

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

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

на тему «Аналіз шляхів покращення роботи енергетичного обладнання  
промислового підприємства»

Виконала: студент III курсу,  
групи \_\_\_\_\_ 6.1440-с  
спеціальності 144 «Теплоенергетика» \_\_\_\_\_  
освітньої програми

Теплоенергетика  
(код і назва освітньої програми)

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

М.О.Баранецький

(ініціали та прізвище)

Керівник ст.викладач С.Є. Чижов  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент к.т.н, доц. О.І. Осаул  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя  
2023

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

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем  
Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Спеціальність 144 Теплоенергетика  
(код та назва)  
Освітня програма 144 Теплоенергетика  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
« 10 » червня 20 23 року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Баранецький Микита Олегович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

- 1 Тема роботи (проекту) «Аналіз шляхів покращення роботи енергетичного обладнання промислового підприємства»  
керівник роботи ст. викладач Чижов Сергій Євгенович  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)  
затверджені наказом ЗНУ від «29» грудня 2022 року №1893-с
- 2 Строк подання студентом роботи «15» червня 2023 року
- 3 Вихідні дані до роботи: технічні характеристики пічного обладнання, яке працює не ефективно; температура на зовнішній поверхні кладки тигельної печі 70 °С, подина тигельної печі виконана з шамоту товщиною 250 мм і асбоплити товщиною 120 мм; питома витрата на розплавлення однієї тонни магнію 200 кВт·год/т, а на перегрів на 1 °С – 0,298 кВт·год/т
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Загальна характеристика промислового підприємства. Розрахунок енергетичних балансів пічного обладнання підприємства. Заходи щодо покращення роботи енергетичного обладнання.
- 5 Перелік графічного матеріалу: технологія виробництва титану; тигельна піч опору; енергетичний баланс тигельної печі опору; характеристики запропонованої теплоізоляції; характеристики запропонованих

теплоізоляційних матеріалів; загальний вигляд камерної печі; футерування камерної печі промислового підприємства.

6 Консультанти розділів роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Чижов С.Є., ст. викладач	14.04.2023	31.03.2023
2	Чижов С.Є., ст. викладач	31.03.2023	20.05.2023
3	Чижов С.Є., ст. викладач	21.05.2023	09.06.2023

7 Дата видачі завдання 14.02.2023

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Приміка
1	Загальна характеристика промислового підприємства	31.03.2023	виконано
2	Розрахунок енергетичних балансів пічного обладнання підприємства	08.05.2023	виконано
3	Заходи щодо покращення роботи енергетичного обладнання	09.06.2023	виконано
4	Оформлення пояснювальної записки та розробка креслень	15.06.2023	виконано

Студент

  
(підпис)

М.О.Баранецький  
(ініціали та прізвище)


Керівник роботи (проекту)

  
(підпис)

С.Є. Чижов  
(ініціали прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер

  
(підпис)

С.Є. Чижов  
(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Аналіз шляхів покращення роботи енергетичного обладнання промислового підприємства» містить 68 сторінок, 10 рисунків, 8 таблиць, 22 джерела посилання.

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, КАМЕРНА ПІЧЬ, ТИГЕЛЬНА ПІЧ,  
ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС, ФУТЕРУВАННЯ, ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЯ,  
ТЕПЛОВТРАТИ.

У першому розділі зроблено аналіз споживання енергоресурсів на підприємстві та характеристика енергетичних споживачів титанового виробництва.

У другому розділі розраховано теплові та енергетичні баланси пічного обладнання для розробки шляхів покращення роботи енергетичного обладнання промислового підприємства.

