093 \cdot (100 - 20) = 0,1412.$$

- питома теплоємність, кДж/(кг·К)

$$c_{\rho m} = 1,7364 - 0,00251 \cdot t;$$

$$c_{\rho m} = 1,7364 - 0,00251 \cdot 100 = 1,987.$$

– коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с

$$\nu_m = \{\exp(\exp[9,8555 - 3,745 \cdot \lg(t + 273)]) - 0,8\} \cdot 10^{-6};$$

$$\nu_m = \{\exp(\exp[9,8555 - 3,745 \cdot \lg(100 + 273)]) - 0,8\} \cdot 10^{-6} = 4,67 \cdot 10^{-5}.$$

– коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с

$$\mu_m = \nu_m \cdot \rho_m;$$

$$\mu_i = 4,67 \cdot 10^{-5} \cdot 783,72 = 0,0366.$$

Теплова потужність підігрівача мазуту, Вт

$$Q_m = G_m \cdot c_{\rho m} \cdot \rho_m \cdot (t_{2m} - t_{1m});$$

$$Q_i = 0,04 \cdot 1,987 \cdot 783,72 \cdot (140 - 60) = 4983205.$$

Задаємося коефіцієнтом теплових втрат в навколишнє середовище

$$\eta_{втрат} = 0,97.$$

Витрат пари, що гріє, кг/с

$$G_n = \frac{Q_m}{r_k \cdot \eta_{втрат}};$$

$$G_n = \frac{4983205}{1968 \cdot 10^3 \cdot 0,97} = 2,6104.$$

Починаємо внутрішню ітераційну процедуру розрахунку температури стінки  $t_{ct1}$ .

Задаємося значенням температурного напору пара- стінка  $\Delta t_1 = 0$  °C. Тоді

$$t_{ct1} = t_s - \Delta t_1 = 191,6 - 0 = 191,6 \text{ °C}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі зі сторони пари, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\bar{\alpha}_n = 2,02 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_k \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_k^2 \cdot L \cdot n}{\mu_k \cdot G_n}},$$

де L – довжина нагрівальних елементів, м;

$\varepsilon$  - поправочний коефіцієнт на число труб, при  $n > 100$   $\varepsilon = 0,6$ ;

$\lambda_k$ ,  $\mu_k$ ,  $\rho_k$  – відповідно, коефіцієнт теплопровідності, динамічна в'язкість та густина пари, що конденсується.

Динамічна в'язкість, Па·с

$$\mu_k = \nu_k \cdot \rho_k;$$

$$\mu_m = 0,141 \cdot 10^{-6} \cdot 880 = 1,24 \cdot 10^{-4}.$$

Тоді

$$\bar{\alpha}_n = 2,02 \cdot 0,6 \cdot 0,671 \cdot \sqrt[3]{\frac{880^2 \cdot 10 \cdot 388}{1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 2,6104}} = 17062.$$

Знаходимо значення температури стінки труби зі сторони мазуту, °C

$$t_{cm2} = t_{cm1} - \bar{\alpha}_n \cdot \Delta t_1 \cdot \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}};$$

$$t_{cm2} = 191,6 - 17062 \cdot 0 \cdot \frac{0,0025}{46,5} = 191,6.$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі зі сторони мазуту, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_m = \frac{\lambda_m}{d_{вн}} \cdot 1,62 \cdot \left( \text{Re}_m \cdot \text{Pr}_m \cdot \frac{d_{вн}}{L} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_m}{\mu_{cm}} \right)^{0,14} \cdot \left( 1 + 0,015 \cdot \text{Gr}_m^{1/3} \right).$$

Число Рейнольдса для мазуту

$$\text{Re}_m = \frac{W_m \cdot d_{вн}}{\nu_m},$$

де  $W_m$  – швидкість мазуту, м/с.

Швидкість мазуту, м/с

$$W_m = \frac{4 \cdot G_m \cdot z_m}{\pi \cdot d_{вн}^2 \cdot n};$$

$$W_m = \frac{4 \cdot 0,04 \cdot 12}{3,14 \cdot 0,033^2 \cdot 388} = 1,46.$$

Тоді

$$\text{Re}_m = \frac{1,46 \cdot 0,033}{4,67 \cdot 10^{-5}} = 1022.$$

Число Прандтля

$$\text{Pr}_m = \frac{\nu_m \cdot c_{p,m} \cdot \rho_m}{\lambda_m};$$

$$\text{Pr}_m = \frac{4,67 \cdot 10^{-5} \cdot 1987 \cdot 783,72}{0,1412} = 515.$$

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення, 1/°C

$$\beta_m = \frac{\rho_{1,m} - \rho_{2,m}}{\rho_{2,m} \cdot (t_{2,m} - t_{1,m})};$$

$$\beta_m = \frac{905,32 - 662,12}{662,12 \cdot (140 - 60)} = 0,00459.$$

Температурний натиск, °C

$$\Delta t_2 = t_{cm2} - \bar{t}_m;$$

$$\Delta t_2 = 191,6 - 100 = 91,6.$$

Число Грасгофа

$$Gr_m = \frac{g \cdot \beta_m \cdot \Delta t_2 \cdot d_{вн}^3}{\nu_m^2};$$

$$Gr_i = \frac{9,81 \cdot 0,00459 \cdot 91,6 \cdot 0,033^3}{(4,67 \cdot 10^{-5})^2} = 67919.$$

Густина мазуту при температурі  $t_{ст2}$ , кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_i = [0,881 - 0,00304 \cdot (t - 68)] \cdot 10^3;$$

$$\rho_m = [0,881 - 0,00304 \cdot (191,6 - 68)] \cdot 10^3 = 505,26.$$

Коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с

$$\nu_m = \{\exp(\exp[9,8555 - 3,745 \cdot \lg(t + 273)]) - 0,8\} \cdot 10^{-6};$$

$$\nu_m = \{\exp(\exp[9,8555 - 3,745 \cdot \lg(191,6 + 273)]) - 0,8\} \cdot 10^{-6} = 4,654 \cdot 10^{-6}.$$

