

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНИ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем  
(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота**

другий (магістерський) рівень  
(рівень вищої освіти)

на тему «Підвищення енергетичної ефективності пічного обладнання  
промислового підприємства»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1412  
спеціальності 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)

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

освітньої програми Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
(назва освітньої програми)

Маловічко А.Г.  
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц. Єрофєєва А.А.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент д.т.н., проф. Артемчук В.В.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2023

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

Інженерний навчально-науковий інститут \_\_\_\_\_  
Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень \_\_\_\_\_  
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

д.т.н., доц. В.Л. Коваленко

« \_\_\_\_\_ » 2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Маловічко Артем Геннадійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

- 1 Тема роботи «Підвищення енергетичної ефективності пічного обладнання промислового підприємства»  
керівник роботи Єрофеева Аліна Анатоліївна, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- затверджені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639 - с
- 2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2023 р.
- 3 Вихідні дані до роботи : кількість зливаного хлориду магнію - 300 кг/год; зовнішній діаметр реактора - 1,5 м; температура ведення процесу вакуумної сепарації - 1010 °С; загальне споживання електричної енергії встановленими двигунами  $W_{\text{уст}} = 90$  кВт·год, умовний питомий електроопір -  $1,0 \cdot 10^{-6}$  Ом·м.
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Загальна характеристика промислового підприємства. 2) Тепловий розрахунок процесу в апараті відновлення підвищеної продуктивності (5 т) при поєднаній схемі виробництва. 3) Розрахунок питомих обсягів споживання електричної енергії основним обладнанням цеху. 4) Електричний розрахунок печі відновлення і сепарації. 5) Економічна оцінка підвищення енергоефективності пічного обладнання.
- 5 Перелік графічного матеріалу 1) Споживання титанової продукції різними галузями у світі за даними TITAN CORPORATION. 2) Підвищення енергоефективності печей відновлення і вакуумної сепарації. 3) Теплові

розрахунки печі відновлення.4) Загальний тепловий баланс печі відновлення. 5) Теплові розрахунки апарату вакуумної сепарації. 6) Тепловий баланс апарату вакуумної сепарації.7) Витрата електричної енергії технологічним устаткуванням ділянок цеху відновлення і вакуумної сепарації після модернізації.8) Питома витрата електричної енергії на виробництво титанової губки. 9) Техніко-економічні показники підвищення енергоефективності пічного обладнання.

#### 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Єрофєєва А.А. к.т.н., доцент	<i>Єрофєєва</i>	<i>Єрофєєва</i>
Розділ 2	Єрофєєва А.А. к.т.н., доцент	<i>Єрофєєва</i>	<i>Єрофєєва</i>
Розділ 3	Єрофєєва А.А. к.т.н., доцент	<i>Єрофєєва</i>	<i>Єрофєєва</i>
Розділ 4	Єрофєєва А.А. к.т.н., доцент	<i>Єрофєєва</i>	<i>Єрофєєва</i>
Розділ 5	Єрофєєва А.А. к.т.н., доцент	<i>Єрофєєва</i>	<i>Єрофєєва</i>

7 Дата видачі завдання 11.09.2023 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Загальна характеристика промислового підприємства	18.09.2023	
2	Тепловий розрахунок процесу в апараті відновлення підвищеної продуктивності (5 т) при поєднаній схемі виробництва	16.10.2023	
3	Розрахунок питомих обсягів споживання електричної енергії основним обладнанням цеху відновлення і сепарації.	30.10.2023	
4	Електричний розрахунок печі відновлення і сепарації	13.11.2023	
5	Техніко-економічні показники підвищення енергоефективності пічного обладнання	27.11.2023	

Студент *Маловічко* Маловічко А.Г.

Керівник роботи *Єрофєєва* Єрофєєва А.А.

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер *Башлій* С.В. Башлій

## АНОТАЦІЯ

А.Г. Маловічко. Підвищення енергетичної ефективності пічного обладнання промислового підприємства.

Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник А.А.Єрофєєва. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2023.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена впровадженню заходів збільшення енергоефективності титано-магнієвого виробництва шляхом підвищення продуктивності печей відновлення і сепарації з 3 до 5 тонн та переходу на поєднану схему виробництва з апаратом підвищеної продуктивності.

У результаті реалізації запланованих заходів досягнуто суттєвої економії електричної енергії та коштів.

Ключові слова: ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ПЕЧІ ВІДНОВЛЕННЯ, РЕАКТОР, ПОТУЖНІСТЬ, РЕАКЦІЯ ВІДНОВЛЕННЯ, ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГІЯ, СТРОК ОКУПНОСТІ.

## ABSTRACT

A.G. Malovychko. Improving the energy efficiency of furnace equipment of an industrial enterprise.

Qualifying final work for the degree of master's degree in specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, scientific

adviser A.A. Yerofieieva. Zaporizhzhia National University. Y.M. Potebnyi Engineering Education and Research Institute. Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems, 2023.

The master's thesis is devoted to the implementation of measures to increase the energy efficiency of titanium-magnesium production by increasing the capacity of reduction and separation furnaces from 3 to 5 tons and switching to a combined production scheme with a high-capacity apparatus.

The planned measures resulted in significant energy and cost savings.

Keywords: ENERGY EFFICIENCY, REDUCTION FURNACES, REACTOR, POWER, REDUCTION REACTION, ELECTRICITY, PAYBACK PERIOD.

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Загальна характеристика промислового підприємства.....	9
2 Тепловий розрахунок процесу в апараті відновлення підвищеної продуктивності (5 т) при поєднаній схемі виробництва.....	13
2.1 Розрахунок витрат теплоти, яка виділяється під час реакції відновлення.....	14
2.2 Розрахунок кількості теплоти, яку необхідно отримати за рахунок зовнішнього нагріву в процесі відновлення.....	23
2.3 Тепловий розрахунок процесу в апараті вакуумної сепарації	36
3 Розрахунок питомих обсягів споживання електричної енергії основним обладнанням цеху відновлення і сепарації.....	52
3.1 Розрахунок питомих витрат електричної енергії на допоміжні операції процесів відновлення і вакуумної сепарації за різними варіантами виробництва.....	55
3.2 Визначення електричної потужності печі відновлення і сепарації та питомих витрат електричної енергії на випуск продукції за різними варіантами виробництва.....	58
4 Електричний розрахунок печі відновлення і сепарації.....	54
5 Економічна оцінка підвищення енергоефективності титано - магнієвого виробництва.....	64
5.1 Розрахунок основних техніко-економічних показників проєктів з підвищення енергоефективності титано-магнієвого виробництва.....	66
5.2 Визначення точки беззбитковості різних варіантів виробництва.....	72
Висновки.....	74
Перелік посилань.....	75

## ВСТУП

*Актуальність роботи.* Зважаючи на ситуацію у вітчизняній і світовій титановій промисловості, результати кваліфікаційної роботи є гарним аргументом на користь якнайшвидшого проведення модернізації у галузі з метою недопущення втрати Україною свого місця на світовому ринку титанової продукції і перебування у відповідності світовими тенденціями розвитку титанової галузі.

*Мета роботи* - запропонувати заходи з підвищення енергоефективності процесу виготовлення титанової губки, які б відповідали провідним напрямкам вдосконалення технології титанового виробництва у світі та мали б позитивні техніко-економічні показники.

*Задачі дослідження.* Для досягнення зазначеної мети дослідження в магістерській роботі вирішуються такі задачі:

- виконати тепловий розрахунок процесу в апараті відновлення підвищеної продуктивності (5 т) при поєднаній схемі виробництва;
- провести тепловий розрахунок процесу в апараті вакуумної сепарації;
- виконати розрахунок питомих обсягів споживання електричної енергії основним обладнанням цеху відновлення і сепарації;
  - розрахунок питомих витрат електричної енергії на допоміжні операції процесів відновлення і вакуумної сепарації за різними варіантами виробництва;
  - визначення електричної потужності печі відновлення і сепарації та питомих витрат електричної енергії на випуск продукції за різними варіантами виробництва;
- виконати електричний розрахунок печі відновлення і сепарації;
- дати техніко-економічну оцінку запропонованих заходів;

*Об'єкт дослідження* – цех відновлення і сепарації промислового підприємства.

*Предмет дослідження* – витрати електричної енергії технологічним обладнанням.

Методи дослідження: теоретичні методи дослідження, що базуються на основних закономірностях теорії відновлення і вакуумної сепарації титанової губки, метод проектного аналізу.



## 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМТВА

ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» має стратегічне значення для економічної безпеки держави. Комбінат постійно шукає шляхи для підвищення ефективності виробництва, проводить технічну модернізацію, удосконалює технологію виробництва, ефективно працює над підвищенням якості продукції.

Якість продукції ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» гарантується сертифікованою системою управління якістю відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 9001, EN 9100, ISO 14001, ISO 50001 та ISO 45001.

Основна продукція комбінату має доволі широкий спектр:

- титан губчастий;
- тетрахлорид титану очищений;
- виливки титанові фасонні;
- титанові злитки;
- феротитан;
- шлак титановий;
- гідрид титану губчастого;
- діоксид германію;
- германій полікристаличний зоноочищений;
- литі кремнієві вироби;
- вироби з германію для оптичних деталей.

Кошторис витрат на виробництво загалом по підприємству наведений у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Кошторис витрат на виробництво ТОВ «ЗТМК»

Стаття кошторису	2020 р.	2021 р.	Питома вага, %
Сировина та основні матеріали	156398	161125	15,3
Допоміжні матеріали	100706	97854	9,3
Паливо	63854	51340	4,9
Енерговитрати	110639	427559	40,7
у т.ч. електроенергія	101144	423267	40,3
Фонд оплати праці	257974	196939	18,7
Відрахування на соцпотреби	94993	69790	6,6
Амортизація основних фондів	28775	28151	2,7
Роботи та послуги виробничого характеру	5832	4986	0,5
Інші витрати	11530	12958	1,2
Всього витрат	830701	1050702	100

З таблиці 1.1 видно, що дане виробництво вважається енергоємним, оскільки на споживання паливно-енергетичних ресурсів припадає 45,6 %, а на споживання електроенергії – 40,3 % виробничих витрат.

За фінансовими витратами заводу (рис. 1.1) найбільш вагомим видом енергії є також електроенергія (61 %).

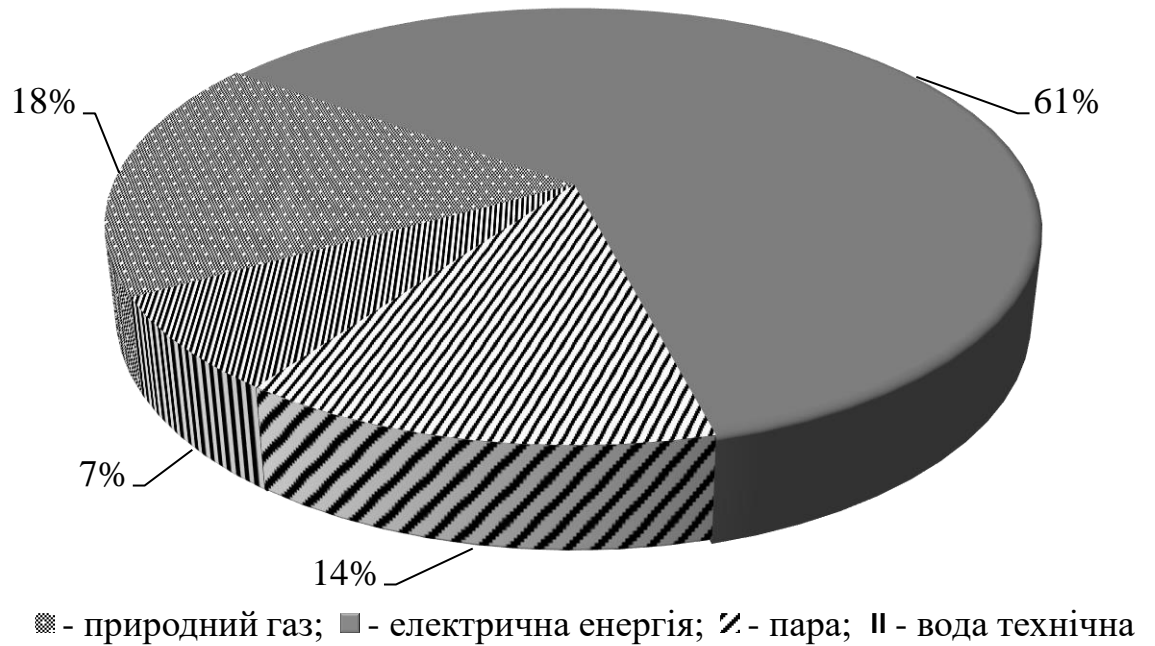


Рисунок 1.1 - Фінансові витрати підприємства на енергоносії

На рис.1.2 представлено споживання титанової продукції різними галузями у світі за даними TITAN CORPORATION, що підтверджує стратегічне значення виробництва титану і для нашої держави.

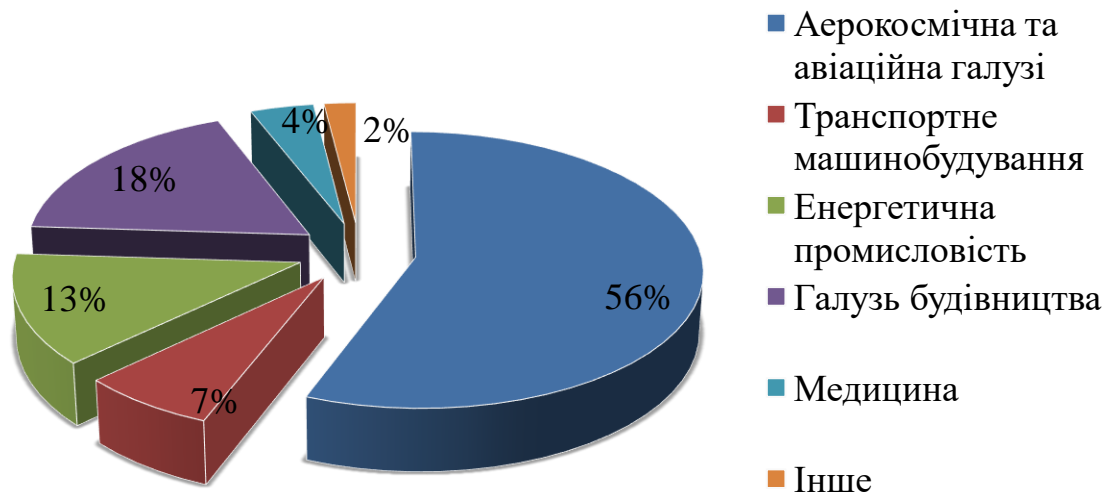


Рисунок 1.2 - Споживання титанової продукції різними галузями у світі за даними TITAN CORPORATION

Комбінат дотримується політики підвищення енергоефективності в споживанні енергоресурсів. Але частина технологій які використовуються на комбінаті вже застарілі тому, підвищення енергоефективності виробництва є пріоритетним для комбінату.

Підвищення енергоефективності можливе за рахунок проведення модернізації, технічного переозброєння та вдосконалення технології виробництва, тому цим питанням присвячена кваліфікаційна робота.

У кваліфікаційній роботі пропонуються наступні рішення з підвищення енергоефективності виробництва титанової губки:

— захід 1: підвищення циклового знімання (продуктивності) апаратів відновлення і вакуумної сепарації з 3 до 5 тон;

— захід 2: перехід на поєднану схему виробництва з апаратами підвищеної продуктивності (5 тон).