У третьому розділі запропоновані заходи щодо покращення роботи енергетичного обладнання, а саме обґрунтовано необхідність заміни теплоізоляції печей.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА.....	8
1.1 Характеристика ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» ...	8
1.2 Технологічна схема виробництва титанової губки.....	11
1.2.1 Отримання титанового шлаку методом плавки ільменітового концентрату в руднотермічній печі.....	12
1.2.2 Отримання тетраклориду титану технічного.....	13
1.2.3 Ректифікаційна очистка тетраклориду титану технічного.....	14
1.2.4 Відновлення титану з тетраклориду титану магнієм.....	16
1.2.5 Вакуумна сепарація .....	18
1.3 Загальна характеристика енергетичних споживачів титанового виробництва.....	20
1.3.1 Аналіз споживання енергоресурсів на підприємстві.....	20
1.3.2 Енергетична характеристика основних споживачів цеху № 7.....	25
2 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ БАЛАНСІВ ПІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПІДПРИЄМСТВА.....	28
2.1 Аналіз ефективності технологічного процесу.....	28
2.2 Енергетичний баланс тигельної печі .....	33
2.2.1 Розрахунок теплових втрат через футеровку печі.....	33
2.2.2 Визначення кількості теплоти, переданої теплопровідністю через подину печі.....	39
2.2.3 Визначення кількості теплоти, яку переносять теплопровідністю через кришку.....	41
2.2.4 Теплові втрати випромінюванням.....	43
2.2.5 Втрати на теплові замикання.....	44
2.2.6 Витрати енергії на розплавлення і перегрів.....	45
2.3 Розрахунок теплового балансу камерної печі з викатним подом	47

3	ЗАХОДИ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ .....	48
3.1	Обґрунтування теплоізоляції печі СМТ-3.....	48
3.1.1	Розрахунок теплових втрат через футеровку печі.....	49
3.1.2	Визначення кількості теплоти, переданої теплопровідністю через подину печі.....	55
3.1.3	Визначення кількості теплоти, яку переносять теплопровідністю через кришку.....	57
3.1.4	Теплові втрати випромінюванням.....	57
3.1.5	Втрати на теплові замикання.....	57
3.1.6	Витрати енергії на розплавлення і перегрів.....	57
3.2	Заміна теплоізоляції камерної печі.....	60
	ВИСНОВКИ.....	65
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	66

## ВСТУП

Проблема енергозбереження перетворилась в одну з найважливіших загальнолюдських проблем. Раціональне та економне використання природних ресурсів, скорочення шкідливих викидів в атмосферу та ефективне використання електричної та теплової енергії набувають виключно важливого значення у сучасному суспільстві.

Необхідність підвищення рівня енергетичної безпеки є одним з головних завдань нашої держави на сучасному етапі її соціально-економічного розвитку.

Досягнення високого рівня конкурентоспроможності продукції на внутрішньому і зовнішньому ринках вимагає у кожній галузі промисловості цілеспрямованої роботи над підвищенням рівня енергоефективності її виробництва при одночасному покращенні якості. В умовах зниження економічної ефективності енергоємних теплотехнологічних процесів особливо гостро стала проблема заощадження всіх енергоресурсів і, в першу чергу, природного газу.

Незважаючи на те, що питання можливості вдосконалення роботи енергетичних установок промислових підприємств вивчаються вітчизняними і зарубіжними вченими протягом багатьох десятиліть, існує значний розрив між обсягами проведених наукових досліджень і практичними показниками щодо їх роботи. Навіть за можливості швидкої окупності заходів, спрямованих на підвищення енергоефективності установок, їх впровадження відбувається лише в поодиноких випадках.

# 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

## 1.1 Характеристика ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат»

ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» має повний цикл виробництва: титана губчастого, злитків титанових, тетрахлориду титану, ферротитан, шлаку титанового. В склад ТОВ «ЗТМК» входять п'ять основних цехів: ремонтно-механічний, по виробництву титанового шлаку и тетрахлориду титану, магнія та титану губчастого, теплоенергетичний, по переробці титану і германію, а також сім допоміжних цехів: транспортний, енергоцех, по ремонту і обслуговуванню контрольно-вимірних приборів та засобів автоматизацій, контролю газобезпеки і нейтралізації промислових стоків, ремонтно-будівельний, побутового обслуговування та ЦЛ [1].

Все це об'єднано в єдиний технологічний потік, який потребує твердої централізації в управлінні виробничими процесами.

ТОВ «ЗТМК» - єдине підприємство з виробництва губчастого титану в Україні та Європі. На сьогодні Україна займає третє місце в світі за запасами титанових руд найвищої якості і є одним з шести світових монополістів виробництва губчастого титану. Це багатство України виплавляється на закритому підприємстві «ЗТМК», що розкинулося на площі 115 Га.

Основна продукція виробництва це:

- титан губчастий;
- шлак титановий;
- тетрахлорид титану очищений;
- злитки титанові;
- відливки титанові фасонні;
- ферротитан;
- гідрид титану губчастого.