Динамічна в'язкість мазуту при температурі  $t_{ст2}$ , Па·с

$$\mu_{ст} = \nu_{ст} \cdot \rho_{ст}$$

$$\mu_{ст} = 4,654 \cdot 10^{-6} \cdot 505,26 = 0,002351.$$

Тоді середній коефіцієнт тепловіддачі зі сторони мазуту, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_m = \frac{0,1412}{0,033} \cdot 1,62 \cdot \left(1022 \cdot 515 \cdot \frac{0,033}{10}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{0,0366}{0,002351}\right)^{0,14} \cdot (1 + 0,015 \cdot 67919^{1/3}) = 197,3$$

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

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_m} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_n}};$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{197,26} + \frac{0,0025}{46,5} + \frac{1}{17062}} = 192,9.$$

Середньологаріфмічний температурний напір, °С

$$\Delta \bar{t} = \frac{t_{2м} - t_{1м}}{\ln \frac{t_s - t_{1м}}{t_s - t_{2м}}};$$

$$\Delta \bar{t} = \frac{140 - 60}{\ln \frac{191,6 - 60}{191,6 - 140}} = 85,45.$$

Розраховуємо  $\Delta t_1'$

$$\Delta t_1' = \frac{k \cdot \Delta \bar{t}}{\bar{\alpha}_n};$$

$$\Delta t_1' = \frac{192,9 \cdot 85,45}{17062} 0,97.$$

Похибка розрахунку по першій внутрішній ітерації

$$\varepsilon_t = \left| \frac{\Delta t_1 - \Delta t_1'}{\Delta t_1} \right| = \frac{0 - 0,97}{0,97} = 1.$$

Так як похибка більше ніж 0,03...0,5, то виконуємо увесь розрахунок спочатку, до виконання умови  $\varepsilon_t < 0,03...0,5$ .

У даному випадку в першій зовнішній ітерації здійснено дві внутрішні ітерації. Результати розрахунку за останньою внутрішньою ітерацією наступні:

- середній коефіцієнт тепловіддачі зі сторони мазуту, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_m = 195,6;$$

- коефіцієнт тепловіддачі зі сторони пари, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\bar{\alpha}_n = 17062;$$

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

$$k = 191,4;$$



– середньологаріфмічний температурний напір, °С

$$\Delta \bar{t} = 85,45.$$

## 2.6 Тепловий розрахунок підігрівачів мазуту великої потужності

Підігрівачі мазуту, як і інше обладнання ТЕС працюють у неперервному тепловому режимі і характеризуються малою тепловою інерційністю. Тому усі розрахунки проводять при стаціонарному тепловому режимі. Підігрівачі ТЕС відносяться до класу рекуперативних теплових апаратів, відповідно основними рівняннями для їх теплового розрахунку є рівняння теплового балансу та теплопередачі.

В якості гарячого теплоносія використовується пара від відборів турбіни, нагрів мазуту здійснюється за рахунок конденсації пари через стінки каналів. При цьому досить часто використовується перегріта пара. Як показано у [28], процес конденсації перегрітої пари виникає при зіткненні з по верхньою, яка має температуру нижчу, ніж температура насичення. Це значить, що для початку конденсації в підігрівачах мазуту немає необхідності у зниженні температури усієї маси перегрітої пари до температури насичення, тобто пара стає насиченою лише у стінки каналів по мірі його охолодження, а вдалі від стінки буде залишатися перегрітою.

Теоретично та експериментально доведено [29], що при конденсації перегрітої пари значення питомого теплового потоку майже таке ж саме, як і для насиченої пари. Тому коефіцієнт тепловіддачі для перегрітої пари, що конденсується, можна розраховувати за формулами для насиченої пари але при цьому слід враховувати теплоту перегріву, кВт/кг

$$q_n = c_p \cdot (t_n - t_s),$$

де  $t_n$ ,  $t_s$  – температури перегрітої та насиченої пари, °С;

$c_p$  – теплоємність перегрітої пари при заданому тиску, кДж/(кг·К).

тоді у розрахункові формули необхідно підставляти не теплоту конденсації  $r_k$ , а значення

$$r' = r_k + q_n.$$

За різницю температур, у тому числі і у формулах для розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі, приймають

$$\Delta t = t_s - t_{\bar{n}\delta},$$

де  $t_{ст}$  – температура поверхні, на якій відбувається конденсація, °С.

Однак різниця незначна і на практиці їй нехтують.

Таким чином, рівняння теплового балансу для підігрівачів мазуту з урахуванням втрат в навколишнє середовище має стандартний вид

$$Q = G_n \cdot c_{pk} \cdot \rho_k \cdot (t_s - t_{cm1}) + Q_{втрат} = G_m \cdot c_{pm} \cdot \rho_m \cdot (t_{2m} - t_{1m}),$$

де  $G_n$  – витрата пари, кг/с;

$c_{pk}, \rho_k$  - питома теплоємність та густина конденсату, кДж/(кг·К), кг/м<sup>3</sup>;

$c_{pm}, \rho_m$  - питома теплоємність та густина мазуту при середній температурі, кДж/(кг·К), кг/м<sup>3</sup>;

$t_{2m}, t_{1m}$  - початкова та кінцева температура мазуту на вході та виході з підігрівача, °С;

$Q_{втрат}$  – теплові втрати в навколишнє середовище, Вт.

В загальному випадку, теплові втрати при відсутності ізоляції, Вт

$$Q_{втрат} = \alpha_k \cdot F_k \cdot \Delta t,$$

де  $\alpha_k$  - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні корпусу апарату до навколишнього повітря, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F_k$  – площа зовнішньої поверхні апарату,  $m^2$ ;

$\Delta t$  – різниця температур зовнішньої поверхні корпусу та навколишнього повітря,  $^{\circ}C$ .

Теплофізичні характеристики мазуту розраховуються при його середній температурі у підігрівачі.