Підвищення ефективності виробничого процесу в цих заходах досягається за рахунок зростання продуктивності виробничих агрегатів, при якому зменшуються питомі витрати енергоресурсів на виготовлення титану губчастого (захід 1); за рахунок зниження втрат теплоти між процесами відновлення та вакуумної сепарації та збільшення продуктивності апаратів (захід 2).

У наступних розділах розглядаються вищенаведені заходи з точки зору техніки та економіки під цими ж назвами (захід 1, захід 2). Питома витрата електроенергії як основний технічний показник ефективності проєктів, що розглядаються, після здійснення заходу 1 печами відновлення і вакуумної сепарації вже відома із дослідних даних, тому далі розраховуються лише питомі витрати електроенергії після реалізації заходу 2 та питомі витрати цього енергоресурсу на допоміжні операції в обох випадках

## 2 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСУ В АПАРАТІ ВІДНОВЛЕННЯ ПІДВИЩЕНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ (5 Т) ПРИ ПОЄДНАНІЙ СХЕМІ ВИРОБНИЦТВА

Хімічна реакція відновлення тетрахлориду титану магнієм, що використовується у процесі титанового виробництва, екзотермічна. Якщо надлишок тепла не відводити, то температура в реакторі швидко зростатиме. Коли температура стінок реактора досягає 1085 °С, утворюється легкоплавка евтектика Fe-Ti, внаслідок чого стає можливим прогар стінки реактора.

Тепловий розрахунок процесу в апараті відновлення полягає в розрахунку теплового балансу процесу відновлення за наступної умови: температура на стінці реактора в ході реакції повинна підтримуватися в межах до 900 °С.

В основі процесу отримання титану губчастого лежить реакція відновлення тетрахлориду титану магнієм:



Годинні тепловиділення в результаті реакції при середній швидкості подання  $\text{TiCl}_4$  300 кг/год, прийнятій на КП «ЗТМК», складають, кДж/год:

$$Q_{\text{реак}} = (519 \cdot 300)/0,19 = 819\,501.$$

Загальний об'єм теплоти, що виділяється під час процесу відновлення в реакторі, витрачається в двох напрямках:

- втрати теплоти з кришки реактора (природною конвекцією і випромінюванням);
- втрати теплоти зі зливом хлориду магнію,

а решта відводиться примусовим повітряним охолодженням стінок реактора в зоні реакції.

Розглянемо кожну складову витрат окремо.

2.1 Розрахунок витрат теплоти, яка виділяється під час реакції відновлення

1. Втрати теплоти через кришку реактора.

За рахунок випромінювання теплота з поверхні розплаву передається екрануючій поверхні кришки апарату, а з неї природною конвекцією і випромінюванням розсіюється в довкілля. При розрахунку газову фазу над розплавом приймаємо прозорою.

Поверхню розплаву  $F$  визначаємо за формулою,  $m^2$ :

$$F = (\pi \cdot D^2)/4, \quad (2.1)$$

де  $D$  - діаметр реторти;

$$F = (3,14 \cdot 1,5^2)/4 = 1,77.$$

Приймаємо гранично допустиму температуру поверхні розплаву  $t_1 = 900^\circ C$ .

Знаходимо температуру поверхні екрану-кришки [17]:

$$\left(\frac{T_e}{100}\right)^4 = 0,5 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right], \quad (2.2)$$

де  $T_2$  – температура довкілля, приймаємо її рівною  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

$$\left(\frac{T_e}{100}\right)^4 = 0,5 \cdot \left[\left(\frac{1173}{100}\right)^4 + \left(\frac{293}{100}\right)^4\right] = 9\,503,$$

$$T_e = 100 \cdot \sqrt[4]{9503} = 987\text{ K},$$

$$t_e = 987 - 273 = 714\text{ }^\circ\text{C}.$$

Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та випромінюванням від екрану-кришки в довкілля,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{K}}$ :

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l = 2,56 \cdot \sqrt[4]{t_e - t_2} + C_{\text{сталі}} \cdot \left[\frac{\left(\frac{T_e}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_e - T_2}\right], \quad (2.3)$$

де  $C_{\text{сталі}}$  – коефіцієнт випромінювання сталі, дорівнює  $9 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{K}^4}$ .

$$\alpha = 2,56 \cdot 3,6 \cdot \sqrt[4]{(714 - 20)} + 9 \cdot \left[\frac{\left(\frac{987}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4}{987 - 293}\right] = 169,42.$$

Втрати теплоти через кришку в довкілля складуть,  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$Q_1 = \alpha \cdot F \cdot (T_e - T_2), \quad (2.4)$$

$$Q_1 = 169,42 \cdot 1,77 \cdot (987 - 293) = 208\,112,14.$$

Температура екрану-кришки на практиці може бути і нижче, ніж розрахована, за рахунок непрозорості середовища над розплавом, а також наявності водоохолоджуваних фланців у кришці реактора і охолодження в центральній горловині завдяки поданню тетрахлориду титану.

Втрати теплоти з водою, що охолоджує ущільнення між фланцями реактора і кришки, обчислюються за формулою,  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$Q_2 = \frac{\lambda}{h} \cdot F_{\text{об}} \cdot (t_e - t_{\text{вф}}), \quad (2.5)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності неіржавіючої сталі, дорівнює  $75 \frac{\text{кДж}}{\text{м} \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C}}$ ;

$h$  – висота кришки - 0,4 м;

$F_{\text{об}}$  – переріз циліндричної обичайки кришки, визначається за формулою,  $\text{м}^2$ :

$$F_{\text{об}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} - \frac{\pi \cdot (d-d_1)^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - (d-d_1)^2), \quad (2.6)$$

причому  $d$  – діаметр реактора, що дорівнює діаметру реторти ;

$d_1$  – товщина стінки обичайки кришки, становить 0,01 м;

$t_{\text{вф}}$  – температура водоохолоджуваних фланців, дорівнює  $50^\circ\text{C}$ .

$$F_{\text{об}} = \frac{3,14}{4} \cdot (1,5^2 - (1,5 - 0,01)^2) = 0,02 ,$$

$$Q_2 = \frac{75}{0,4} \cdot 0,02 \cdot (714 - 50) = 2\,490 .$$

Сумарні втрати тепла через кришку реактора,  $\text{кДж/год}$  :



$$Q_{кр} = Q_1 + Q_2, \quad (2.7)$$

$$Q_{кр} = 208112,14 + 2490 = 210\ 602,14.$$

2. Втрати тепла при зливі хлориду магнію знаходяться за формулою, кДж/год:

$$Q_{зл} = G \cdot [C_{тв} \cdot (t_{пл} - t_{д}) + \Delta H_{пл} + C_p \cdot (t_{пр} - t_{пл})], \quad (2.8)$$

де  $G$  – кількість зливаного хлориду магнію: 300 кг/год;

$C_{тв}$  – середня теплоємність твердого хлориду магнію – 0,842 кДж/(кг · °С) [22];

$C_p$  – середня теплоємність рідкого хлориду магнію – 0,974 кДж/(кг · °С) [22];

$t_{пл}$  – температура плавлення хлориду магнію, дорівнює 714 °С;

$t_{пр}$  – температура процесу, становить 900 °С;

$t_{д}$  – температура довкілля;

$\Delta H_{пл}$  – теплота плавлення хлориду магнію: 453,937 кДж/кг.

$$Q_{зл} = 300 \cdot [0,842 \cdot (714 - 20) + 453,937 + 0,974 \cdot (900 - 714)] = 365\ 834,7.$$

### 3. Розрахунок повітряного охолодження

Зайва теплота від реактора відводиться повітряним охолодженням.

Тепловий потік охолодження зовнішньої стінки реактора складе, кДж/год:

$$Q_{охол} = Q_{реак} - Q_{кр} - Q_{зл}, \quad (2.9)$$

$$Q_{охол} = 819\ 501 - 210\ 602,14 - 365\ 834,7 = 243\ 064,16 .$$

Витрата повітря на бічне охолодження реактора розраховується за формулою, м<sup>3</sup>/год:

$$V = \frac{Q_{охол}}{c'_{пов} (t_2 - t_1)}, \quad (2.10)$$

де  $c'_{пов}$  – питома об'ємна ізобарна теплоємність повітря:  $1,3 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}}$

$t_1$  – температура довкілля;

$t_2$  – температура повітря на виході із зони охолодження, становить  $50^\circ\text{С}$ .

$$V = \frac{243064,16}{1,29 \cdot (50 - 20)} = 6281.$$

Визначаємо швидкість повітря в кільцевому проміжку між реактором і футеруванням печі.

Переріз кільцевого проміжку,  $\text{м}^2$ :

$$F_{кп} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_2^2 - D_1^2) \quad (2.11)$$

де  $D_1$  – зовнішній діаметр реактора - 1,5 м;

$D_2$  – внутрішній діаметр печі - 2 м;

$$F_{кп} = \frac{\pi}{4} \cdot (2^2 - 1,5^2) = 1,37.$$

Знаходимо швидкість повітря за нормальних умов, м/с:

$$W_0 = \frac{V}{3600 \cdot F_{кп}}, \quad (2.12)$$

$$W_0 = \frac{6281}{3600 \times 1,37} = 1,27.$$

Дійсна швидкість повітря становитиме, м/с:

$$W_{\text{дійс.}} = W_0 \cdot (1 + a \cdot t_{\text{сер.пов.}}), \quad (2.13)$$

де  $t_{\text{сер.пов.}}$  – середня температура повітря в зоні охолодження: 35 °С;

$a$  – температурний коефіцієнт повітря, дорівнює  $3,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

$$W_{\text{дійс.}} = 1,27 \cdot [1 + 308 \cdot 3,26 \cdot 10^{-3}] = 2,55.$$

Представляємо кільцевий проміжок між стінкою печі і реактором еквівалентним діаметром, м:

$$d_{\text{екв}} = \frac{4 \cdot F_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} = D_2 - D_1, \quad (2.14)$$

$$d_{\text{екв}} = 2 - 1,5 = 0,5.$$

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі скористаємося теорією подібності і критеріальними рівняннями, що впливають з неї. Критерій Рейнольдса розраховується за формулою:

$$Re = (W_{\text{дійс.}} \cdot d_{\text{екв}}) / \nu, \quad (2.15)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість повітря –  $1,63 \cdot 10^{-5}$  при  $t = 35$  °С.

$$Re = \frac{2,55 \cdot 0,5}{1,63 \cdot 10^{-5}} = 78221.$$

Отже, режим руху повітря в зоні охолодження турбулентний.

Рівняння тепловіддачі:

$$Nu = 0,018 \cdot (Re)^{0,8}, \quad (2.16)$$

де  $Nu$  – критерій Нусельта, який характеризує процес теплообміну між теплоносієм і стінкою,

$$Nu = 0,018 \cdot (78\,221)^{0,8} = 147,89.$$

Знаходимо коефіцієнт тепловіддачі,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}^4}$ :

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d_{\text{екв}}}, \quad (2.17)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт тепловіддачі повітря, дорівнює  $0,097 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{С}}$ .

$$\alpha = 147,89 \cdot \frac{0,097}{0,5} = 28,69.$$

Запишемо рівняння тепловіддачі від стінок реактора при охолодженні його повітрям і виразимо з нього температуру внутрішньої стінки печі:

$$Q = Q_k + Q_l = \alpha \cdot F_{\text{охол}} \cdot (t_{\text{ст.рт.}} - t_{\text{сер.пов.}}) + E \cdot C_0 \cdot F_{\text{охол}} \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{ст.п.}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{вн.ст.печи}}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.18)$$

де  $F_{\text{охол}}$  – поверхня охолодження реторти,  $\text{м}^2$ :

$$F_{\text{охол}} = \pi \cdot D_1 \cdot H, \quad (2.19)$$

причому  $H$  – висота зони охолодження, складає 0,8 м;

$$F = 3,14 \cdot 1,5 \cdot 0,8 = 3,77;$$

$t_{\text{ст.р.}}$  – допустима температура стінки реторти: 900 °С;

$t_{\text{сер.пов.}}$  – середня температура повітря, що охолоджує реактор: 35 °С;

$C_o$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, дорівнює  $20,412 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}^4}$ ;

$E$  – зведена міра чорноти системи, у якій відбувається теплообмін випромінюванням:

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{D_1}{D_2} \cdot \left( \frac{1}{E_2} - 1 \right)}, \quad (2.20)$$

де  $E_1$  – міра чорноти реактора - 0,9;

$E_2$  – міра чорноти шамотного футерування - 0,8,

$$E = \frac{1}{\frac{1}{0,9} + \frac{1,5}{2} \cdot \left( \frac{1}{0,8} - 1 \right)} = 0,77.$$

Тоді маємо:

$$243\,064,16 = 28,69 \cdot 3,77 \cdot (900 - 35) + 0,77 \cdot 20,412 \cdot 3,77 \cdot \left[ \left( \frac{1173}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{вн.ст.печі}}}{100} \right)^4 \right];$$

$$\left( \frac{T_{\text{вн.ст.печі}}}{100} \right)^4 = \left( \frac{1173}{100} \right)^4 - \frac{243\,064,16 - 28,69 \cdot 3,77 \cdot (900 - 35)}{0,77 \cdot 20,412 \cdot 3,77};$$

$$\left(\frac{T_{\text{вн.ст.печи}}}{100}\right)^4 = 16\,408,69;$$

$$T_{\text{вн.ст.печи}} = 100 \cdot \sqrt[4]{16\,408,69} = 1131,8 \text{ К};$$

$$t_{\text{вн.ст.печи}} = 1131,8 - 273 = 858,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Результати розрахунку занесемо у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Частковий тепловий баланс апарату відновлення

Прихід	Витрата
Тепловиділення в результаті перебігу реакції відновлення: $Q_{\text{реак}} = 819\,501 \text{ кДж/год}$	Втрати через кришку реактора: $Q_{\text{кр}} = 210\,602,14 \text{ кДж/год}$ Втрати при зливі $MgCl_2$ : $Q_{\text{зл}} = 365\,834,7 \text{ кДж/год}$ Тепло, що відводиться повітряним охолодженням: $Q_{\text{охол}} = 243\,064,16 \text{ кДж/год}$
Разом: 819 501кДж/год	Разом: 819 501 кДж/год

2.2 Розрахунок кількості теплоти, яку необхідно отримати за рахунок зовнішнього нагріву в процесі відновлення

Піч розраховуємо в двох режимах роботи:

— стаціонарному тепловому режимі в період ведення процесу відновлення;

— в режимі нагріву апарату відновлення з оборотним конденсатом;

Розглядаємо стаціонарний тепловий режим печі.

Визначимо втрати тепла через бічну поверхню печі.

Піч складається із футерування, утвореного вогнетривким і теплоізоляційним шарами, та сталевого кожуха.

Матеріал вогнетривкого шару – легковаговий шамот. Товщина шару:  $d_1 = 0,12$  м; густина матеріалу:  $\rho = 1,25$  т/м<sup>3</sup>; коефіцієнт теплопровідності матеріалу:  $\lambda_1 = 2,5 \frac{\text{кДж}}{\text{м}\cdot\text{год}\cdot^\circ\text{C}}$ .