Титан володіє унікальними хіміко-металургійними властивостями. Він має високу хімічну стійкість що до багатьох агресивних середовищ неорганічного й органічного походження, при нормальних і підвищених



температурах, пластичність при малій щільності, високу корозійну стійкість, що вдало поєднується в ньому з легкістю і великою механічною міцністю [2].

Залежно від хімічного складу, механічних властивостей і твердості титанової губки комбінат випускає кілька марок губчастого титану: ТГ-90, ТГ-100, ТГ-110, ТГ-120, ТГ-130, ТГ-150, ТГ-Тв. Різниця між цими марками полягає у тому, що вони мають різний коефіцієнт твердості, який залежить від хімічного складу продукту у таблиці 1.1.

Продукти виробництва - титановий шлак, тетрахлорид титану очищений, злитки титанові, відливки титанові фасонні, феротитан, гідрид титану губчастого отримуються в процесі виробництва титану губчастого.

Залежно від масової долі вуглецю комбінат випускає дві марки продукції тетрахлорида титана очищеного: ОТТ-0 і ОТТ-1. Масова доля вуглецю в марці ОТТ-0 не перевищує 0,003 %, а в ОТТ-1 - не перевищує 0,01 %. Також комбінат надає послуги з виготовлення ОТТ підвищеної якості з пониженою концентрацією домішків. Тетрахлорид титану очищений поставляється у залізо дорожніх цистернах, ємності з нержавіючої сталі [3].

Виливки титанові фасонні призначені для отримання деталей виробів, що працюють в умовах агресивних середовищ при тиску до 3,9 МПа. Відлиття поставляються упакованими в спеціалізовані алюмінієві контейнери постачальника. При відправці автотранспортом споживача виливки поставляються без тари.

Титанові злитки також випускають двома марками ВТ1-0 і Grade 2 ASTM B348-95, діаметром 660, 720, 820, 950 мм та вагою (2000-8300) кг.

Феротитан випускається марки ФТи70С05 з фракційним складом (-70 +12) мм, вмістом титану (68...75) %, масою не більше 500 кг., запакований в сталеві бочки [2, 3].

Якість продукції ЗТМК гарантується сертифікованою системою менеджменту якості згідно вимог міжнародного стандарту ISO 9001. Комбінат йде в ногу з часом - підвищує ефективність виробництва,

проводить модернізацію і технічне переозброєння, удосконалює технологію виробництва, ефективно працює над підвищенням якості продукції [4].

Таблиця 1.1 - Хімічний склад титанової губки

Марка	Хімічний склад титанової губки								Твердість по Бринелю, кгс
	Ti, %	Масова частка домішок, %							
		Fe	Si	Ni	C	Cl	N	O	
ТГ-90	99,74	0,05	0,01	0,04	0,02	0,08	0,02	0,04	90
ТГ-100	99,72	0,06	0,01	0,04	0,03	0,08	0,02	0,04	100
ТГ-110	99,67	0,09	0,02	0,04	0,03	0,08	0,02	0,05	110
ТГ-120	99,64	0,11	0,02	0,04	0,03	0,08	0,02	0,06	120
ТГ-130	99,56	0,13	0,03	0,04	0,03	0,1	0,03	0,08	130
ТГ-150	99,45	0,21	0,03	0,04	0,03	0,12	0,03	0,01	150
ТГ-Тв	97,75	1,9	-	-	0,1	0,15	0,1	-	-

ЗТМК є стратегічно важливим об'єктом, так як комбінат це підприємство найвищого рівня небезпеки. Виробництво губчастого титану та іншої продукції не тільки складне, але і таїть в собі потенційну загрозу для життя і здоров'я як самих робітників, так і всього населення Запоріжжя. Адже в технологіях застосовується анодний хлор-газ і рідкий хлор. Саме через це на комбінаті діють суворі правила дисципліни і захисту. Кожний робітник зобов'язаний мати при собі противогаз та каску, у разі непередбаченого викиду хлоридів.

## 1.2 Технологічна схема виробництва титанової губки

Титан і його сплави є цінними конструкційними сплавами. Отримання металевого титану ускладнюється його дуже високою хімічною активністю при підвищених температурах. Тому при виробництві титану потрібні особливі умови, які забезпечують достатню чистоту виробленого металу.