При повірочному розрахунку підігрівачів мазуту типу ПМ у першому наближенні задаються кінцевою температурою мазуту  $t_{2m}$ , приймаючи її відмінною від номінальної на деяке значення. Вибір оптимального значення для першого наближення  $t_{2m}$  для усіх марок підігрівачів ПМ рекомендовано розраховувати за формулою

$$(t_{2m})_0 = a + b \cdot P_{ep} + c \cdot G_m + dt_{1m},$$

де значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$ ,  $c$  і  $d$  наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.5 - Значення коефіцієнтів для вибору у першому наближенні кінцевої температури мазуту при повірочному розрахунку підігрівачів мазуту марок ПМ

Марка підігрівача мазуту	a	b	c	d
ПМ-40-15	142,7	6,7	-9000	0,38
ПМ-40-30	142,7	6,7	-4500	0,38
ПМ-10-60	108,9	35	-1750	0,38
ПМ-10-120	131,5	25	-1125	0,38

2.7 Вихідні дані для теплового розрахунку підігрівача мазуту ПМ-120-10

Вихідні дані:

- марка мазуту – М100;
- витрата мазуту –  $G_m = 0,04 m^3/c$ ;
- початкова температура мазуту –  $t_{1m} = 60 ^{\circ}C$ ;

- номінальна кінцева температура мазуту –  $t_{2M} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- тиск гріючої пари –  $P_{гр} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ;
- температура насиченої пари –  $t_s = 191,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- матеріал труб – сталь;
- теплопровідність матеріалу труб –  $\lambda_{ст} = 46,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;

Геометричні характеристики апарату:

- число труб –  $n = 388 \text{ од.}$ ;
- число ходів трубного простору  $z_T = 12$ ;
- довжина труб –  $L = 10 \text{ м}$ ;
- зовнішній діаметр труб –  $d_3 = 0,038 \text{ м}$ ;
- внутрішній діаметр труб –  $d_B = 0,033 \text{ м}$ ;
- площа поверхні теплообміну –  $F = 400 \text{ м}^2$ .

Теплофізичні властивості конденсату:

- густина –  $\rho_k = 880 \text{ кг/м}^3$ ;
- теплопровідність –  $\lambda_k = 0,671 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;
- кінематична в'язкість –  $\nu_k = 0,141 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;
- питома теплота пароутворення –  $r_k = 1968 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ .

## 2.8 Тепловий розрахунок підігрівача мазуту ПМ-120-10

Для того щоб знайти розрахункові  $t_{2M}$  та  $F$  задаємося кроком зовнішньої ітераційної процедури, виходячи з рекомендацій  $h_t = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Визначаємо середню температуру мазуту, попередньо задаємося, що згідно таблиці 2.4 для підігрівача ПМ-25-6  $t_{2M} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $^\circ\text{C}$

$$\bar{t}_{2M} = 0,5 \cdot (t_{1M} + t_{2M}),$$

$$\bar{t}_{2M} = 0,5 \cdot (60 + 140) = 100.$$

Визначаємо теплофізичні властивості мазуту при 100 °С:

– густина, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_m = [0,881 - 0,00304 \cdot (t - 68)] \cdot 10^3;$$

$$\rho_m = [0,881 - 0,00304 \cdot (100 - 68)] \cdot 10^3 = 783,72.$$

– коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)

$$\lambda_m = 0,158 - 0,0002093 \cdot (t - 20);$$

$$\lambda_m = 0,158 - 0,0002093 \cdot (100 - 20) = 0,1412.$$

– питома теплоємність, кДж/(кг·К)

$$c_{pm} = 1,7364 - 0,00251 \cdot t;$$

$$c_{pm} = 1,7364 - 0,00251 \cdot 100 = 1,987.$$

– коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с

$$\nu_m = \{ \exp(\exp[9,8555 - 3,745 \cdot \lg(t + 273)]) - 0,8 \} \cdot 10^{-6};$$

$$\nu_m = \{ \exp(\exp[9,8555 - 3,745 \cdot \lg(100 + 273)]) - 0,8 \} \cdot 10^{-6} = 4,67 \cdot 10^{-5}.$$

– коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с

$$\mu_m = \nu_m \cdot \rho_m;$$

$$\mu_i = 4,67 \cdot 10^{-5} \cdot 783,72 = 0,0366.$$

Теплова потужність підігрівача мазуту, Вт

$$Q_M = G_M \cdot c_{pM} \cdot \rho_M \cdot (t_{2M} - t_{1M});$$

$$Q_i = 0,04 \cdot 1987 \cdot 783,72 \cdot (140 - 60) = 4983205.$$

Задаємося коефіцієнтом теплових втрат в навколишнє середовище

$$\eta_{втрат} = 0,97.$$

Витрат пари, що гріє, кг/с

$$G_n = \frac{Q_M}{r_k \cdot \eta_{втрат}};$$

$$G_n = \frac{4983205}{1968 \cdot 10^3 \cdot 0,97} = 2,6104.$$

Починаємо внутрішню ітераційну процедуру розрахунку температури стінки  $t_{ст1}$ .

Задаємося значенням температурного напору пара- стінка  $\Delta t_1 = 0$  °С.

Тоді

$$t_{ст1} = t_s - \Delta t_1 = 191,6 - 0 = 191,6$$
 °С.

Коефіцієнт тепловіддачі зі сторони пари, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\bar{\alpha}_n = 2,02 \cdot \varepsilon \cdot \lambda_k \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_k^2 \cdot L \cdot n}{\mu_k \cdot G_n}},$$

де L – довжина нагрівальних елементів, м;

$\varepsilon$  - поправочний коефіцієнт на число труб, при  $n > 100$   $\varepsilon = 0,6$ ;

$\lambda_k, \mu_k, \rho_k$  – відповідно, коефіцієнт теплопровідності, динамічна в'язкість та густина пари, що конденсується.