Середня площа поверхні вогнетривкого шару, м<sup>2</sup>:

$$F = \pi \cdot d_{\text{сер}} \cdot H, \quad (2.21)$$

де  $d_{\text{сер}}$  – середній діаметр шару, дорівнює 2,12 м;

$H$  – висота шару, становить 5,26 м;

$$F_1 = 3,14 \cdot 2,12 \cdot 5,26 = 35,02.$$

Теплоізоляційний шар виконаний з пінодіатоміту. Товщина шару:  $d_1 = 0,36$  м; густина матеріалу:  $\rho = 0,6$  т/м<sup>3</sup>; коефіцієнт теплопровідності матеріалу:  $\lambda_2 = 0,62 \frac{\text{кДж}}{\text{м}\cdot\text{год}\cdot^\circ\text{C}}$ .

Середня площа поверхні теплоізоляційного шару знаходиться за формулою (2.21), м<sup>2</sup>, причому у формулі  $d_{\text{сер}} = 2,62$  м;  $H = 5,56$  м.

$$F_2 = 3,14 \cdot 2,62 \cdot 5,56 = 45,7.$$

Товщина сталевого кожуха печі:  $d_3 = 0,02$  м; коефіцієнт теплопровідності сталі:  $\lambda_3 = 185,3 \frac{\text{кДж}}{\text{м}\cdot\text{год}\cdot^\circ\text{C}}$ .

Площа поверхні кожуха печі розраховується за формулою (2.21), м<sup>2</sup>, у ній:  $d_{\text{сер}} = 3,02$  м;  $H = 5,6$  м:

$$F_3 = 3,14 \cdot 3,02 \cdot 5,6 = 53,1.$$

Обчислимо значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією для взятих довільно температур зовнішньої стінки печі  $t = 40, 60, 80$  °С за формулою:

$$\alpha_k^t = 9,216 \cdot \sqrt[4]{t_1 - t_2}, \quad (2.22)$$

де  $t_1$  – вибрана довільно температура зовнішньої стінки печі, °С,  $t_2$  – температура довкілля, °С.

Для вертикальної стінки,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°С}}$ :

$$\alpha_k^{40} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{40 - 20} = 19,48 ;$$

$$\alpha_k^{60} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{60 - 20} = 23,18 ;$$

$$\alpha_k^{80} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{80 - 20} = 25,67.$$

Втрати тепла конвекцією і випромінюванням визначаються за формулою,  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$Q_{\text{к+в}}^t = \alpha_k^t \cdot F_3 \cdot (t_1 - t_2) + E \cdot C_{\text{сталі}} \cdot F_3 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2.23)$$

де  $E$  - міра чорноти системи, у якій відбувається теплообмін: 0,8,

$$\begin{aligned} Q_{\text{к+в}}^{40} &= 19,48 \cdot 53,1 \cdot (40 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 53,1 \cdot \left[ \left( \frac{313}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] \\ &= 29\,205,37 ; \end{aligned}$$



$$Q_{K+B}^{60} = 23,18 \cdot 53,1 \cdot (60 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 53,1 \cdot \left[ \left( \frac{333}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 68\,068,63 ;$$

$$Q_{K+B}^{80} = 25,67 \cdot 53,1 \cdot (80 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 53,1 \cdot \left[ \left( \frac{353}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 112\,971,81 .$$

Розраховуємо втрати тепла теплопровідністю за формулою, :  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$

$$Q_T^t = k \cdot F_3 \cdot (t_{\text{вн.ст.печи}} - t_1), \quad (2.24)$$

де  $k$  - коефіцієнт теплопередачі, розраховується за формулою, :

$$k = \frac{1}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} ; \quad (2.25)$$

$$k = \frac{1}{\frac{0,12}{2,5} + \frac{0,36}{0,62} + \frac{0,02}{185,3}} = 1,59.$$

$$Q_T^{40} = 1,59 \cdot 53,1 \cdot (858,8 - 40) = 69\,130,47 ;$$

$$Q_T^{60} = 1,59 \cdot 53,1 \cdot (858,8 - 60) = 67\,441,89 ;$$

$$Q_T^{80} = 1,59 \cdot 53,1 \cdot (858,8 - 80) = 65\,753,31 .$$

Будуємо графіки залежностей  $Q_{к+в}^t = f(t)$  і  $Q_T = f(t)$  в координатах  $x$  ( $t, \text{ }^\circ\text{C}$ ) та  $y$  ( $Q, \text{кДж/год}$ ) та знаходимо їх точку перетину, її абсциса відповідає дійсній температурі зовнішньої поверхні печі (рис. 2.1).

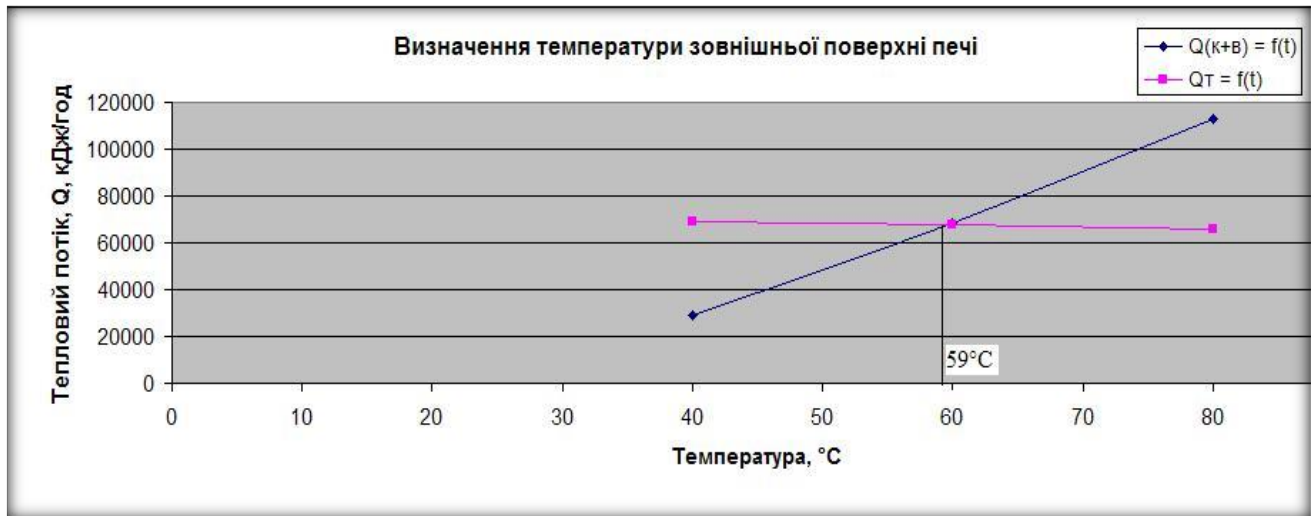


Рисунок 2.1 – Визначення температури зовнішньої поверхні печі

Вона дорівнює  $t_{3.ст.} = 59 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для цієї температури обчислимо значення коефіцієнта конвективної тепловіддачі (за формулою (2.22)),  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{C}}$  і коефіцієнта тепловипромінювання через зовнішню поверхню печі,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{K}}$ :

$$\alpha_k^{59} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{59 - 20} = 23,03 ;$$

$$\alpha_g^t = \frac{C_{стали} \cdot \left[ \left( \frac{T_{3.ст.}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_{3.ст.} - T_2}; \quad (2.26)$$

$$\alpha_g^{59} = \frac{9 \cdot \left[ \left( \frac{332}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right]}{332 - 293} = 11,03 ;$$

Загальний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією і випромінюванням

складе,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}}$ :

$$\alpha_{\Sigma}^{59} = \alpha_k^{59} + \alpha_e^{59}; \quad (2.27)$$

$$\alpha_{\Sigma}^{59} = 11,03 + 23,03 = 34,06$$

Знаходимо втрати тепла через бічну поверхню печі,  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$\Delta Q_{\text{біч}} = \frac{t_{\text{вн.ст.печі}} - t_2}{\frac{d_1}{\lambda_1 \cdot F_1} + \frac{d_2}{\lambda_2 \cdot F_2} + \frac{d_3}{\lambda_1 \cdot F_3} + \frac{1}{\alpha_{\Sigma}^{59} \cdot F_3}}; \quad (2.28)$$

$$\Delta Q_{\text{біч}} = \frac{858,8 - 20}{\frac{0,12}{2,5 \cdot 35,02} + \frac{0,36}{0,62 \cdot 45,7} + \frac{0,02}{185,3 \cdot 53,1} + \frac{1}{34,06 \cdot 53,1}} = 57\,329,62$$

Розраховуємо втрати теплоти через під печі.

У зв'язку зі збільшенням розмірів апарату відновлення по довжині, з метою запобігання втратам магнію через погане розділення магнію і хлориду магнію внаслідок заморожування хлориду магнію, температура поду печі впродовж усього процесу постійно підтримується на рівні 900° С.

Вихідні дані:

- товщина шару шамоту череня печі  $d_1 = 0,14$  м,  $d_{\text{сер}} = 2,12$  м;
- товщина пінодіатомітового шару  $d_2 = 0,28$  м,  $d_{\text{сер}} = 2,62$  м;
- товщина металевого кожуха  $d_3 = 0,02$  м,  $d_{\text{сер}} = 3,02$  м.

Обчислюємо середні площі поверхонь шарів за формулою, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{\pi \cdot d_{\text{сер}}^2}{4}; \quad (2.29)$$

$$F_1 = \frac{\pi \cdot 2,12^2}{4} = 3,53 ;$$

$$F_2 = \frac{\pi \cdot 2,62^2}{4} = 5,39 ;$$

$$F_3 = \frac{\pi \cdot 3,02^2}{4} = 7,16 .$$

Для визначення температури поверхні нижньої частини печі довільно задаємося кількома значеннями температур:  $t = 60, 70, 80$  °С.

Знаходимо коефіцієнт конвективної тепловіддачі для вибраних температур за формулою (2.22),  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°С}}$ :

$$\alpha_k^{60} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{60 - 20} = 23,18;$$

$$\alpha_k^{70} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{70 - 20} = 24,51 ;$$

$$\alpha_k^{80} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{80 - 20} = 25,65 .$$

Отримані значення коефіцієнтів конвективної тепловіддачі для стінок, розташованих горизонтально, мають бути зменшені на 30 %, :  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°С}}$ ,

$$\alpha_k'^{60} = 0,7 \cdot 23,18 = 16,23 ;$$

$$\alpha_k'^{70} = 0,7 \cdot 24,51 = 17,16 ;$$

$$\alpha_k'^{80} = 0,7 \cdot 25,65 = 17,96 .$$

Втрати тепла конвекцією і випромінюванням через під печі розраховуємо за формулою (2.23),  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$Q_{\text{к+в}}^{60} = 16,23 \cdot 7,16 \cdot (60 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 7,16 \cdot \left[ \left( \frac{333}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] \\ = 7\,187,89 ;$$

$$Q_{\text{к+в}}^{70} = 17,16 \cdot 7,16 \cdot (70 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 7,16 \cdot \left[ \left( \frac{343}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] \\ = 9\,479,33 ;$$

$$Q_{\text{к+в}}^{80} = 17,96 \cdot 7,16 \cdot (80 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 7,16 \cdot \left[ \left( \frac{353}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] \\ = 11\,920,89 .$$

Втрати тепла теплопровідністю визначаємо за формулою (2.24),  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$  а коефіцієнт теплопередачі з формули (2.24) – за формулою (2.25):

$$k = \frac{1}{\frac{0,14}{2,5} + \frac{0,28}{0,62} + \frac{0,02}{185,3}} = 1,97 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}} ;$$

$$Q_{\text{т}}^{60} = 1,97 \cdot 7,16 \cdot (900 - 60) = 11\,848,37 ;$$

$$Q_{\text{т}}^{70} = 1,97 \cdot 7,16 \cdot (900 - 70) = 11\,707,32 ;$$

$$Q_{\text{т}}^{80} = 1,97 \cdot 7,16 \cdot (900 - 80) = 11\,566,26 .$$

Будуємо графіки залежностей  $Q_{\text{к+в}}^t = f(t)$  і  $Q_{\text{т}}^t = f(t)$  в координатах  $x$  ( $t$ , °C) та  $y$  ( $Q$ , кДж/год) та знаходимо їх точку перетину, її абсциса відповідає дійсній температурі поду печі (рис. 2.2).

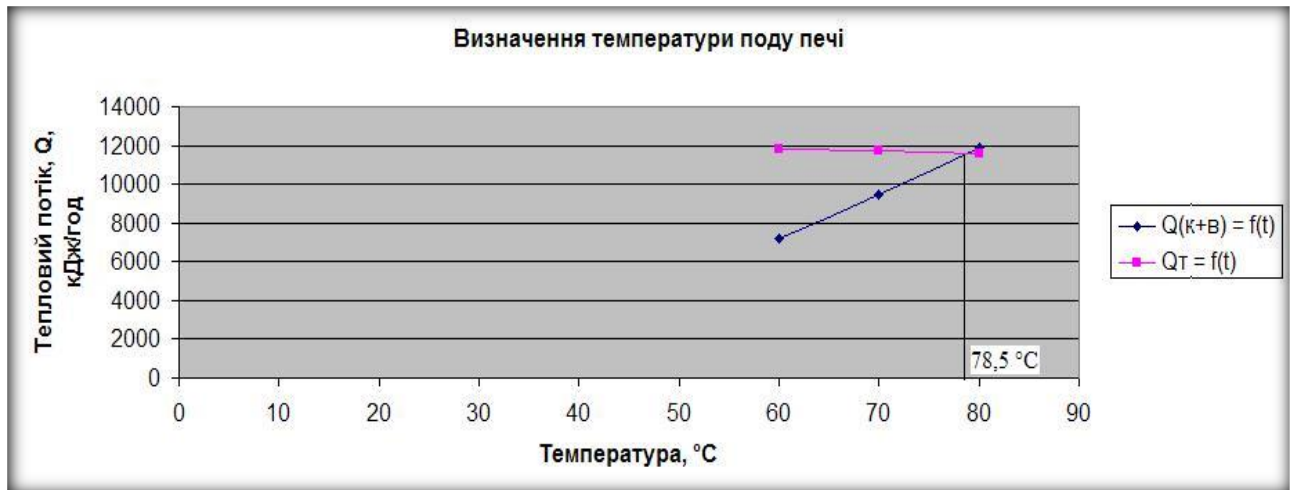


Рисунок 2.2 – Визначення дійсної температури поду печі

Вона дорівнює 68 °C.

За цієї температури обчислюємо коефіцієнти тепловіддачі конвекцією,

$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}}$ ; і тепловипромінювання,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}}$  за формулами (2.22) та (2.26)

відповідно:

$$\alpha_k^t = 9,216 \cdot \sqrt[4]{78,5 - 20} = 25,49 ;$$

$$a_e^{78,5} = \frac{9 \cdot \left[ \left( \frac{351,5}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right]}{351,5 - 293} = 12,15$$

Сумарний коефіцієнт теплообміну конвекцією і випромінюванням через під печі розраховуємо за формулою (2.27),  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}}$ :

$$\alpha_\Sigma^{78,5} = 25,49 + 12,15 = 37,64.$$

Втрати тепла через під печі знаходимо за формулою (2.28),  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$\Delta Q_{\text{під}} = \frac{900 - 20}{\frac{0,14}{2,5 \cdot 3,53} + \frac{0,28}{0,62 \cdot 5,39} + \frac{0,02}{185,3 \cdot 7,16} + \frac{1}{37,64 \cdot 7,16}} = 8\,512,55.$$

Розглядаємо режим нагріву апарату з оборотним конденсатом.