В основі технології виробництва титану (див. рис. 1.1) лежить процес Кролля [3]. Отримання титану магнієтермічним відновленням з вакуумною дистиляцією передбачає охолодження губки (отриманої при відновленні тетрахлорида титану магнієм) перед подальшим її нагріванням для проведення вакуумної дистиляції.

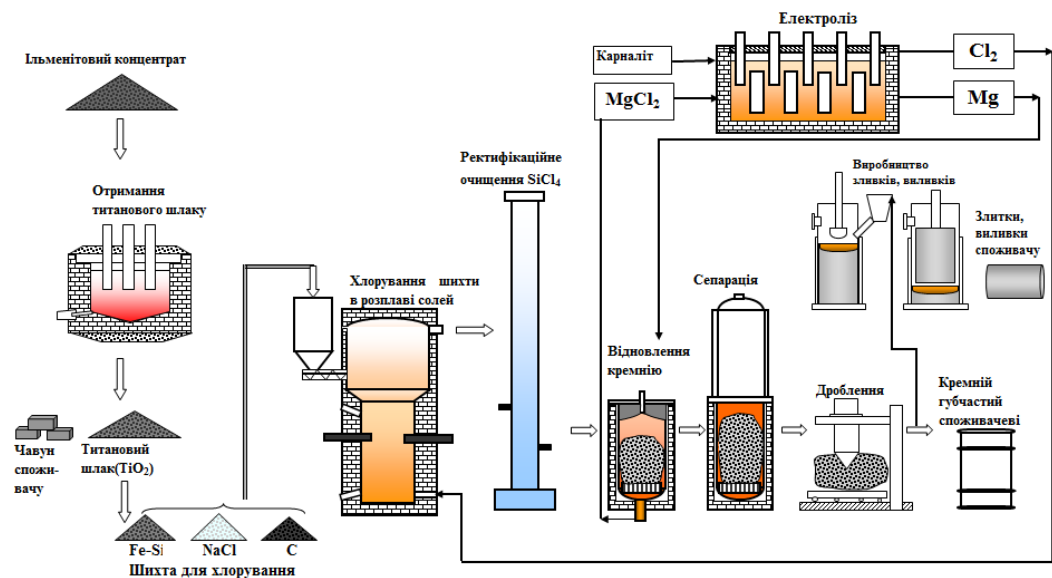


Рисунок 1.1 - Технологічна схема виробництва титану губчастого

Технологічна схема виробництва титану губчастого включає наступні основні пункти:

- отримання титанового шлаку методом плавки ільменітового концентрату в руднотермічній печі (РТП) і отримання титановмістної шихти;
- отримання тетрахлорида титану технічного;

- ректифікаційна очистка тетрахлорида титану технічного;
- відновлення титану з тетрахлориду титану магнієм;
- вакуумна сепарація і переробка блоків титану губчастого.

Магнієтермічний спосіб отримання титану з тетрахлориду титану виявився найбільш економічно і технологічно доцільніше тільки при комбінуванні титанового і магнієвого виробництв, які забезпечують найбільш раціональну регенерацію продуктів (магній і хлор) та переробку відходів (хлорид магнію).

У процесі магнієтермічного відновлення утворюється металевий титан, забруднений продуктами відновлення (так називається реакційна маса) [5].

### 1.2.1 Отримання титанового шлаку методом плавки ільменітового концентрату в руднотермічній печі

Виробництво титанового шлаку полягає в відновній електричній плавці ільменітового концентрату з вмістом  $TiO_2$  не менше 63 % спільно з вуглецевим відновником - вугілля, кокс, антрацит. Процес плавки ільменітового концентрату і вуглецевого відновника, попередньо подрібненого до розміру шматків не більше 10 мм, проводять в руднотермічній печі (РТП) при температурі 1600 °С. У нижній частині печі розташовують вугільну насадку, нагрівається при пропусненні через неї електричного струму. У піч подають брикети титанового шлаку, а через фурми всередину печі-хлор. При температурі (900...1250) °С у присутності вуглецю утворюється чотирихлористий титан, а також хлориди.