Динамічна в'язкість, Па·с

$$\mu_k = \nu_k \cdot \rho_k;$$

$$\mu_m = 0,141 \cdot 10^{-6} \cdot 880 = 1,24 \cdot 10^{-4}.$$

Тоді

$$\bar{\alpha}_n = 2,02 \cdot 0,6 \cdot 0,671 \cdot \sqrt[3]{\frac{880^2 \cdot 10 \cdot 388}{1,24 \cdot 10^{-4} \cdot 2,6104}} = 17062.$$

Знаходимо значення температури стінки труби зі сторони мазуту, °С

$$t_{cm2} = t_{cm1} - \bar{\alpha}_n \cdot \Delta t_1 \cdot \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}};$$

$$t_{cm2} = 191,6 - 17062 \cdot 0 \cdot \frac{0,0025}{46,5} = 191,6.$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі зі сторони мазуту, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_m = \frac{\lambda_m}{d_{\text{вн}}} \cdot 1,62 \cdot \left( \text{Re}_m \cdot \text{Pr}_m \cdot \frac{d_{\text{вн}}}{L} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_m}{\mu_{cm}} \right)^{0,14} \cdot \left( 1 + 0,015 \cdot \text{Gr}_m^{1/3} \right).$$

Число Рейнольдса для мазуту

$$\text{Re}_m = \frac{W_m \cdot d_{\text{вн}}}{\nu_m},$$

де  $W_m$  – швидкість мазуту, м/с.

Швидкість мазуту, м/с

$$W_m = \frac{4 \cdot G_m \cdot z_m}{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2 \cdot n};$$

$$W_m = \frac{4 \cdot 0,04 \cdot 12}{3,14 \cdot 0,033^2 \cdot 388} = 1,46.$$

Тоді

$$\text{Re}_m = \frac{1,46 \cdot 0,033}{4,67 \cdot 10^{-5}} = 1022.$$

Число Прандтля

$$\text{Pr}_m = \frac{v_m \cdot c_{p,m} \cdot \rho_m}{\lambda_m};$$

$$\text{Pr}_m = \frac{4,67 \cdot 10^{-5} \cdot 1987 \cdot 783,72}{0,1412} = 515.$$

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення,  $1/^\circ\text{C}$

$$\beta_m = \frac{\rho_{1,m} - \rho_{2,m}}{\rho_{2,m} \cdot (t_{2,m} - t_{1,m})};$$

$$\beta_m = \frac{905,32 - 662,12}{662,12 \cdot (140 - 60)} = 0,00459.$$

Температурний натиск,  $^\circ\text{C}$

$$\Delta t_2 = t_{\text{см}2} - \bar{t}_m;$$

$$\Delta t_2 = 191,6 - 100 = 91,6.$$

Число Грасгофа

$$Gr_m = \frac{g \cdot \beta_m \cdot \Delta t_2 \cdot d_{\text{вн}}^3}{v_m^2};$$

$$Gr_i = \frac{9,81 \cdot 0,00459 \cdot 91,6 \cdot 0,033^3}{(4,67 \cdot 10^{-5})^2} = 67919.$$



Густина мазуту при температурі  $t_{ст2}$ , кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_i = [0,881 - 0,00304 \cdot (t - 68)] \cdot 10^3;$$

$$\rho_m = [0,881 - 0,00304 \cdot (191,6 - 68)] \cdot 10^3 = 505,26.$$

Коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с

$$\nu_m = \{ \exp(\exp[9,8555 - 3,745 \cdot \lg(t + 273)]) - 0,8 \} \cdot 10^{-6};$$

$$\nu_m = \{ \exp(\exp[9,8555 - 3,745 \cdot \lg(191,6 + 273)]) - 0,8 \} \cdot 10^{-6} = 4,654 \cdot 10^{-6}.$$

Динамічна в'язкість мазуту при температурі  $t_{ст2}$ , Па·с

$$\mu_{cm} = \nu_{cm} \cdot \rho_{cm}.$$

$$\mu_{cm} = 4,654 \cdot 10^{-6} \cdot 505,26 = 0,002351.$$

Тоді середній коефіцієнт тепловіддачі зі сторони мазуту, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_m = \frac{0,1412}{0,033} \cdot 1,62 \cdot \left( 1022 \cdot 515 \cdot \frac{0,033}{10} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{0,0366}{0,002351} \right)^{0,14} \cdot (1 + 0,015 \cdot 67919^{1/3}) = 197,3$$

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

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_m} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_n}};$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{197,26} + \frac{0,0025}{46,5} + \frac{1}{17062}} = 192,9.$$

Середньологарифмічний температурний напір, °С

$$\Delta \bar{t} = \frac{t_{2,м} - t_{1,м}}{\ln \frac{t_s - t_{1,м}}{t_s - t_{2,м}}};$$

$$\Delta \bar{t} = \frac{140 - 60}{\ln \frac{191,6 - 60}{191,6 - 140}} = 85,45.$$

Розраховуємо  $\Delta t_1'$

$$\Delta t_1' = \frac{k \cdot \Delta \bar{t}}{\alpha_n};$$

$$\Delta t_1' = \frac{192,9 \cdot 85,45}{17062} = 0,97.$$

Похибка розрахунку по першій внутрішній ітерації

$$\varepsilon_t = \left| \frac{\Delta t_1 - \Delta t_1'}{\Delta t_1} \right| = \frac{0 - 0,97}{0,97} = 1.$$

Так як похибка більше ніж 0,03...0,5, то виконуємо увесь розрахунок спочатку, до виконання умови  $\varepsilon_t < 0,03...0,5$ .

У даному випадку в першій зовнішній ітерації здійснено дві внутрішні ітерації. Результати розрахунку за останньою внутрішньою ітерацією наступні:

– середній коефіцієнт тепловіддачі зі сторони мазуту, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_m = 195,6;$$

- коефіцієнт тепловіддачі зі сторони пари, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\bar{\alpha}_n = 17062;$$

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

$$k = 191,4;$$

- середньологаріфмічний температурний напір, °С

$$\Delta\bar{t} = 85,45.$$

Похибка  $\varepsilon_t = 0,008 < 0,03$ .

Площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>

$$F_p = \frac{1,25 \cdot Q}{\Delta\bar{t} \cdot k},$$

де 1,25 – коефіцієнт, який враховує забруднення поверхні теплообміну.

$$F_p = \frac{1,25 \cdot 4983205}{85,45 \cdot 191,4} = 380,8.$$

Похибка розрахунку по зовнішній ітерації

$$\varepsilon_F = \left| \frac{F - F_p}{F} \right| = \frac{400 - 380,8}{400} = 0,0479.$$

Похибка  $\varepsilon_t = 0,008 < 0,03$ .

Площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>

$$F_p = \frac{1,25 \cdot Q}{\Delta \bar{t} \cdot k},$$

де 1,25 – коефіцієнт, який враховує забруднення поверхні теплообміну.

$$F_p = \frac{1,25 \cdot 4983205}{85,45 \cdot 191,4} = 380,8.$$

Похибка розрахунку по зовнішній ітерації

$$\varepsilon_F = \left| \frac{F - F_p}{F} \right| = \frac{400 - 380,8}{400} = 0,0479.$$

### 3 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ОХОРОНА ПРАЦІ

У зв'язку з тим, що тема магістерської роботи є теоретичною, розділ техніки безпеки та охорони праці буде включати в себе техніку безпеки та охорону праці при роботі із персональним комп'ютером (ПК, ЕОМ).

#### 3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих факторів

При роботі на комп'ютерах, до складу яких входять відеодисплейні термінали (ВДТ), на працівників можуть діяти наступні шкідливі та погрожуючі життю і здоров'ю виробничі фактори:

- фізичні:
  - 1) підвищений рівень шуму ( від вентилятора мікропроцесора та плат);
  - 2) високий рівень напруги в електричній мережі, торкання до якої може викликати нещасний випадок;
  - 3) підвищений рівень статичної електрики;
  - 4) підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
  - 5) підвищений рівень напруженості електричного поля;
  - 6) пряма і відбита від екрана блесккість;
  - 7) несприятливе розподілення яскравості об'єктів в полі зору;
- психофізіологічні:
  - 1) фізичні перевантаження статичної та динамічної дії;
  - 2) нервово-психічні перевантаження ( розумове перенапруження, перенапруження зорових аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження).

### 3.2 Заходи з поліпшення умов праці

Для забезпечення нормальної роботи користувача ПК вибирається монітор, який відповідає Директиві 90/270 Європейської економічної Комісії "Мінімальні вимоги з охорони праці, які гарантують безпечні умови роботи". Електронно-променева трубка монітора - це джерело практично всіх видів електромагнітного випромінювання, яке буває іонізуючим (рентгенівське) та неіонізуючим. Іонізуюче випромінювання, впливаючи на клітини організму людини, може викликати їх пошкодження за рахунок утворення іонів. Крім того, при досить сильному опроміненні можливий процес радіолізу (розпаду) води, що міститься в тканинах, а це приведе до утворення короткоживучих радикалів, здатних викликати рак і мутації клітин.

Крім опромінення, при тривалій роботі з ПК можна заробити також так званий КЗС - комп'ютерний зоровий синдром. Цей синдром супроводжується різким болем очей, при цьому спостерігається їх почервоніння і сухість. Нерідко трапляються головні болі, особливо у людей, які багато працюють з набором тексту, з'являється швидка стомлюваність.

Під час роботи за комп'ютером необхідно вжити низку заходів, щоб вплив монітора на здоров'я був якнайменшим.

Монітор має антибликове покриття, що є позитивним фактором, тому що блики розпоршують увагу і прискорюють втомлюваність організму. Розмір зерна — 0,26 мм, що є досить непоганим показником. Цей параметр визначає якість картинки і, що дуже важливо - чіткість шрифтів. Якщо монітор "грубозернистий", то шрифти виглядатимуть розпливчастими і нечіткими, що неминуче спричинить високе навантаження на очі при читанні, а в перспективі - прогресуючу короткозорість.

Під час роботи за комп'ютером необхідно дотримувались таких вимог:

- оптимальна відстань від монітору до очей (50...70) см;
- кут зору між нормаллю до кінескопа і лінією погляду - не більше 60°;

- кут нахилу клавіатури дорівнює 15 градусів;
- яскравість монітору відносно джерела світла не перевищувала 1:10.

Наприклад, вибраний монітор, який має наступні параметри, задовольняє вимоги наведеного вище нормативного документу:

- діагональ монітора 15 дюймів;
- частота оновлення екрану 100 Гц при роздільній здатності 1024x768;
- максимальна роздільна здатність 1600x1200;
- монітор відповідає стандарту ТСО'99 за електромагнітним випромінюванням;
- плоский екран;
- розмір зерна 0,24 мм.

Монітор встановлюють таким чином, щоб верхній край екрану знаходився на рівні очей. Екран монітору знаходиться від очей користувача на відстані не меншій ніж 60 см. Клавіатура розташовується таким чином, щоб на ній зручно працювати двома руками. Тобто повинна знаходитись на поверхні стола чи спеціальній підставці на відстані 10 - 30 см від краю стола чи підставки. Кут нахилу панелі клавіатури до столу регулюється в межах від 5 до 15 градусів.

На робочому місці мають бути передбачені заходи захисту від можливої дії небезпечних і шкідливих чинників виробництва. Рівні цих чинників не повинні перевищувати граничних значень, обумовлених правовими, технічними і санітарно-технічними нормами.

Робота з комп'ютером характеризується значною розумовою напругою і нервово-емоційним навантаженням операторів, високою напруженістю зорової роботи і достатньо великим навантаженням на м'язи рук при роботі з клавіатурою ЕОМ. Велике значення має раціональна конструкція і розташування елементів робочого місця, що важливе для підтримки оптимальної робочої пози людини-оператора.

В процесі роботи з комп'ютером необхідно дотримувати правильний режим праці і відпочинку. Інакше у персоналу виникає значна напруга зорового апарату з появою скарг на незадоволеність роботою, головні болі, дратівливість, порушення сну, утомленість і хворобливі відчуття в очах, в попереку, в області шиї і руках.

Облаштування робочих місць, обладнаних відеотерміналами, забезпечує:

- належні умови освітлення приміщення і робочого місця, відсутність відблисків;
- оптимальні параметри мікроклімату (температура, відносна вологість, швидкість руху, рівень іонізації повітря);
- належні ергономічні характеристики основних елементів робочого місця,

Також враховує такі небезпечні і шкідливі фактори:

- наявність шуму та вібрації;
- м'яке рентгенівське випромінювання;
- електромагнітне випромінювання;
- ультрафіолетове і інфрачервоне випромінювання;
- електростатичне поле між екраном і оператором;
- наявність пилу, озону, оксидів азоту й аероіонізації.