У процесі вакуумної сепарації відбувається розділення реакційної маси, отриманої в апараті відновлення. Магній і хлорид магнію, що мають високий тиск пари, випаровуються і конденсуються в конденсаторі, який згодом використовується при монтажі апарату відновлення, стаючи реактором.

Склад конденсату в реакторі:

- магній: 3388,55 кг;
- хлорид магнію: 597 кг.

Реактор нагрівають до 800 °С.

Кількість теплоти, необхідного на нагрів і плавлення речовини:

$$W = G \cdot [C_{\text{тв}} \cdot (t_{\text{пл}} - t_{\text{д}}) + \Delta H_{\text{пл}} + C_{\text{р}} \cdot (t_{\text{пр}} - t_{\text{пл}})], \quad (2.30)$$

де  $G$  – маса речовини, кг;

$C_{\text{тв}}$  – теплоємність речовини в твердому стані,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$ ;

$t_{\text{пл}}$  – температура плавлення речовини, °С;

$t_{\text{д}}$  – температура доквілля, °С;

$\Delta H_{\text{пл}}$  – теплота плавлення речовини,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;

$C_{\text{р}}$  – теплоємність речовини в рідкому стані,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$ ;

$t_{\text{пр}}$  – температура процесу, °С.

Кількість теплоти, необхідної на нагрів і плавлення магнію, кДж:

$$W_{\text{Mg}} = 3388,55 \cdot [1,15 \cdot (650 - 20) + 393 + 1,4 \cdot (800 - 650)] = 4\,498\,300,13.$$

Кількість теплоти, необхідної на нагрів і плавлення хлориду магнію,  
кДж:

$$W_{\text{MgCl}_2} = 597 \cdot [0,842 \cdot (714 - 20) + 453,937 + 0,974 \cdot (800 - 714)] = 669\,863,25.$$

Розрахуємо кількість тепла, необхідну на нагрів реторти.

Поверхня реторти, м<sup>2</sup>:

$$F = \pi DH + \frac{\pi D^2}{4}, \quad (2.31)$$

де Н – висота реторти, дорівнює 3,8 м;

$$F = 3,14 \cdot 1,5 \cdot 3,8 + \frac{3,14 \cdot 1,5^2}{4} = 19,66.$$

Об'єм сталі реторти, м<sup>2</sup>:

$$V = F \cdot d; \quad (2.32)$$

де d - товщина стінки реторти, яка дорівнює 0,03м.

$$V = 19,66 \cdot 0,03 = 0,59.$$

Маса реторти, т:

$$m = V \cdot \rho; \quad (2.33)$$

де  $\rho$  – густина сталі X18H10T - 8,65 т/м<sup>3</sup>,



$$m = 0,59 \cdot 8,65 = 5,1 .$$

Кількість теплоти, необхідної для нагріву реторти, кДж:

$$W_p = m \cdot C_p \cdot (t_{np} - t_d), \quad (2.34)$$

де  $C_p$  – питома теплоємність сталі, дорівнює  $0,568 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

$$W_p = 5100 \cdot 0,568 \cdot (800 - 20) = 2\,370\,888.$$

Визначаємо витрату теплоти на нагрів футерування печі (20...800) °С.

Витрата теплоти на нагрів кладки шамоту вогнетривкого шару, кДж :

$$W_{ш} = G \cdot C (t_{np} - t_d), \quad (2.35)$$

де  $G$  – маса шамоту - 2675 кг;

$C$  – питома теплоємність шамоту, яка дорівнює  $1,093 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

$$W_{ш} = 2675 \cdot 1,093 \cdot (800 - 20) = 2\,280\,544,5.$$

Витрата теплоти на нагрів кладки пінодіатомітової цегли теплоізоляційного шару обчислюється за формулою (2.35), в якій  $G$  - маса пінодіатоміту, дорівнює 6370 кг;  $C$  - питома теплоємність пінодіатоміту, яка дорівнює  $0,98 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

$$W_{п} = 6370 \cdot 0,98 \cdot (800 - 20) = 4\,869\,228 \text{ кДж.}$$

Час розігрівання апарату і печі згідно з технічними умовами складає 8 годин, тому для знаходження відповідних теплових потоків нагрівання різних елементів апарату відновлення і сировини кількість теплоти, необхідної на нагрів, ділиться на цей час.

Знаходимо втрати теплоти через кришку при нагріві печі.

Розраховуємо температуру поверхні екрану-кришки за формулою (2.2), в якій  $T_1 = 1073 \text{ K}$  – температура розплаву одразу після нагріву:

$$T_e = 903,53 \text{ K або } t_e = 630,53 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Обчислюємо значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією та випромінюванням від екрану-кришки в довкілля за формулою (2.3),  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{K}}$ :

$$\alpha = 2,56 \cdot 3,6 \cdot \sqrt[4]{(630,53 - 20)} + 9 \cdot \left[ \frac{\left(\frac{903,53}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4}{903,53 - 293} \right] = 142,97 .$$

Втрати теплоти через кришку в довкілля становитимуть (формула (2.4)),  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$Q_1 = 142,97 \cdot 1,77 \cdot (903,53 - 293) = 154\,498,83 .$$

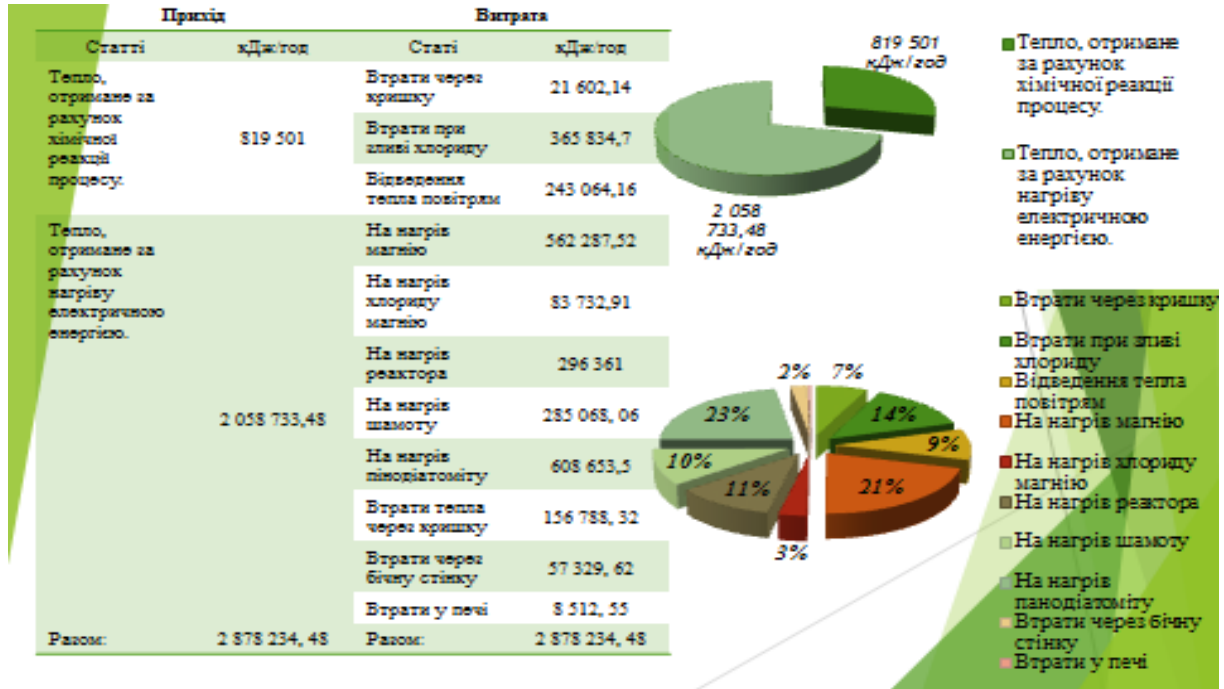
Визначаємо втрати теплоти з водою, що охолоджує ущільнення між фланцями реактора і кришки, за формулою (2.5)  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ ,

$$Q_2 = \frac{75}{0,4} \cdot 0,02 \cdot (630,53 - 50) = 2\,289,49 .$$

Сумарні втрати теплоти через кришку складуть (формула (2.7)),  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$Q_{\text{кр}} = 154\,498,83 + 2\,289,49 = 156\,788,32.$$

На рисунку 2.3 наведений загальний тепловий баланс печі відновлення, результати розрахунків зведені в таблицю 2.2.



Таблиця 2.2 – Загальний тепловий баланс процесу відновлення

Прихід		Витрата	
Статті	кДж/год	Статті	кДж/год
Тепло, отримане за рахунок хімічної реакції процесу	819 501	Втрати через кришку	210 602,14
		Втрати при зливі хлориду	365 834,7
		Відведення тепла повітрям	243 064,16
Тепло, отримане за рахунок нагріву електричною енергією	2 058 733,48	На нагрів магнію	562 287,52
		На нагрів хлориду магнію	83 732,91
		На нагрів реактора	296 361
		На нагрів шамоту	285 068,06
		На нагрів пінодіатоміту	608 653,5
		Втрати тепла через кришку	156 788,32
		Втрати через бічну стінку	57 329,62
		Втрати через під печі	8 512,55
Разом:	2 878 234,48	Разом:	2 878 234,48

Як видно з таблиці, тепловиділення екзотермічної реакції використовуються неефективно.

Окрім відведення частини теплоти повітрям з метою недопущення прогару стінки реактора внаслідок бурхливого виділення теплоти під час реакції, яку можна використати на допоміжні потреби виробництва (наприклад, шляхом її утилізації), решта тепла втрачається.

Зменшення непродуктивних втрат теплоти можливе за рахунок використання теплоти реакції відновлення для більш повного прогріву реакційної маси в реторті задля скорочення витрат електроенергії на роботу печі для задоволення цих потреб. Для цього необхідна ефективна теплоізоляція кришки реактора, а також зміни в конструкції реактора й ефективне управління ходом процесу.

### 2.3 Тепловий розрахунок процесу в апараті вакуумної сепарації

Початкова температура реакційної маси в реакторі, який встановлено в секцію сепарації двохсекційної печі опору, становить 700 °С, а самої реторти – 600 °С.

Розраховуємо кількість теплоти, необхідної для випаровування магнію в оборотну реторту, кДж :

$$W_{Mg} = G \cdot [\alpha_{\text{вип}} + C_p \cdot (t_{\text{пр}} - t_0)] , \quad (2.36)$$

де  $\alpha_{\text{вип}}$  – прихована теплота випаровування магнію:  $\alpha_{\text{вип}} = 5\,606,5$  кДж/(кг · °С);

$t_{\text{пр}}$  – температура ведення процесу вакуумної сепарації, дорівнює 1010 °С;

$t_0$  – температура реакційної маси перед початком процесу.

$$W_{Mg} = 3388,55 \cdot (5606,5 + 1,4 \cdot (1010 - 700)) = 20\,468\,536,28 .$$

Визначимо кількість теплоти, необхідної для випаровування хлориду магнію за формулою, кДж:

$$W_{MgCl_2} = G \cdot [C_{ТВ} \cdot (t_{пл} - t_0) + \alpha_{пл} + \alpha_{вип} + C_p \cdot (t_{пр} - t_{пл})];$$

де  $\alpha_{пл}$  – прихована теплота плавлення хлориду магнію – 453,937 кДж/(кг · °С);

$\alpha_{вип}$  – прихована теплота випаровування хлористого магнію – 1368 кДж/(кг · °С);

$$\begin{aligned} W_{MgCl_2} &= 597 \cdot [0,842 \cdot (714 - 700) + 453,937 + 1368 + 0,974 \cdot (1010 - 714)] \\ &= 1\,266\,851,31. \end{aligned}$$

Знаходимо кількість теплоти, необхідної на нагрів титанової губки, за формулою, кДж :

$$Q_{Ti} = G \cdot C \cdot (t_{пр} - t_0), \quad (2.37)$$

де  $G$  – маса титанової губки, становить 4 300 кг;

$C$  – теплоємність титану, дорівнює 0,628 кДж/(кг · °С);

$$Q_{Ti} = 4\,300 \cdot 0,628 \cdot (1010 - 700) = 837\,124.$$

Кількість теплоти, необхідної для нагріву реактора, обчислюємо за формулою (2.37), в якій теплоємність неіржавіючої сталі  $C = 0,596$  кДж/(кг · °С), кДж:

$$Q_{rem} = 5100 \cdot 0,596 \cdot (1010 - 600) = 1\,246\,236.$$

Розраховуємо втрати теплоти в оборотну реторту, вони складаються з втрат через кришку реактора та втрат через центральний патрубок. Втрати через кришку реактора знаходяться за формулою, кДж/год:

$$Q_{\text{кр}} = E'_{\text{зв}} \cdot C_0 \cdot F'_{\text{кр}} \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2.38)$$

де  $E'_{\text{зв}}$  – зведена міра чорноти системи, визначається за формулою:

$$E'_{\text{зв}} = \frac{E_{\text{зв}}}{n+1}, \quad (2.39)$$

причому  $E_{\text{зв}}$  – міра чорноти системи без екрану, дорівнює 0,64;

$n$  – кількість екранів,  $n = 1$ ;

$$E'_{\text{зв}} = \frac{0,64}{1+1} = 0,32.$$

$C_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, становить 20,412кДж/(м<sup>2</sup> · год · К<sup>4</sup>).

$F'_{\text{кр}}$  – площа поверхні кришки без патрубку (площа поверхні патрубку – 0,02м<sup>2</sup>), м<sup>2</sup>:

$$F'_{\text{кр}} = F_{\text{кр}} - F_{\text{патр}}; \quad (2.40)$$

$$F'_{\text{кр}} = 1,77 - 0,02 = 1,75 .$$

$T_1$  – температура процесу, К;

$T_2$  – температура кришки і патрубку, складає 373 К;

$$Q_{\text{ц.п.}} = 0,32 \cdot 20,412 \cdot 1,75 \cdot \left[ \left( \frac{1283}{100} \right)^4 - \left( \frac{373}{100} \right)^4 \right] = 307\,515,19 .$$

Втрати через центральний патрубков обчислюємо за формулою (2.38), в якій  $E_{зв} = 0,9$ , а замість площі поверхні кришки  $F'_{кр}$  підставляємо площу поверхні патрубку, кДж/год:

$$Q_{ц.п.} = 0,9 \cdot 20,412 \cdot 0,02 \cdot \left[ \left( \frac{1283}{100} \right)^4 - \left( \frac{373}{100} \right)^4 \right] = 9\,931,97.$$

Сумарні втрати в оборотну реторту дорівнюють, кДж/год:

$$Q_{о.р.} = 307515,19 + 9931,97 = 317\,447,16.$$

Проводимо розрахунок теплоти, яка втрачається при охолодженні оборотної реторти.

Охолодження оборотної реторти від температури процесу сепарації до температури 100 °С здійснюється для конденсації магнію і його хлориду, які надходять у реторту у вигляді парів, з метою уможливлення їх подальшого використання в технологічному процесі.