Основне призначення цього процесу - відділення оксидів заліза від оксиду титану. Для цього концентрат ільменіту плавлять в суміші з деревним вугіллям і антрацитом в електропечах, де оксиди заліза і частину титану відновлюються по реакції [6].

Відновлене залізо вуглецюється, утворюючи чавун, який збирається на дні ванни печі, відділяючись від решти маси шлаку внаслідок різниці їх

питомих ваг. Чавун і шлак розливають окремо в виливниці. Відхідні гази з РТП направляються на газо очистку. Після цього шлак зливають, охолоджують і направляють на підготовку титановмістної шихти. Титановмістну шихту отримують змішуванням титанового шлаку, вуглецевого відновника і хлористого натрію. Перед змішуванням титановий шлак і вуглецевий відновлювач подрібнюють. Підготовлена титановмістна шихта прямує на ділянку хлорування для виробництва тетрахлориду титану.

### 1.2.2 Отримання тетрахлориду титану технічного

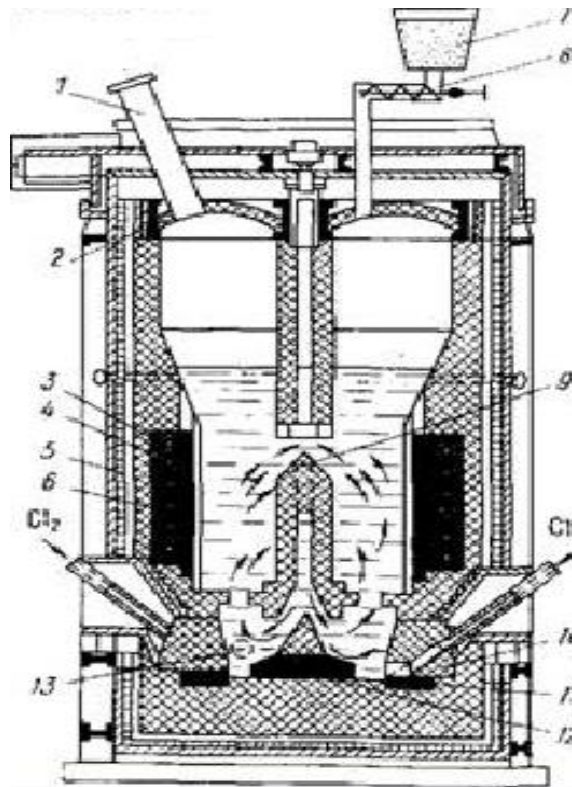
Тетрахлорид титану технічний утворюється при хлоруванні титановмістної шихти в розплаві солей в сольовому хлораторі і подальшої конденсації, що виходить з хлоратора парогазової суміші (ПГС) в системі апаратів конденсації. Процес хлорування титановмістної шихти ведеться в сольовому хлораторі.

Сольовий хлоратор (див. рис. 1.2) - апарат безперервної дії. Форма кожуха циліндрична, подина плоска, звід сферичний [6].

На поверхню сольового розплаву шнеком витратного бункера безперервно завантажується титановмістна шихта. Через бічні фурми хлоратора, розташовані в нижній його частині, в розплав подається хлор-газ. З хлоратора виводяться два продукти - ПГС продуктів хлорування і відпрацьований розплав.

Відпрацьований розплав виводиться з хлоратора періодично і частково, після охолодження вивозиться у відвал. ПГС виводиться з хлоратора безперервно і надходить у систему апаратів очищення ПГС і конденсації технічного тетрахлориду титану (ТТТ). Апарати очищення ПГС: камера пилова, зрошувальний скруббер.

Апарати конденсації ТТТ: два послідовно встановлених зрошувальних конденсатора, де в процесі охолодження відбувається конденсація ТТТ.



1 - газохід; 2 - звід; 3 - графітовий електрод; 4 - сталеві труби для відводу тепла; 5 - кожух хлоратора; 6 - шамотна футеровка; 7 - бункер з шихтою, 8 - шнековий живильник; 9 - перегородка для створення циркуляції розплаву; 10 - фурма; 11,12 - донні графітові електроди; 13 - нижній злив розплаву хлориду

Рисунок 1.2 - Загальний вигляд сольового хлоратора

Утворився технічний тетрахлорид титану, після відстоювання у відстійниках, іде на ділянку ректифікації для очищення.