Заземлені конструкції, що знаходяться в приміщенні (батареї опалення, водопровідні труби, кабелі із заземленим відкритим екраном тощо), надійно захищені діелектричними щитками. Для захисту від надмірної яскравості вікон застосовуються регульовані жалюзі. Для внутрішнього оздоблення приміщень з ВДТ використовуються дифузно-відбивні матеріали з коефіцієнтами відбиття для стелі 0,7...0,8, для стін 0,5...0,6. Покриття підлоги матове з коефіцієнтом відбиття 0,3...0,5. Поверхня підлоги рівна, неслизька, з антистатичними властивостями. Виробниче приміщення обладнане шафами для зберігання документів, полицями, стелажми, тумбами. Щоденно проводиться вологе прибирання. Приміщення оснащено



аптечкою першої медичної допомоги. При приміщенні з ВДТ обладнане побутове приміщення для відпочинку під час роботи, кімната психологічного розвантаження, в якій передбачено встановлення пристроїв для приготування й роздачі тонізуючих напоїв, а також місця для занять фізичною культурою.

### 3.3 Виробнича санітарія

Гігієнічні вимоги до параметрів виробничого середовища включають вимоги до параметрів мікроклімату, освітлення, шуму й вібрації, рівнів електромагнітного та іонізуючого випромінювання.

У виробничих приміщеннях на робочих місця із ПК мають забезпечуватись оптимальні значення параметрів мікроклімату: температури, відносної вологості та рухливості повітря (див. табл. 3.1) [43, 44].

Таблиця 3.1 - Норми мікроклімату для приміщень з ВТД

Період року	Категорія робіт	Температура повітря	Відносна вологість	Швидкість руху, м/сек
Холодний період року	Легка Іа	22 - 24	60 – 40	0,1
	Легка Іб	21 - 23	60 – 40	0,1
	Середньою важкості Іа	19 - 21	60 – 40	0,2
	Середньою важкості Іа	17 - 19	60 – 40	0,2
	Важка ІІІ	16 - 18	60 – 40	0,3
Теплий період року	Легка Іа	23 - 25	60 – 40	0,1
	Легка Іб	22 - 24	60 – 40	0,2
	Середньою важкості Іа	21 - 23	60 – 40	0,3
	Середньою важкості Іб	20 - 22	60 – 40	0,3
	Важка ІІІ	18 - 20	60 – 40	0,4

Для підтримання мікроклімату на належному рівні у зимній період часу у приміщенні з ПК встановлені водяні радіатори. Для виведення теплонадлишків приміщення та забезпечення циркуляції повітря приміщення обладнується вентиляцією (природною, або ж механічною), або припливно-втяжною системою. Для забезпечення необхідного рівня температур у літній період часу, тобто для охолодження повітря, приміщення може бути обладнане системою кондиціонування.

Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі приміщень з ПК мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам (див. табл. 3.2) [45].

Таблиця 3.2 - Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ВДТ

Рівні	Число іонів в 1 см <sup>3</sup> повітря	
	п+	п-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-30000	3000-5000
Максимально допустимі	50000	50000

Штучне освітлення в приміщеннях із робочими місцями, обладнаними ПК має здійснюватись системою загального рівномірного освітлення. У виробничих та адміністративно-громадських приміщеннях, у разі переважної роботи з документами, допускається застосування системи комбінованого освітлення (крім системи загального освітлення, додатково встановлюються світильники місцевого освітлення) [46].

Значення освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів має становити 300–500 лк, Якщо це неможливо забезпечити системою загального освітлення, допускається використовувати місцеве освітлення. При цьому світильники місцевого освітлення слід встановлювати таким чином, щоб не створювати бликів на поверхні екрана, а освітленість екрана має не перевищувати 300 лк.

Як джерела світла для штучного освітлення мають застосовуватись переважно люмінесцентні лампи типу ЛБ. У разі влаштування відбитого освітлення у виробничих та адміністративно-громадських приміщеннях допускається застосування металогалогенних ламп потужністю 250 Вт. Допускається застосування ламп розжарювання у світильниках місцевого освітлення [46].

Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях, обладнаних ПК, мають відповідати вимогам (див. табл. 3.3) [47, 48,49].

Таблиця 3.3 - Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудової діяльності	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц									Рівні звуку, еквівалентні рівні звуку, дБА/дБАекв.
Програмісти ЕОМ	86	70	61	54	49	45	42	40	38	50
Оператори в залах обробки інформації на ЕОМ та оператори комп'ютерного набору	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65
В приміщеннях для розташування шумних агрегатів ЕОМ	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях із ПК (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури, друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих за (див.табл. 3.4) [50, 51].

Таблиця 3.4. Допустимі параметри електромагнітних випромінювань електростатичного поля

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима <u>поверхнева щільність</u> потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м <sup>2</sup>
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/М	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30МГц	2	-	
30 МГц...5 ГГц	-	-	10
Електромагнітне полеоптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру: УФ-С (220...280 нм)			0,001
УФ-В (280...320 нм)			0,01
УФ-А (320. .400 нм)			10,0
в інфрачервоній частині спектру: 0,76... 10,0 мкм			35,0.. .70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20 мВ/м

Значення напруженості електромагнітних полів на робочих місцях із ПК мають відповідати нормативним значенням [52, 53, 54, 55].

Інтенсивність потоків інфрачервоного випромінювання має не перевищувати допустимих значень, відповідно до [56].

Інтенсивність потоків ультрафіолетового випромінювання не повинна перевищувати допустимих значень, відповідно до [57].

Потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання на відстані 0,05 м від екрана та корпусу відео терміналу при будь-яких положеннях регулювальних пристроїв не повинна перевищувати ОД бер/год (100 мкР/год).