Визначаємо тепловиділення при конденсації магнію, які складаються із чотирьох складових:

$$W_{Mg} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4, \quad (2.41)$$

де  $W_1$  – теплота конденсації, кДж:

$$W_1 = G \cdot q'; \quad (2.42)$$

причому  $q'$  – прихована теплота сублімації магнію – 5606,5 кДж/кг;

$$W_1 = 3388,55 \cdot 5606,5 = 18\,997\,905,58;$$

$W_2$  – тепловиділення при охолодженні магнію до температури плавлення, кДж:

$$W_2 = G \cdot C_p \cdot (t_{пр} - t_{пл}); \quad (2.43)$$

$$W_2 = 3388,55 \cdot 1,4 \cdot (1010 - 650) = 1\,707\,829,2;$$

$W_3$  – тепловиділення при затвердінні рідкого магнію, кДж:

$$Q_3 = G \cdot \alpha_{пл}; \quad (2.44)$$

причому  $\alpha_{пл}$  – прихована теплота плавлення магнію – 393 кДж/кг,

$$Q_3 = 3388,55 \cdot 393 = 1\,331\,700,15 ;$$

$W_4$  – тепловиділення при охолодженні твердого магнію до температури водоохолоджуваної стінки реторти,

$$Q_4 = G \cdot C_{тв} \cdot (t_{пл} - t_{ст}); \quad (2.45)$$

причому  $t_{ст}$  – температура водоохолоджуваної стінки;

$$Q_4 = 3388,55 \cdot 1,15 \cdot (650 - 100) = 2\,143\,257,88.$$

Сумарні тепловиділення при конденсації магнію, кДж:

$$Q_{Mg} = 18\,997\,905,58 + 1\,707\,829,2 + 1\,331\,700,15 + 2\,143\,257,88 = 24\,180\,692,81.$$

Тепловиділення при конденсації пари магній хлориду обчислюємо за формулою (2.41), в якій  $W_1$  дорівнює (формула (2.42)), кДж:



$$Q_1 = 597 \cdot 1368 = 816\,696 ;$$

$W_2$  становить (формула (2.43)), кДж:

$$W_2 = 597 \cdot 0,974 \cdot (1010 - 714) = 172\,117,49 .$$

$W_3$  складає (формула (2.44)), : кДж:

$$W_3 = 597 \cdot 453,937 = 271\,000,39 ;$$

$W_4$  дорівнює (формула (2.45)), кДж:

$$W_4 = 597 \cdot 0,842 \cdot (714 - 100) = 308\,641,84;$$

тоді

$$W_{MgCl_2} = 816\,696 + 172\,117,49 + 271\,000,39 + 308\,641,84 = 1\,568\,455,72 \text{ кДж.}$$

На період сублімації основної кількості домішок витрачається приблизно до 20 % часу витримки. Решта часу процесу сепарації йде на видалення залишків магнію і хлористого магнію з титанової губки. На підставі дослідних даних тривалість високотемпературної витримки приймаємо 40 годин. Час інтенсивної сублімації знаходимо пропорційно, год:

$$T = \frac{40 \cdot 20}{100} = 8 .$$

Годинні тепловиділення при конденсації магнію і його хлориду, кДж/год:

$$Q_i = \frac{W_i}{8}, \quad (2.46)$$

$$Q_{Mg} = \frac{24180692,81}{8} = 3022586,6;$$

$$Q_{MgCl_2} = \frac{1568455,72}{8} = 196056,97.$$

Тепловий потік, який необхідно відвести від оборотної реторти (тепловий потік охолодження), кДж/год:

$$Q_{\text{охол}} = Q_{Mg} + Q_{MgCl_2} + Q_{кр}, \quad (2.47)$$

$$Q_{\text{охол}} = 3\,022\,586,6 + 196\,056,97 + 317\,447,16 = 3\,536\,090,73.$$

Проводимо розрахунок водяного охолодження оборотної реторти (конденсатора).

Охолодження реторти-конденсатора під час процесу сепарації здійснюється водою. З практичних даних відомо, що температура води після охолодження – близько 70 °С. Початкова температура води – 20 °С. Дійсна поверхня зрошування водою реторти-конденсатора, м<sup>2</sup> :

$$F_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4} + \pi \cdot d \cdot H, \quad (2.48)$$

де  $d$  – діаметр реторти: 1,5 м, а  $H$  – висота реторти: 3,8 м;

$$F_d = \frac{\pi \cdot 1,5^2}{4} + \pi \cdot 1,5 \cdot 3,8 = 19,66.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією визначається за формулою,

$$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}};$$

$$\alpha = \frac{Q_{\text{охол}}}{F_d \cdot (t_2 - t_1)}, \quad (2.49)$$

де  $t_1$  – початкова температура охолоджувальної води, °С;

$t_2$  – кінцева температура охолоджувальної води, °С;

$$\alpha = \frac{3\,536\,090,73}{19,66 \cdot (70 - 20)} = 3597,24.$$

Критерій Нусельта дорівнює:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (2.50)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність сталі, з якої виготовлена реторта, складає

$$0,648 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$Nu = \frac{3597,24 \cdot 1,5 \cdot 1000}{0,648 \cdot 3600} = 2313,04.$$

Критерій Рейнольдса обчислюється за формулою:

$$Re = \left( \frac{Nu}{0,037 \cdot Pr_p^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_c}\right)^{0,25}} \right)^{\frac{1}{0,8}}; \quad (2.51)$$

де  $Pr_p$  – критерій Прандтля при 20 °С, дорівнює 7,01;

$Pr_c$  – критерій Прандтля при 70 °С, дорівнює 2,61;

$$Re = \left( \frac{2313,04}{0,037 \cdot 7,01^{0,43} \cdot \left(\frac{7,01}{2,61}\right)^{0,25}} \right)^{\frac{1}{0,8}} = 254\,869.$$

Масова витрата води на охолодження знаходиться за формулою,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ :

$$G = \frac{\pi \cdot d \cdot \mu \cdot Re}{4}, \quad (2.52)$$

де  $\mu$  – динамічна в'язкість води при 45 °С, дорівнює  $0,6 \cdot 10^{-3}$  Па · с;

$$G = \frac{\pi \cdot 1,5 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 254\,869}{4} = 180,07.$$

Об'ємна витрата води на охолодження розраховується за формулою:

$$V = \frac{G}{\rho}, \quad (2.53)$$

де  $\rho$  – густина води при 45 °С, складає 990 кг/м<sup>3</sup>.

$$V = \frac{180,07}{990} = 0,18 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \text{ або приблизно } 650 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Для забезпечення охолодження реторти-конденсатора необхідно встановити доцентровий електричний насос 1Д800-56 з подачею 800 м<sup>3</sup>/год потужністю 166 кВт з частотою обертання валу 1500 об/хв.

Розглядаємо втрати теплоти секцією сепарації печі в стаціонарному режимі.

1) втрати через бічну поверхню печі.

Початкові дані:

$t_p$  – робоча температура печі: 1010 °С;

$t_d$  – температура довкілля: 20°С;

$\delta_1$  – товщина шамоту легкої ваги – 0,12 м;

$\delta_2$  – товщина пінодіатоміту – 0,36 м;

$\delta_3$  – товщина металевого кожуха – 0,02 м.

Середні поверхні вогнетривкого й теплоізоляційного шарів та кожуха печі відповідно, обчислені за формулою (2.21):

$$F_1 = 35,02 \text{ м}^2; F_2 = 45,7 \text{ м}^2; F_3 = 53,1 \text{ м}^2.$$

Знайдемо значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією для взятих довільно температур зовнішньої стінки печі  $t = 50, 70, 90$  °С за формулою

$$(2.22), \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°С}};$$

$$\alpha_k^{50} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{50 - 20} = 21,57,$$

$$\alpha_k^{70} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{70 - 20} = 24,51;$$

$$\alpha_k^{90} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{90 - 20} = 26,66.$$

Втрати теплоти в довкілля конвекцією і випромінюванням при заданих температурах розраховуємо за формулою (2.23),  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$Q_{\text{к+в}}^{50} = 21,57 \cdot 53,1 \cdot (50 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 53,1 \cdot \left[ \left( \frac{323}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] = 47\,797,61;$$

$$Q_{\text{к+в}}^{70} = 24,51 \cdot 53,1 \cdot (70 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 53,1 \cdot \left[ \left( \frac{343}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] = 89\,814,88;$$

$$Q_{\kappa+B}^{90} = 26,66 \cdot 53,1 \cdot (90 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 53,1 \cdot \left[ \left( \frac{363}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] = 137\,300,53.$$

Визначаємо втрати тепла теплопровідністю за формулою (2.24), в якій  $k$  – коефіцієнт теплопередачі – дорівнює  $1,59 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}}$  (формула (2.25)),  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$Q_T^{50} = 1,59 \cdot 53,1 \cdot (1010 - 50) = 81\,051,84;$$

$$Q_T^{70} = 1,59 \cdot 53,1 \cdot (1010 - 70) = 79\,363,26;$$

$$Q_T^{90} = 1,59 \cdot 53,1 \cdot (1010 - 90) = 77\,674,68.$$

Будуємо графіки залежностей  $Q_{\kappa+B}^t = f(t)$  і  $Q_T^t = f(t)$  в координатах  $x$  ( $t$ , °C) та  $y$  ( $Q$ , кДж/год) та знаходимо їх точку перетину, її абсциса відповідає дійсній температурі зовнішньої поверхні печі (рис. 2.4).

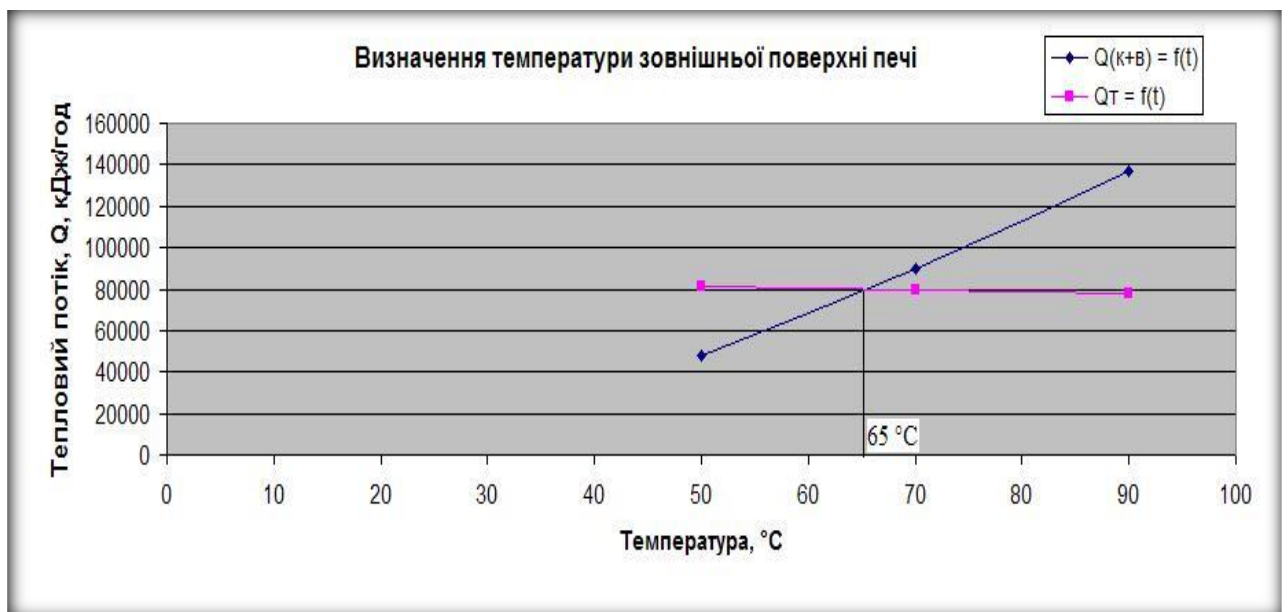


Рисунок 2.4 – Визначення температури зовнішньої поверхні печі

Температура зовнішньої стінки секції сепарації дорівнює  $t_{з.ст.} = 65$  °C. Для цієї температури обчислимо значення коефіцієнта конвективної

тепловіддачі (за формулою (2.22)),  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}}$ ; і коефіцієнта тепловипромінювання (формула (2.26)) через зовнішню поверхню печі:

$$\alpha_k^{65} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{65 - 20} = 23,87;$$

$$\alpha_B^{65} = \frac{9 \cdot \left[ \left( \frac{338}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right]}{338 - 293} = 11,36.$$

Загальний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією і випромінюванням складе (формула (2.27)),  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}}$ :

$$\alpha_{\Sigma}^{65} = 23,87 + 11,36 = 35,23.$$

Розраховуємо втрати теплоти через бічну поверхню секції сепарації за формулою (2.28),  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$\Delta Q_{\text{біч}} = \frac{1010 - 20}{\frac{0,12}{2,5 \cdot 35,02} + \frac{0,36}{0,62 \cdot 45,7} + \frac{0,02}{185,3 \cdot 53,1} + \frac{1}{35,23 \cdot 53,1}} = 67\,748,75.$$

2) втрати через під печі.

Початкові дані:

- товщина шару шамоту череня печі  $d_1 = 0,14$  м;
- товщина пінодіатомітового шару  $d_2 = 0,28$  м;
- товщина металевого кожуха  $d_3 = 0,02$  м;
- площа поверхні вогнетривкого шару поду печі:  $F_1 = 3,53$  м<sup>2</sup>, теплоізоляційного шару:  $F_2 = 5,39$  м<sup>2</sup>, металевого кожуха поду печі:  $F_3 = 7,16$

м<sup>2</sup> (див. результати при розрахунку втрат через під печі відновлення).

Для визначення температури поверхні нижньої частини печі довільно задаємося кількома значеннями температур:  $t = 60, 70, 80$  °С.

Коефіцієнт конвективної тепловіддачі для вибраних температур, обчислений за формулою (2.22),  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°С}}$ :

$$\alpha_k^{60} = 23,18 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°С}}; \alpha_k^{70} = 24,51 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°С}}; \alpha_k^{80} = 25,65,$$

має бути зменшений на 30 % для горизонтальних поверхонь:

$$\alpha_k'^{60} = 0,7 \cdot 23,18 = 16,23;$$

$$\alpha_k'^{70} = 0,7 \cdot 24,51 = 17,16;$$

$$\alpha_k'^{80} = 0,7 \cdot 25,65 = 17,96.$$

Втрати теплоти в довкілля конвекцією і випромінюванням при заданих температурах знаходимо за формулою (2.23),  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$Q_{\text{к+в}}^{60} = 16,23 \cdot 7,16 \cdot (60 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 7,16 \cdot \left[ \left( \frac{333}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] = 7\,187,89;$$

$$Q_{\text{к+в}}^{70} = 17,16 \cdot 7,16 \cdot (70 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 7,16 \cdot \left[ \left( \frac{343}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] = 9\,479,33;$$

$$Q_{\text{к+в}}^{80} = 17,96 \cdot 7,16 \cdot (80 - 20) + 0,8 \cdot 9 \cdot 7,16 \cdot \left[ \left( \frac{353}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] = 11\,920,89.$$



Втрати теплоти теплопровідністю обчислюємо за формулою (2.24), в якій коефіцієнт теплопередачі розраховується за формулою (2.25),  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$  і дорівнює  $1,97 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}}$ ,

$$Q_T^{60} = 1,97 \cdot 7,16 \cdot (1010 - 60) = 13\,399,94 ;$$

$$Q_T^{70} = 1,97 \cdot 7,16 \cdot (1010 - 70) = 13\,258,89 ;$$

$$Q_T^{80} = 1,97 \cdot 7,16 \cdot (1010 - 80) = 13\,117,84 .$$

Будуємо графіки залежностей  $Q_{к+в}^t = f(t)$  і  $Q_T^t = f(t)$  в координатах  $x$  ( $t$ , °C) та  $y$  ( $Q$ , кДж/год) та знаходимо їх точку перетину, її абсциса відповідає дійсній температурі поду печі (рис. 2.5).

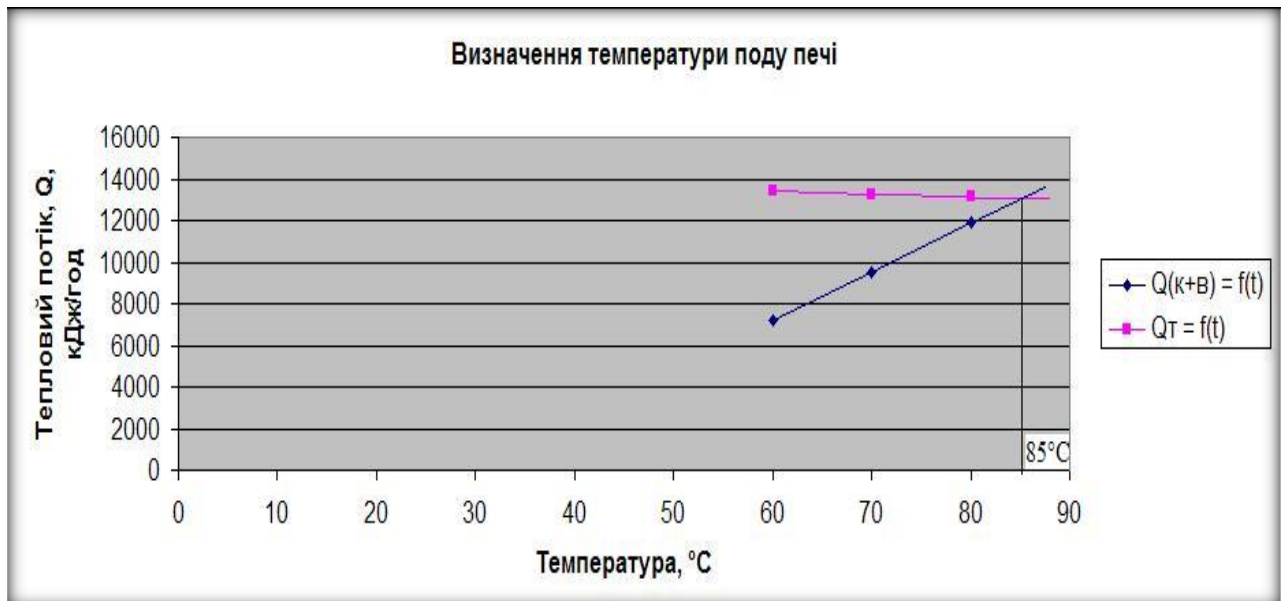


Рисунок 2.5 – Визначення дійсної температури поду печі

Вона дорівнює 85 °C.

За цієї температури визначаємо коефіцієнти тепловіддачі конвекцією,

$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}}$ ; і тепловипромінювання за формулою (2.22) та (2.26) відповідно:

$$\alpha_k^{85} = 9,216 \cdot \sqrt[4]{85 - 20} = 26,17 ;$$

$$\alpha_B^{85} = \frac{9 \cdot \left[ \left( \frac{358}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right]}{358 - 293} = 12,54.$$

Загальний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією і випромінюванням становить (формула (2.27)),  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}}$ :

$$\alpha_{\Sigma}^{85} = 26,17 + 12,54 = 38,71 .$$

Розраховуємо втрати теплоти через бічну поверхню секції сепарації за формулою (2.28),  $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$ :

$$\Delta Q_{\text{під}} = \frac{1010 - 20}{\frac{0,14}{2,5 \cdot 3,53} + \frac{0,28}{0,62 \cdot 5,39} + \frac{0,02}{185,3 \cdot 7,16} + \frac{1}{38,71 \cdot 7,16}} = 9586,13 .$$

Теплоту, необхідну для нагріву футерування секції сепарації печі опору, обчислюємо за формулою, : кДж.

$$W_{\text{футер}} = G_{\text{ш}} \cdot C_{\text{ш}} \cdot (t_{\text{пр}} - t_{\text{д}}) + G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} \cdot (t_{\text{пр}} - t_{\text{д}}), \quad (2.54)$$

де  $G_{\text{ш}}$ ,  $C_{\text{ш}}$  і  $G_{\text{п}}$ ,  $C_{\text{п}}$  – маса та теплоємність шамоту вогнетривкого шару і пінодіатоміту теплоізоляційного шару відповідно, що дорівнюють значенням цих же величин для секції відновлення.

$$W_{\text{футер}} = 2675 \cdot 1,093 \cdot (1010 - 20) + 6370 \cdot 0,98 \cdot (1010 - 20) = 9\,074\,711,25.$$

Для знаходження теплових потоків, відповідних кількостям теплоти, визначеним вище, які необхідні для здійснення процесу сепарації і використовуються на ті чи інші цілі, потрібно кількість теплоти розділити на час інтенсивної сублімації магнію та хлористого магнію, оскільки основна кількість енергії споживається саме в цей відрізок часу.

Тепловий баланс процесу вакуумної сепарації зображено на рисунку 2.5. Розраховані дані зводимо в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Тепловий баланс процесу вакуумної сепарації

Прихід		Витрата	
Стаття	$\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$	Стаття	$\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$
Теплота, отримана від нагрівачів	4 506 464,4	Теплота випаровування магнію	2 558 576,04
		Теплота випаровування хлориду магнію	158 356,41
		Теплота для нагріву: — титанової губки — реактора футерування	104 640,5 155 779,5 1 134 338,91
		Втрати в оборотну реторту	317 447,16
		Втрати теплоти бічною поверхнею і через під печі	77 334,88
		Разом:	4 506 464,4

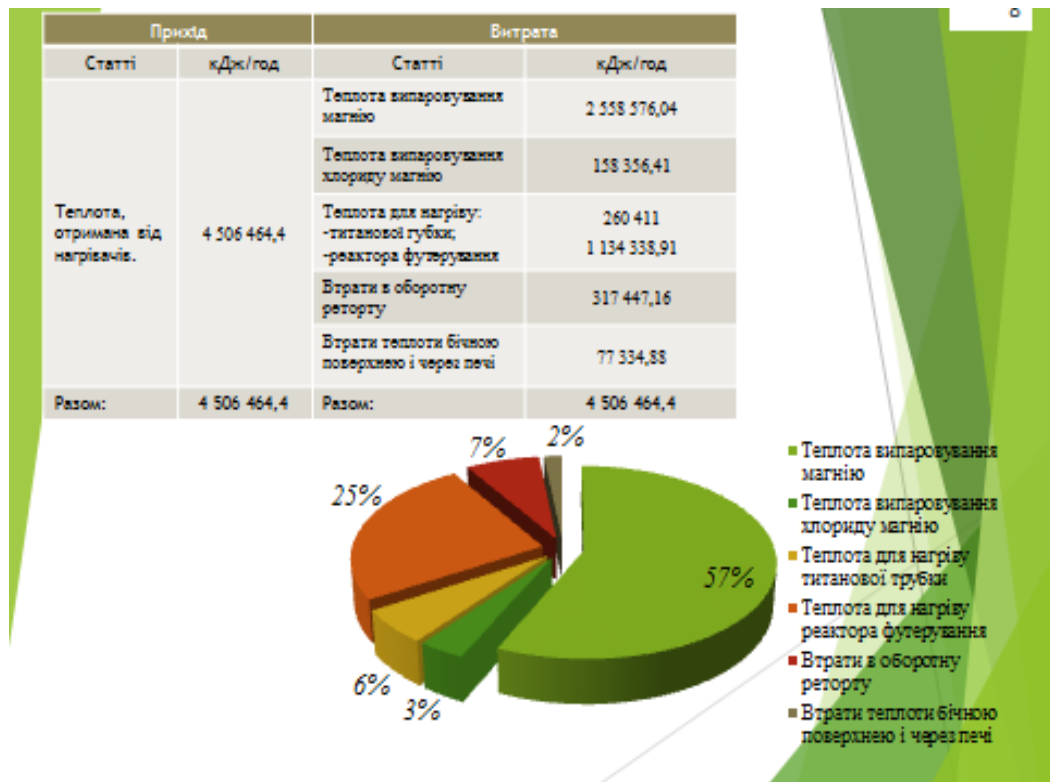


Рисунок 2.5 - Тепловий баланс процесу вакуумної сепарації

### 3 РОЗРАХУНОК ПИТОМИХ ОБСЯГІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ОСНОВНИМ ОБЛАДНАННЯМ ЦЕХУ ВІДНОВЛЕННЯ І СЕПАРАЦІЇ

3.1 Розрахунок питомих витрат електричної енергії на допоміжні операції процесів відновлення і вакуумної сепарації при різних варіантах виробництва

Витрата електроенергії технологічним устаткуванням ділянок цеху відновлення і вакуумної сепарації (витрата на допоміжні операції) визначатиметься за формулою, кВт · год:

$$W_i = n \cdot K_{\text{вп}} \cdot K_{\text{вч}} \cdot W_{\text{уст } i}, \quad (3.1)$$

де  $n$  – кількість однотипних приймачів;

$K_{\text{зп}}$  – коефіцієнт використання потужності;

$K_{\text{вч}}$  – коефіцієнт використання часу;

$W_{\text{уст } i}$  – споживання енергії одиночним приймачем, знайдене на базі його установленної потужності.

Виходячи з таких даних (у розрахунку одразу вказані значення для базового варіанту, в дужках наведені значення величин для випадку модернізованого виробництва у такому порядку: значення величини після реалізації першого заходу, після реалізації другого заходу; якщо значення величин однакове, воно записується тільки один раз).

1) Ділянка підготовки апаратів і їх деталей до процесів:

піч для сушки деталей,  $W_{\text{уст}} = 120$  кВт · год;

- коефіцієнт використання потужності печі – 0,45 (0,585);
- коефіцієнт використання печі в часі – 0,95;

— піч для очищення зливних пристроїв від хлористого магнію,

$$W_{уст} = 150 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

○ коефіцієнт використання потужності печі – 0,4 (0,52);

○ коефіцієнт використання печі в часі – 0,9;

загальне споживання електроенергії встановленими двигунами

$$W_{уст} = 90 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

○ сумарний коефіцієнт використання потужності – 0,8 (1);

○ сумарний коефіцієнт використання двигунів в часі – 0,4.

Загальна витрата електроенергії ділянкою ( $W_{п.а.}$ ) складе, кВт · год:

$$W_{п.а.} = 120 \cdot 0,45 \cdot 0,95 + 150 \cdot 0,4 \cdot 0,9 + 90 \cdot 0,8 \cdot 0,4 = 134,1 (172,89).$$

2) Ділянка монтажу-демонтажу апаратів:

— сумарне споживання енергії встановленими електродвигунами  $W_{уст} = 116 \text{ кВт} \cdot \text{год};$

○ сумарний коефіцієнт використання потужності електродвигунів – 0,75 (0,975);

○ сумарний коефіцієнт використання двигунів в часі – 0,45.

Загальна витрата електроенергії ділянкою ( $W_{м.д.}$ ) складе, кВт · год:

$$W_{м.д.} = 116 \cdot 0,75 \cdot 0,45 = 39,15 (50,9; 25,45).$$

3) Ділянки вакуумних насосів (для печей відновлення і сепарації) :

— сумарна потужність двигунів і нагрівачів встановлених вакуумних насосів - 800 кВт · год;

○ сумарний коефіцієнт використання потужності – 0,72 (0,936);

○ сумарний коефіцієнт використання насосів в часі – 0,4.

Загальна витрата електроенергії ділянкою ( $W_{в.н.}$ ) склад, кВт · год :

$$W_{в.н.} = 800 \cdot 0,72 \cdot 0,4 = 230,4 (299,52).$$

4) Ділянки титанування реторт і очищення аргону:

на ділянці встановлено 2 печі зі споживанням енергії по 120 кВт · год кожна;

- коефіцієнт використання потужності печей – 0,45 (0,585);
- коефіцієнт використання печей в часі складає 0,92;

— в установку печей входять 3 механічних вакуумних насоса енергоспоживанням 20 кВт · год ( $K_{вп} = 0,82$  (1) і  $K_{вч} = 0,8$ ) і два бустерні насоси зі споживанням електричної енергії по 7 кВт · год: ( $K_{вп} = 0,9$  (1) і  $K_{вч} = 0,8$ ).

Загальна витрата електроенергії ділянкою ( $W_{m.o.}$ ) складе, кВт · год:

$$W_{m.o.} = 2 \cdot 120 \cdot 0,45 \cdot 0,92 + 3 \cdot 20 \cdot 0,82 \cdot 0,8 + 2 \cdot 7 \cdot 0,9 \cdot 0,8 = 148,8$$

(188,37).

5) Ділянки обробки губчастого титану:

— на ділянці встановлено устаткування для обробки, дроблення, розсівання і затарювання губчастого титану, сумарне споживання електроенергії електродвигунами якого складає 1055 кВт · год;

- сумарний коефіцієнт використання встановленої потужності електродвигунів – 0,6 (0,78);
- сумарний коефіцієнт використання двигунів установок у часі – 0,35.

Загальна витрата електроенергії ділянкою ( $W_{o.z.m.}$ ) становить кВт · год,:

$$W_{o.z.m.} = 1055 \cdot 0,6 \cdot 0,35 = 221,55 \text{ (288,02)}.$$

Питому сумарну витрату електроенергії допоміжним технологічним устаткуванням цеху визначаємо за формулою,  $\frac{\text{(кВт}\cdot\text{год)}}{\text{тонну}}$ :

$$w_{\text{д.о.}} = \frac{\sum W_i}{\Pi}, \quad (3.2)$$

де  $\Pi$  – циклова продуктивність обладнання цеху в перерахунку на титанову губку, тонн,

$$w_{\text{д.о.}} = \frac{134,1 + 39,15 + 230,4 + 148,8 + 221,55}{3} = 258 (199,94; 194,85).$$

3.2 Визначення електричної потужності печі відновлення і сепарації та питомих витрат електричної енергії на випуск продукції за різних варіантів виробництва

Розрахуємо електричну потужність окремих секцій двохсекційної печі відновлення і вакуумної сепарації (за умови здійснення другого заходу із підвищення енергоефективності виробництва) за формулою, кВт:

$$P = \frac{Q \cdot k}{3600}, \quad (3.3)$$

де  $Q$  – загальний тепловий потік (теплова потужність) процесу відновлення або вакуумної сепарації, взятий із теплового балансу цих процесів з попередніх розділів дипломного проекту, кДж/год;

$k$  – коефіцієнт перетворення, що враховує різноманітні втрати при переході електричної енергії у теплову, для печей опору за даних умов дорівнює 1,3.