### 3.4 Електробезпека

Електричні установки, до яких відноситься практично все обладнання ЕОМ, представляють для людини велику потенційну небезпеку, так як в процесі експлуатації або проведенні профілактичних робіт людина може торкнутися частин, що знаходяться під напругою. Специфічна небезпека електроустановок: струмоведучі провідники, корпуси стійок ЕОМ і іншого устаткування, яка під напругою в результаті пошкодження (пробою) ізоляції, не подають будь-яких сигналів, які попереджають людину про небезпеку. Реакція людини на електричний струм виникає лише при протіканні останнього через тіло людини. Виключно важливе значення для запобігання електротравмотизму має правильна організація обслуговування діючих електроустановок ВЦ, проведення ремонтних, монтажних і профілактичних робіт. При цьому під правильною організацією розуміється строге виконання ряду організаційних і технічних заходів і засобів, встановлених у правилах [58, 59, 60]. Залежно від категорії приміщення необхідно вжити певних заходів, що забезпечують достатню електробезпеку при експлуатації та ремонті електроустаткування. Так, в приміщеннях з підвищеною небезпекою електроінструменти, переносні світильники повинні бути виконані з

подвійною ізоляцією або напруга живлення їх не повинно перевищувати 42 В. В ОЦ до таких приміщень можуть бути віднесені приміщення машинного залу, приміщення для розміщення сервісної та периферійної апаратури. В особливо небезпечних же приміщеннях напруга живлення переносних світильників не повинна перевищувати 12 В, а робота з напругою не вище 42 В дозволяється тільки із застосуванням ЗІЗ (діелектричних рукавичок, килимків і т.п.). Роботи без зняття напруги на струмовідних частинах і поблизу них, роботи проводяться безпосередньо на цих частинах або при наближенні до них на відстань менше встановленого ПЕУ. До цих робіт можна віднести роботи з налагодження окремих вузлів, блоків. При виконанні такого роду робіт в електроустановках до 1000 В необхідне застосування певних технічних і організаційних заходів, таких як: огорожі розташовані поблизу робочого місця та інших струмоведучих частин, до яких можливо випадковий дотик; робота в діелектричних рукавичках або стоячи на діелектричному килимку; застосування інструменту з ізолюючими рукоятками, за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками. Роботи цього виду повинні виконуватися не менше ніж двома працівниками.

Відповідно до [58, 59] споживачам і обслуговуючому персоналу електроустановок пред'являються наступні вимоги:

- особи, які не досягли 18-річного віку, не можуть бути допущені до робіт в електроустановках;
- особи не повинні мати каліцтв і хвороб, що заважають виробничій роботі;
- особи повинні після відповідної теоретичної та практичної підготовки пройти перевірку знань і мати посвідчення на доступ до робіт в електроустановках.

У ВЦ розрядні струми статичної електрики частіше за все виникають при дотику до будь-якого з елементів ЕОМ. Такі розряди небезпеки для людини не представляють, але крім неприємних відчуттів вони можуть

привести до виходу з ладу ЕОМ. Для зниження величини виникаючих зарядів статичної електрики в ОЦ покриття технологічних статей слід виконувати з одношарового полівінілхлоридного антистатичного лінолеуму. Іншим методом захисту є нейтралізація заряду статичної електрики іонізованим газом. У промисловості широко застосовуються радіоактивні нітралізатори. До загальних заходів захисту від статичної електрики в ОЦ можна віднести загальні та місцеве зволоження повітря.

### 3.5 Пожежна безпека

Приміщення, у яких розташовані ПК (або ЕОМ) та у яких виконуються розрахунки для дипломної магістерської роботи, можна віднести до категорії Д по вибухопожежній та пожежній небезпеці. Це пов'язано із тим, що горючих речовин немає зовсім, а негорючі знаходяться у холодному стані.

До приміщень для ЕОМ пред'являються наступні вимоги пожежної безпеки:

- необхідно мати 2 вогнегасники;
- матеріали для акустичної обробки стін і стель повинні бути негорючими;
- деревостружкові і деревоволокнисті плити повинні застосовуватися тільки при їх глибокому просоченні вогнезахисними складами;
- сталеві несучі і захищаючі конструкції повинні бути захищені вогнезахисними матеріалами і фарбами;
- плити знімної підлоги повинні бути виконані з тих, що не згорають або важко горючих матеріалів;
- різні приміщення повинні відділятися один від одного протипожежними стінами і перегородками;
- у приміщеннях, де немає постійної присутності персоналу, необхідно встановлювати автоматичну систему пожежного захисту;

- машинні зали площею більш 250 м<sup>2</sup> повинні мати не більше двох виходів;
- не можна залишати без спостереження включену в мережу електронну машину;
- не можна залишати на пристроях залишки проводів, вату, марлю і інший обтиральний матеріал.

### 3.6 Розрахунок захисного заземлення

У якості природного заземлювача електроустановки напругою 380 В (220 В) використовується залізобетонний фундамент будинку прямокутної форми розмірами 30×8 м. Грунт - суглинок. Виначається опір розтіканню струму додаткового штучного заземлювача, якщо до мережі приєднане навантаження 1000 кВА (два системні блоки ПК, два монітори, один принтер).

По додатку знаходимо питомий електричний опір ґрунту - 100 Ом·м. Коефіцієнт сезонності - 1,3.

Розрахунковий опір ґрунту для природного заземлювача, Ом·м

$$\rho_e = 1,3 \cdot 100 = 130.$$

Площа фундаменту, м<sup>2</sup>

$$S = 30 \cdot 8 = 240.$$

Опір розтіканню струму природного заземлювача, Ом

$$R_e = 0,5 \cdot \rho_e / \sqrt{S} = 0,5 \cdot 130 / \sqrt{240} = 4,196.$$



Так як приєднана до мережі потужність більше 100 кВА, нормативний опір заземлювача складе 4 Ом.

Опір додаткового заземлювача, Ом

$$R_{\text{доп}} = 4,196 \cdot 4 / (4,196 - 4) = 85,6.$$

Тобто, існуюча система заземлення має бути доповнена додатковим заземлювачем з опором 85,6 Ом.

## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі виконано аналіз сучасного стану питання щодо розрахунків та експлуатації теплообмінного обладнання для підігріву мазуту на ТЕС, ТЕЦ та опалювальних котельних. Детально розглянуто призначення, класифікація та характеристики підігрівачів мазуту. Також проаналізовано схеми включення підігрівачів мазуту в системи підготовки рідкого палива на теплових електричних станціях.

В спеціальній частині дипломного проекту виконано тепловий повірочний розрахунок підігрівачів мазуту ПМ-25-6 та ПМ-120-10. Підігрівачі мазуту, як і інше обладнання ТЕС працюють у неперервному тепловому режимі і характеризуються малою тепловою інерційністю. Тому усі розрахунки проводять при стаціонарному тепловому режимі. Підігрівачі ТЕС відносяться до класу рекуперативних теплових апаратів, відповідно основними рівняннями для їх теплового розрахунку є рівняння теплового балансу та теплопередачі.

У якості рідини, що нагрівається задано мазут марки М100. В якості гарячого теплоносія використовується пара від відборів турбіни, нагрів мазуту здійснюється за рахунок конденсації пари через стінки каналів. При цьому досить часто використовується перегріта пара.

В залежності від конструктивного виконання підігрівачів та режимів роботи температура мазуту на виході з підігрівача може бути постійною або змінною. При невеликій тепловій потужності підігрівача зміною температури на виході з нього можна знехтувати, що відповідає першому режиму роботи підігрівача.

Для отримання конкретних залежностей  $t_{\text{вих}} = f(t_{\text{вх}})$  для підігрівачів мазуту типу ПМ розглянуто підігрівач марки ПМ -25-6 з номінальною витратою мазуту 1,667 кг/с та температурою насиченої пари 191,6 °С. діапазон зміни температури на вході від 20 °С до температури насиченої пари. Термічний опір шару забруднення стінок  $R=0,001 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/ Вт}$ .

Результати досліджень показали, що залежності мають лінійних характер.

На практиці при циркуляційному підігріванні мазуту в резервуарах розраховується максимально необхідна кількість пари для найменшого значення температури на вході.

Проведені розрахунки підтвердили висновок про слабкий вплив витрати пари на процес нагрівання мазуту у розглянутому діапазоні зміни температури на вході.

Це також підтверджується графіками залежностей коефіцієнта теплопередачі від пари до мазуту, коефіцієнта тепловіддачі від стінки до мазуту, коефіцієнта тепловіддачі від пари до стінки.

У розділі охорона праці та техніка безпеки, розглянуті основні шкідливі фактори при роботі за комп'ютером та заходи щодо їх усунення.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Смешивающие подогреватели паровых турбин [Текст] / В.Ф. Ермолаев, В.А. Пермяков, Г.И. Ефимочкин, В.Л. Вербицкий. - М.: Энергоиздат, 1982. – 273с.
2. Стерман, Л.С. Тепловые и атомные электрические станции [Текст] / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. - М.: Энергоатомиздат, 1996. – 354с.
3. Теплообменное оборудование паротурбинных установок: отраслевой каталог. М.: НИИЭИНФОРМЭНЕРГОМАШ, 1984. – 155с.
4. Кутепов, А.М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании [Текст] / А.М. Кутепов, Л.С. Стерман, Н.Г. Стюшин. - М.: Высшая школа, 1983. - 278с.
5. Рихтер, Л.А. Вспомогательное оборудование тепловых электростанций [Текст] / Л.А. Рихтер, В.М. Лавыгин, Д.П. Елизаров. - М.: Энергоатомиздат, 1987. – 412с.
6. Цветков, Ф.Ф. Задачник по тепломассообмену [Текст] / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко. - М.: МЭИ, 1987. – 235с.
7. Справочник по теплообменникам [Текст] / под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 488с.
8. Пермяков, В.А. Теплообменники вязких жидкостей, применяемые на электростанциях [Текст] / В.А. Пермяков, Е.С. Левин, Г.В. Дивова. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 245с.
9. Белосельский, В.С. Топочные мазуты [Текст] / В.С. Белосельский. - М.: Энергия, 1978. – 316с.
10. Сжигание высокосернистого мазута на электростанциях [Текст] / Н.И. Верховский, Г.К. Красноселов, Е.В. Машилов. - М.: Энергия, 1970. – 420с.

11. Бажан, П.И. Справочник по теплообменным аппаратам [Текст] / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов. - М.: Машиностроение, 1989. – 358с.
12. Основные процессы и аппараты химической промышленности [Текст] / под ред. Ю.И. Дытнерского. - М.: Химия, 1991. – 289с.
13. Хаузен Хельмут. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе. - М.: Энергоиздат, 1981. – 185с.
14. Мигай, В.К. Повышение эффективности современных теплообменников [Текст] / В.К. Мигай. - Л.: Энергия, 1980. – 264с.
15. Коваленко, Л.М. Теплообменники с интенсификацией теплопередачи [Текст] / Л.М. Коваленко, А.Ф. Глушков. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 197с.
16. Кутателадзе, С.С. Теплоотдача при конденсации и кипении [Текст] / С.С. Кутателадзе. - М.: Машгиз, 1952. – 458с.
17. Михеев, М.А. основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева. - М.: Энергия, 1977. – 265с.
18. Назмеев, Ю.Г. Теплообменные аппараты ТЭС [Текст] / Ю.Г. Назмеев, В.М. Лавыгин. - М.: МЭИ, 2005. – 260с.
19. Лыков, А.В. Тепломассообмен: справ. / А.В. Лыков. - М.: Энергия, 1978. - 480 с.
20. Болгарский, А.В. Термодинамика и теплопередача: учеб. пособие для вузов /А.В Болгарский, Г.А. Мухачев, В.К. Щукин. - Изд. 2-е, перераб. и доп. -М.: Высшая школа, 1975. - 495 с.
21. Исаченко, В.П. Теплопередача : учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. - 3-е - изд. перераб. и доп. - М.: «Энергия», 1975. – 488с.
22. Андреев, М.М. Теплообменная аппаратура энергетических установок /М.М. Андреев [и др.]. - М.: Машгиз, 1963. - 240 с.