Потужність секції відновлення, кВт:

$$P = \frac{2\,058\,733,48 \cdot 1,3}{3600} \cong 744.$$



Потужність секції сепарації, кВт:

$$P = \frac{4\,506\,464,4}{3600} \cong 1\,257,323.$$

Обчислюємо споживання електричної енергії піччю відновлення і вакуумної сепарації за умови переходу на поєднану схему виробництва з п'ятитонним апаратом відновлення і сепарації за формулою:

$$W = \frac{k}{3600} \cdot \sum Q_i \cdot T_i, \quad (3.4)$$

де  $k$  – коефіцієнт перетворення: 1,3;

$Q_i$  – тепловий потік і-статті витрат процесу відновлення чи вакуумної сепарації, кДж/год;

$T_i$  – тривалість і-витрати, год.;

Споживання електроенергії секцією відновлення печі:

$$\begin{aligned} W_{\text{п.в.}} &= \frac{1,3}{3600} \cdot ((562\,287,52 + 83\,732,91 + 296\,361 + 265\,068,06 + \\ &608\,653,5 + 156\,788,32) \cdot 8 + (57\,329,62 + 8512,55) \cdot 62) = \\ &7\,231,4 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{цикл}} \text{ або } 1446,28 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{тонну}}. \end{aligned}$$

Споживання електроенергії секцією сепарації:

$$\begin{aligned} W_{\text{п.с.}} &= \frac{1,3}{3600} \cdot ((2\,558\,567,04 + 158\,356,41 + 104640,5 + 155\,779,5 + \\ &1\,134\,388,91) \cdot 8 + (317\,447,16 + 77\,334,88) \cdot 40) = \\ &17\,580,6 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{цикл}} \text{ або } 3\,516,12 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{тонну}}. \end{aligned}$$

Питома витрата електричної енергії на виробництво титанової губки при різних варіантах виробництва знаходиться за формулою, ((кВт·год))/тонну :

$$w = w_{п.в.} + w_{п.с.} + w_{д.о.}, \quad (3.5)$$

де дані для обчислення беруться з практики виробництва на підприємстві або з результатів попередніх розрахунків, проведених в кваліфікаційній роботі.

До модернізації виробництва,  $\frac{(\text{кВт}\cdot\text{год})}{\text{тонну}}$ :

$$w = 2\,090 + 3\,270 + 258 = 5\,618 .$$

Після реалізації заходу 1,  $\frac{(\text{кВт}\cdot\text{год})}{\text{тонну}}$ ::

$$w = 2\,050 + 2\,960 + 199,94 = 5\,209,94.$$

Після реалізації заходу 2,  $\frac{(\text{кВт}\cdot\text{год})}{\text{тонну}}$ ::

$$w = 1\,446,28 + 3\,516,12 + 194,85 = 5\,157,25.$$

Одержані результати використовуються далі у роботі при розрахунку нагрівачів печі відновлення і сепарації та в економічному розділі при підрахунку собівартості продукції та економічного ефекту від здійснення запропонованих заходів із підвищення енергоефективності виробництва.

## 4 ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПЕЧІ ВІДНОВЛЕННЯ І СЕПАРАЦІЇ

Ковпакова піч опору, яка використовується для ведення процесів відновлення і сепарації титанової губки, є електричною піччю. Її робота заснована на законі Джоуля-Ленца: теплота в печі виділяється при проходженні електричного струму всередині металевих нагрівачів – провідників струму. Як матеріал для нагрівачів застосовується стрічковий ніхром марки Х20Н80-Н ГОСТ 12766.2-90, який в умовах неперервного виробництва забезпечує необхідну надійність в роботі. Визначальним параметром при розрахунку нагрівачів є їх робоча температура, яка визначає терміни служби матеріалу, із якого вони виготовлені. Нагрівачі живляться від цехової силової мережі змінного струму через пічний трансформатор. Напруга, на якій працює піч, – 380 В.

Нагрівачі розташовуються всередині печі зонами. Враховуючи досвід експлуатації двосекційних печей підвищеної циклової продуктивності на титано - магнієвих підприємствах різних країн, приймаємо наступний розподіл потужностей нагрівачів по зонах секцій печі:

- секція відновлення: 1, 2 зони – по 156 кВт; 3, 4 зони – по 216кВт;
- секція сепарації: 1, 2 зони – по 342 кВт; 3, 4 зони – по 472 кВт.

Проведемо розрахунок нагрівачів секцій відновлення і сепарації двосекційної печі опору [11]. Нагрівачі з'єднуються за схемою «трикутник» та розміщуються в ковпаку і на поверхні поду печі.

### 1) Секція відновлення.

Робоча температура нагрівачів обчислюється за формулою, °С :

$$t_n = t_{кін} + 100, \quad (4.1)$$

де  $t_{\text{кін}}$  – кінцева температура нагріву виробу в печі, дорівнює температурі процесу: 900 °С,

$$t_{\text{н}} = 900 + 100 = 1000.$$

Величина дійсного питомого електроопору ніхрому знаходиться із залежності, Ом · м:

$$\rho_{\text{д}} = 1,1 \cdot 10^{-6} + 8,5 \cdot 10^{-11} \cdot t, \quad (4.2)$$

$$\rho_{\text{д}} = 1,1 \cdot 10^{-6} + 8,5 \cdot 10^{-11} \cdot 1000 = 1,185 \cdot 10^{-6}.$$

Розглядаємо 1, 2 зони.

Сила струму через нагрівач, А:

$$I = \frac{P \cdot 10^3}{U}, \quad (4.3)$$

де  $P$  – потужність нагрівачів зони, кВт;

$U$  – напруга на нагрівачах, В,

$$I = \frac{156\,000}{380} = 411.$$

Потрібний опір нагрівача, Ом:

$$R = \frac{U^2}{P \cdot 10^3} \quad (4.4)$$

$$R = \frac{380^2}{156\,000} = 0,93.$$

Питома поверхнева потужність реального нагрівача розраховується за формулою,  $\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ :

$$w_d = \alpha \cdot w_{id}, \quad (4.5)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поправки, для стрічкового зигзагоподібного нагрівача його значення складає 0,51;

$w_{id}$  – питома поверхнева потужність ідеального нагрівача, знаходиться за довідковим графіком і дорівнює  $20 \text{ кВт/м}^2$ ;

$$w_d = 0,51 \cdot 20 = 10,2 .$$

Фазна потужність, кВт:

$$N_\phi = 156/3 = 52 .$$

Умовна напруга визначається за формулою, В:

$$U_{ум} = U_d \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ум}}{\rho_d}}, \quad (4.6)$$

де  $U_d$  – дійсна напруга на нагрівачі, В;

$\rho_{ум}$  – умовний питомий електроопір, становить  $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;

$$U_{ум} = 380 \cdot \sqrt{\frac{1,0 \cdot 10^{-6}}{1,185 \cdot 10^{-6}}} = 349,1 .$$

Умовна питома поверхнева потужність обчислюється за формулою,  $\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$

:

$$w_{\text{ум}} = 1,97 \cdot w_{\text{д}} \quad (4.7)$$

$$w_{\text{ум}} = 1,97 \cdot 10,2 = 20,09 .$$

На підставі розрахованих значень величин за номограмою із довідкових даних знаходимо, що площа перерізу стрічки дорівнює  $44 \text{ мм}^2$ , її товщина –  $2,2 \text{ мм}$ , ширина –  $20 \text{ мм}$ , довжина –  $102 \text{ м}$ .

Для 3, 4 зони:

Струм через нагрівач (формула (4.3)), А:

$$I = \frac{216\,000}{380} = 568 .$$

Потрібний опір нагрівача (формула (4.4)), Ом:

$$R = \frac{380^2}{216\,000} = 0,67 .$$

Фазна потужність, кВт:

$$N_{\phi} = 216/3 = 72 .$$

За номограмою визначаємо, що площа перерізу стрічки ніхрому складає  $66 \text{ мм}^2$ , товщина стрічки –  $2,2 \text{ мм}$ , ширина –  $30 \text{ мм}$ , довжина –  $115 \text{ м}$ .

2) Секція сепарації.

Робоча температура нагрівачів розраховується за формулою (4.1), °С:

$$t_{\text{н}} = 1010 + 100 = 1110 .$$

Величина дійсного питомого електроопору ніхрому знаходиться за формулою (4.2), Ом · м:

$$\rho_d = 1,1 \cdot 10^{-6} + 8,5 \cdot 10^{-11} \cdot 1110 = 1,194 .$$

Розглядаємо 1, 2 зони.

Сила струму через нагрівач (формула (4.3)), А:

$$I = \frac{342\,000}{380} = 900 .$$

Потрібний опір нагрівача (формула (4.4)), Ом:

$$R = \frac{380^2}{342\,000} = 0,42 .$$

Питома поверхнева потужність реального нагрівача обчислюється за формулою (4.5),  $\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ , в якій коефіцієнт поправки для плоского стрічкового зигзагоподібного нагрівача дорівнює 0,79;  $w_{\text{ід}} = 20 \text{ кВт/м}^2$ :

$$w_d = 0,79 \cdot 20 = 15,8 .$$

Фазна потужність, кВт:

$$N_\phi = 342/3 = 114 .$$

Умовна напруга визначається за формулою (4.6), В:

$$U_{\text{ум}} = 380 \cdot \sqrt{\frac{1,0 \cdot 10^{-6}}{1,194 \cdot 10^{-6}}} = 347,8 .$$

Умовна питома поверхнева потужність розраховується за формулою

$$(4.7), \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}:$$

$$w_{\text{ум}} = 1,97 \cdot 15,8 = 31,13 .$$

За номограмою знаходимо, що площа перерізу стрічки  $95 \text{ мм}^2$ , її товщина  $2,5 \text{ мм}$ , ширина  $40 \text{ мм}$ , довжина  $103 \text{ м}$ .

Розглядаємо 3, 4 зони.

Струм через нагрівач (формула (4.3)), А:

$$I = \frac{472\,000}{380} = 1242 .$$

Потрібний опір нагрівача (формула (4.4)), Ом:

$$R = \frac{380^2}{472\,000} = 0,31 .$$

Фазна потужність, кВт:

$$N_{\phi} = 472/3 = 157 .$$

За номограмою: площа перерізу стрічки ніхрому становить  $150 \text{ мм}^2$ , товщина стрічки –  $2,5 \text{ мм}$ , ширина –  $60 \text{ мм}$ , довжина –  $110 \text{ м}$ .

Як показує проведена для обох секцій перевірка, при оптимальному розташуванні нагрівачів робочого простору печі достатньо, щоб розмістити стрічку ніхрому розрахованої довжини і перерізу.



## 5. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТИТАНО-МАГНІЄВОГО ВИРОБНИЦТВА

У кваліфікаційній роботі як заходи з підвищення енергоефективності пропонуються наступні рішення:

- підвищення циклового знімання печей відновлення і сепарації;
- перехід на поєднану схему виробництва губчастого титану.

Як відомо, зі збільшенням продуктивності будь-якого агрегату витрати на допоміжні операції технологічного процесу суттєво не змінюються, а випуск продукції в результаті виконання технологічного процесу зростає пропорційно збільшенню продуктивності, завдяки чому з'являється можливість зменшити питомі витрати енергії. Крім того, апарат відновлення із підвищеним цикловим зніманням має менші габаритні розміри по висоті, що дає змогу повніше використовувати теплоту реакції відновлення для підтримання необхідної температури процесу і зекономити потрібну для зовнішнього нагріву електроенергію. Таким чином, буде збільшений дохід від виробництва продукції, а її собівартість при цьому зменшиться, внаслідок чого прибуток підприємства зросте. Капітальні витрати на заміну печей відновлення і сепарації окупаються в середньому за (5...6) років у випадку, якщо віддача коштів, вкладених у проєкт, здійснюється виключно за рахунок прибутку від його реалізації, тому проєкт відноситься до довгострокових.

Перехід на поєднану схему виробництва губчастого титану дозволить уникнути непродуктивних втрат тепла при охолодженні печей відновлення і скоротити витрати тепла та, відповідно, електроенергії на нагрів печей сепарації. Внаслідок реалізації даного заходу очікується суттєве зниження споживання енергоносіїв, завдяки чому знизиться собівартість продукції і підвищиться прибуток підприємства. Капітальні витрати при переході на поєднану схему виробництва мінімальні, крім того, даний захід дозволить прибрати з технологічного процесу ряд додаткових операцій, пов'язаних з

охолодженням і демонтажем реактора відновлення і перетворенням його на реактор сепарації, що зменшить експлуатаційні витрати і відповідно – собівартість продукції. Захід належить до короткострокових і високоприбуткових проектів.

Фінансування розроблених проектів із підвищення енергоефективності може здійснюватись як за рахунок оборотного капіталу підприємства, так і з державних фондів у формі субсидіювання, лізингу (оскільки підприємство державної форми власності), а також із залученням зовнішніх інвестицій. Зовнішні інвестиції можуть мати вигляд позики або ж бути у вигляді фінансової участі інвестора в управлінні підприємством. Якщо використовуються займані кошти, то можливе застосування венчурної форми фінансування запропонованих проектів або ж проектної форми фінансування із обмеженим регресом..

При реалізації запланованих заходів присутні політичні ризики (зміна влади, приватизація або націоналізація тощо) та економічні ризики, останні пов'язані з коливанням ринкових цін як на основні засоби, які будуть придбані в процесі модернізації виробництва, так і на готову продукцію, а також із коливанням валютних курсів, внаслідок чого може змінюватись відсоток за кредитами, залученим для переоснащення виробництва, із введенням квот або ембарго іноземними державами на ввезення продукції, яка випускається підприємством, що може призвести до втрати зовнішніх ринків і скорочення обсягів реалізації продукції, а це негативно вплине на платоспроможність підприємства.

З точки зору екологічного аналізу запропоновані заходи дозволяють зменшити споживання енергоносіїв, що відповідає вимогам сучасних екологічних програм, а також непродуктивні втрати тепла і відповідно теплове забруднення повітря і стічних вод, тобто проект має позитивний екологічний ефект. З погляду організаційного аналізу [23] матеріально-технічна база підприємства давно застаріла і потребує реконструкції, тому заплановані заходи дуже своєчасні. Водночас власних коштів підприємства

для реалізації даних заходів недостатньо, що зумовлює необхідність пошуку інвесторів.

### 5.1 Розрахунок основних техніко-економічних показників проектів з підвищення енергоефективності титано-магнієвого виробництва

У даному підрозділі й надалі проектами називатимуться лише ті із запропонованих енергозберігаючих заходів, від впровадження яких очікується зменшення обсягу споживання електроенергії в процесі виробництва, величина якого розрахована в попередніх розділах дипломної роботи. Ними стали: підвищення продуктивності апарату відновлення з 3 до 5 тонн – проект А; перехід на поєднану схему виробництва з апаратами підвищеної продуктивності (5 тонн) – проект Б.

До основних показників, які обґрунтовують економічну доцільність проектів з підвищення енергоефективності титано-магнієвого виробництва (надалі – проекти), належать річна економія витрат від реалізації запропонованих заходів, капіталовкладення у їх впровадження, термін окупності проекту, чиста теперішня вартість проектів, їх дисконтований термін окупності і внутрішня норма рентабельності. Розрахуємо ці показники.

Річна економія витрат внаслідок реалізації проекту включає в себе економію електричної енергії в грошовому вимірі та ефект від збільшення продуктивності виробництва в результаті впровадження запропонованих заходів. Вона обчислюється за формулою:

$$E = (\text{Собівартість продукції1} - \text{Собівартість продукції2}) \times \\ \times \text{Річний обсяг виробництва,} \quad (5.1)$$

де  $E$  – річна економія витрат, грн./рік;

Собівартість продукції 1 – собівартість титанової губки до модернізації виробництва (собівартість продукції в базовому варіанті), грн./тонну;

Собівартість продукції 2 – собівартість титанової губки після впровадження заходів із підвищення енергоефективності виробництва, грн./тонну;

Річний обсяг виробництва – кількість титанової губки, яка випускається підприємством протягом календарного року, тонн/рік.

Знаходимо собівартість продукції до модернізації виробництва та після модернізації окремо для випадку реалізації кожного із двох заходів по підвищенню енергоефективності. При підрахунку собівартості продукції витрати на електроенергію беруться із таблиці 5.1 «Розрахунок вартості спожитої електроенергії», наведеної нижче, для обох проєктів і базового варіанту.

Таблиця 5.1 – Розрахунок вартості спожитої електроенергії

Споживач	Стан	Потреба в активній електричній енергії, кВт·год		
		На 1 тонну	Обсяг виробництва, тонн*	На весь об'єм продукції
1	2	3	4	5
Основне обладнання цеху відновлення і вакуумної сепарації	До модернізації	5618	10000	56180000
	Впровадження проєкту А	5209,94	16667	86834070
	Впровадження проєкту Б	5157,25	16667	85955886

\* Обсяг модернізованого виробництва визначається з урахуванням збільшення продуктивності апаратів відновлення і сепарації до 5 тонн. Потім:

кількість виробничих циклів за рік:  $\frac{\text{Річний обсяг виробництва}}{\text{Продуктивність 1 циклу}} = \frac{10000}{3} \cong 3333$  цикли. Новий річний обсяг виробництва: продуктивність 1 циклу модернізованого виробництва  $\cdot$  кількість циклів  $= 5 \cdot 3333 \approx 16667$  тонн/рік.

Цехова собівартість 1 тони титанової губки до модернізації виробництва (виробнича програма – 10000 тонн/рік) орієнтовно складає 50,410 тис.грн. Цехова собівартості 1 тонни титанової губки після реалізації проекту А (виробнича програма – 16667 тонн/рік) орієнтовно складає 49,884 тис.грн. Калькуляція собівартості 1 тони титанової губки після реалізації проекту Б (виробнича програма – 16667 тонн/рік) орієнтовно складає 49,816 тис. грн.

Визначаємо річну економію витрат для обох проектів за формулою (5.1):

— для проекту А:

$$E = (50410 - 49884) \cdot 16667 = 8766842 \text{ грн.};$$

— для проекту Б:

$$E = (50410 - 49816) \cdot 16667 = 9900198 \text{ грн.}$$

Капіталовкладення у проект А розраховуються за формулою, грн:

$$K = O + VM + VD + VПНР + ТВ + ПВ, \quad (1.2)$$

де  $O$  – витрати на нове обладнання, складаються із витрат на печі відновлення і сепарації підвищеної продуктивності 5 тонн;

$VM$  – витрати на монтаж нового обладнання;

$VD$  – витрати на демонтаж старого обладнання;

$VПНР$  – витрати на пусконаладжувальні роботи;

$ТВ$  – транспортні витрати;

ПВ – проектні витрати.

$$K = 8\,000\,000 + 800\,000 + 240\,000 + 400\,000 + 160\,000 + 960\,000 = 10\,560\,000.$$

Проект Б може здійснюватись зі встановленням нової двохсекційної ковпакової печі опору підвищеної продуктивності для одночасного ведення в ній процесів відновлення і сепарації або бути пов'язаним із реконструкцією діючої печі з перетворенням її на двохсекційну. Від того, яка піч буде функціонувати після реалізації проекту – нова чи стара реконструйована – залежать капіталовкладення в проєкт. Розглянемо обидва ці варіанти під назвами проєкт Б1 і Б2 відповідно. Економія внаслідок їх впровадження однакова.

Капіталовкладення в проєкт Б1 обчислюються за формулою (5.2), грн.:

$$K = 5\,000\,000 + 500\,000 + 150\,000 + 250\,000 + 100\,000 + 600\,000 = 6\,600\,000.$$

Капіталовкладення в проєкт Б2 знаходяться за формулою, грн:

$$K = VP + DV, \quad (5.3)$$

де VP – вартість реконструкції печі: VP = Вартість футерування + Вартість нагрівачів; Вартість футерування = Вартість вогнетривкого шару + Вартість теплоізоляційного шару; Вартість вогнетривкого шару = Кількість секцій печі · Ціна за 1 тону шамоту · Маса шамоту вогнетривкого шару секції в тонах; Вартість теплоізоляційного шару = Кількість секцій печі · Ціна 1 м<sup>3</sup> пінодіатоміту · Маса пінодіатоміту теплоізоляційного шару в тоннах / Густина пінодіатоміту; Вартість нагрівачів; DV – додаткові витрати.

$$K = 1\,991\,067 + 796\,427 = 2\,787\,494.$$

Решта економічних показників визначаються за наступними формулами:

— простий термін окупності проекту:

$$T = \frac{K}{E}; \quad (5.4)$$

— чиста теперішня вартість (NPV) – характеризує прибуток від реалізації проекту з урахуванням зміни вартості грошей в часі:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{ГП}{(1+i)^t}, \quad (5.5)$$

де ГП – грошовий потік, знаходиться як різниця між доходами та витратами на проєкт, грн.;

$i$  – ставка дисконту, дорівнює 10 %;

$t$  – кількість років від початку реалізації проєкту;

$T$  – життєвий цикл проєкту, приймається рівним 5 рокам.

— внутрішня норма рентабельності (IRR) – ставка дисконту, при якій проєкт знаходиться на межі самоокупності, визначається з рівняння:

$$\sum_{t=0}^T \frac{ГП}{(1+\frac{IRR}{100})^t} = 0 \quad (5.6)$$

— дисконтований термін окупності – період, за який до інвестора повертаються кошти, вкладені в проєкт, що вираховується з урахуванням зміни вартості грошей у часі; знаходиться з рівняння, де невідомим є параметр  $T$  [1]:

$$\sum_{t=0}^T \frac{\Gamma\Pi}{(1+i)^t} = 0 \quad (5.7)$$

Найпоширеніший метод відносно точного розрахунку внутрішньої норми рентабельності та дисконтованого терміну окупності – графо-аналітичний. Він і використовується в цій кваліфікаційній роботі.

Результати розрахунку вищенаведених економічних показників, які характеризують ефективність запропонованих енергозберігаючих заходів, для кожного із розглядуваних проектів наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Порівняльна таблиця техніко-економічних характеристик проектів

Показ-к Проект	Річна економія витрат, Е, грн.	Капітало-вкладення, К, грн.	Термін окупності Т, років	Чиста теперішня вартість, NPV, грн.	Внутрішня норма рентабельності, IRR, %	Дисконтований термін окупності, Т <sub>диск</sub> , років
А	8 766 842	10560000	1,2	22 696 721	79	1,3
Б1	9 900 198	6 600 000	0,67	30 956 069	149	0,7
Б2	9 900 198	2 787 494	0,28	34 768 575	370	0,33

## 5.2 Визначення точки беззбитковості різних варіантів виробництва

Точка беззбитковості або критичний обсяг реалізації (КОР) – найменший обсяг виробництва (реалізації) продукції, при якому підприємство залишається на рівні самоокупності, не отримуючи при цьому прибутку. Точка беззбитковості є одним із критеріїв оцінки ефективності діяльності підприємства. Якщо воно не може досягнути цієї точки, то це дає



підставу говорити про неефективність виробництва за поточного стану справ на ринку даної продукції і в середині компанії і про необхідність вжити заходів зі скорочення витрат на випуск даного товару чи збільшення виробничої програми, або ж діяльність підприємства припиниться.

Точку беззбитковості можна знаходити графічно і аналітично. Розрахуємо її аналітично.

1) Для базового варіанту.

Точка беззбитковості визначається за формулою, тонн:

$$Q_0 = \frac{C}{P-v}, \quad (5.8)$$

де  $C$  – постійні витрати на виробництво, грн.;

$P$  – ціна одиниці продукції (1 тони титанової губки), грн./тонну;

$v$  – питомі змінні витрати на виробництво, грн./тонну титанової губки.

Тоді

$$Q_0 = \frac{16150000}{80000 - 48795} = 518 .$$

2) Для випадку виробництва після реалізації проєкту А, тонн:

$$Q_0 = \frac{26917205}{80000 - 48269} = 848 .$$

3) Для випадку виробництва після реалізації проєкту Б, тонн:

$$Q_0 = \frac{26917205}{80000 - 48201} = 847.$$

У результаті реалізації запланованих заходів з підвищення енергоефективності титано-магнієвого виробництва вдалося досягнути суттєвої економії електроенергії та коштів. Найбільш прибутковим виявився проєкт Б2: перехід на поєднану схему виробництва з апаратами підвищеної продуктивності (5 тонн), сконструйованими шляхом реконструкції старих. Цей проєкт має велику економію витрат на виробництво, чисту теперішню вартість, внутрішню норму рентабельності та малі терміни окупності (близько 4 місяців). Завдяки впровадженню запропонованих проєктів підвищується фінансова стійкість підприємства; точка беззбитковості несуттєво зміщується вправо по графіку, що майже не впливає на економічну ефективність діяльності підприємства. Таким чином, впровадження проєктів з підвищення енергоефективності дозволить збільшити прибутковість підприємства, підвищити його конкурентоздатність і зміцнити позиції підприємства на ринку титанової губки.

## ВИСНОВКИ

1. У процесі виконання кваліфікаційної роботи було запропоновано два заходи з підвищення енергоефективності титано-магнієвого виробництва: підвищення продуктивності апаратів відновлення і вакуумної сепарації з 3 до 5 тон, перехід на поєднану схему виробництва з апаратами підвищеної продуктивності (5 тон).

2. Питомі витрати електричної енергії на виробництво титанової губки в результаті здійснення вищенаведених заходів зменшилися, а обсяг виробництва зріс, внаслідок чого вдалося скоротити енерговитрати в калькуляції собівартості продукції і досягти річної економії витрат 8 766 842 і 9 900 198 гривень відповідно. Термін окупності капіталовкладень у заплановані проєкти з реалізації заходів не перевищує 1,5 роки.

3. Запропоновані заходи підвищують фінансово-економічну стійкість, дозволяють розширити масштаби виробництва і збільшити частку підприємства на ринку титанової губки внаслідок зростання його конкурентоспроможності.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» [Електронний ресурс] / Районна Адміністрація по Заводському району (м. Запоріжжя). – Режим доступу : \WWW/ URL: <http://www.zavodska-ra.zp.ua/prommaydanchik/post01337> – Загол. з екрану.
2. Запорізький титано-магнієвий комбінат [Електронний ресурс] / Вікіпедія. – Режим доступу : \WWW/ URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Запорізький\\_титано-магнієвий\\_комбінат](https://uk.wikipedia.org/wiki/Запорізький_титано-магнієвий_комбінат) – Загол. з екрану.
3. Енергогосподарство підприємства та напрями енергозбереження [Електронний ресурс] / Lectures 7mile.net. – Режим доступу : \WWW/ URL: <https://lectures.7mile.net/enerhozberezhennia/energogospodarstvo-pidpriemstva-ta-napryami-energozberezhennya.html> – Загол. з екрану.
4. Електроліз іонних розплавів [Електронний ресурс]: навч. посібник для студентів спеціальності 161 “Хімічні технології та інженерія” спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів»/ С.В. Фроленкова, О.В.Лінючева, Т.І.Мотронюк. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 130 с.
5. Робоча інструкція отримання магнію-сирцю електролітичним засобом для електролізників розплавлених солей дільниці виробництва магнію цеху № 7. РИ 07.013-2008. [Текст] – Запоріжжя: ТОВ «ЗТМК», 2015.– 63с.
6. Бачурский, Д. В. К выбору температурного режима поточной линии электролитического производства магния [Текст] // Д. В. Бачурский. Технологический аудит и резервы производства – № 6/5(14), 2013. С.17-19.
7. Робоча інструкція електролізнику розплавлених солей дільниці виробництва магнію цеху № 7. РИ 07.41.03-2015. [Текст] – Запоріжжя: ТОВ «ЗТМК», 2015. – 53с.

8. Робоча інструкція плавильнику (плавка руд кольорових металів) ділянки електролізу магнію цеху №7. РИ 07.41.02-2015. [Текст] – Запоріжжя: ТОВ «ЗТМК», 2015. – 55с.

9. Робоча інструкція отримання магнію-відновлювача плавильником відділення рафінування ділянки електролізу магнію цеху №7. РИ 07.016-2011. [Текст] – Запоріжжя: ТОВ «ЗТМК», 2015. – 54с.

10. Metallurgiya magniya [Текст]: учебное пособие /В.А.Лебедев, В.И.Седых.Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. 174 с.

11. Щеголев В.И. Электролитическое получение магния [Текст]/ В.И. Щеголев,О.А.Лебедев. - М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2002. - 368с.

12. Москвитин, В.И. Metallurgiya legkikh metalliv [Текст]: учеб. для вузов / В.И. Москвитин, И. В. Николаев, Б. А. Фомин. – М.: Интермет Инжиниринг,2005. – 413 с.

13. Гусовский, В.Л. Методики расчета нагревательных и термических печей [Текст]: справочник / В.Л. Гусовский, А.Е. Лифшиц. – Москва : Теплотехник, 2004. – 420 с.

14. Соболев, Б. М. Расчёты плавильных и нагревательных печей : учеб. пособие [Текст] / Б. М. Соболев, Ю. Н. Мансуров, Хейн Вин Зо, С. Б. Марьин ; под общ. ред. Б. М. Соболева. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. – 131 с.

15. Логачев, М.В. Расчеты нагревательных устройств: учебно-методическое пособие для студентов в 3 ч. [Текст] / М.В. Логачев, Н И. Иваницкий, Л.М. Давидович. – Минск: БНТУ, 2010. – Ч.2: Расчеты электрических печей и установок. - 131 с.

16. Мастрюков Б. С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей / Б. С. Мастрюков. М.: Высшая школа. – 1978. – 342 с.

17. Кривандин В. А. Metallurgicheskie pechi/ В. А. Кривандин, Н. Г. Молчанов: М.: Высшая школа. – 1962. – 600 с.

18. Тымчак В. М. Расчет нагревательных и термических печей: Справ. изд. Под ред. Тымчака В. М. и Гусовского В. Л. - М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

19. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах [Текст] : монография / А.Б. Бирюков. - Донецк : Ноулидж, 2012. - 247 с.

20. Найдек, В.Л. Интенсификация электроплавильных процессов [Текст] / В. Л. Найдек, А. А. Костяков, А. А. Волошин, Современ. электрометаллургия. – 2009. – № 2.

21. Ткаченко, С. С. Проблемы модернизации литейного производства станкостроения [Текст] / С. С. Ткаченко, В. С. Кривицкий, Литейное производство – 2012. – № 5.

22. Technoeconomic Assessment of Electricity Steelmaking Through the Year 2000. EPRI Report. EM-5445.

23. Fontana, A. EAF Scrap Preheating Technologies. – Victoria, Australia / High Tempr. Pr. Symposium, 2012.

24. Стеблов, А. Б. Пути снижения затрат при выплавке стали [Текст] / А. Б. Стеблов, А. В. Мажейко, Э. А. Стеблова, Metallurg. – 2006. – № 11.

25. Schmitt, R. Y. Electric Arc Furnace Scrap Preheating. CMP, Pittsburgh, 1997.