### 1.2.3 Ректифікаційна очистка тетрахлорида титану технічного

Технічний тетрахлорид титану підлягає очищенню від ванадію, а також від низько і високиплячих домішок в ректифікаційній колоні (див.рис.1.3). Очищення від ванадію проводиться нижчими хлоридами титану (НХТ) в кубі

колони першого дистиляції. Процес ректифікації включає в себе очищення тетраклорида титану від низько киплячих домішок - перша ректифікація, і від високо киплячих домішок - друга ректифікація [7].



Рисунок 1.3 - Ректифікаційна колона

Процес ведеться при температурі в колонах ректифікації (120...142) °С. У процесі ректифікаційної очищення тетраклорида титану в кубах-випарників збираються кубові залишки, які періодично виводяться з кубів, гідролізуються, а потім випаровуються в електричній печі випарювання пульп (ПВП). В результаті утворюється кек ванадовмістний, який може бути використаний для отримання ванадієвого концентрату.

На перших етапах розвитку магнієтермічного виробництва титану для очищення титанової губки від хлориду магнію і магнію застосовували гідрометалургійний спосіб, який полягає в обробці реакційної маси розведеної (одновідсоткової) хлороводородної кислотою на хлориду для вилучення основної кількості магнію і його хлориду.

#### 1.2.4 Відновлення титану з тетрахлориду титану магнієм

Залишкова кількість витравлюють після мокрого подрібнення губки в кульовій млині десяти відсотковою шароводородной кислотою при 45 °С. Готовий титановий порошок містить (0,1...0,3) % водню, 1 % кисню, домішки якого, в основному, окисленням титану при контакті з водяним розчином [8].

Також розроблений спосіб вилуговування магнієтермічної реакційної маси в насичених розчинах хлориду магнію. Цей метод дозволяє регламентувати швидкість процесу розчинення хлористих солей зміною їх концентрації в розчині.

Реалізація цього способу можливе двома технологічними варіантами процесу вилуговування в попередньо приготований насичений розчин хлориду магнію одночасно вводяться реакційна маса і хлороводородной водний розчин, що утворюється в наслідок вилуговування рідка фаза також являла собою насичений або близький до насиченого розчин хлориду магнію. При цьому швидкість введення речовин регламентується забезпеченням изотермичности процесу вилуговування. В попередньо приготований насичений розчин хлориду магнію одночасно або великими порціями вводиться реакційної маси, а потім здійснюється регламентоване введення хлороводородного водного розчину.

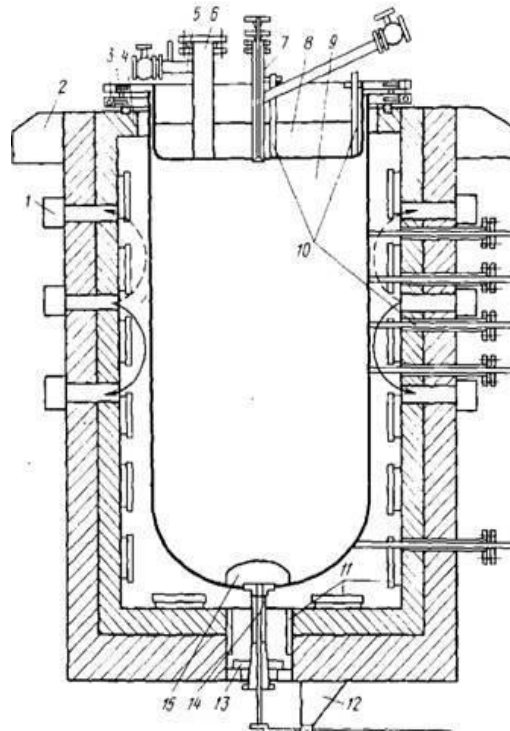
Відновлення титану з тетрахлориду титану магнієм проводиться в апаратах відновлення (див. рис. 1.4).

У підготовлений апарат відновлення заливається рідкий магній. Апарат з магнієм встановлюється в піч відновлення, в апарат подається тетрахлорид титану. У процесі взаємодії тетрахлориду титану з магнієм утворюється дихлорид магнію, який періодично зливається в ківш і направляється на електроліз для отримання магнію. Після закінчення процесу відновлення апарат з реакційною масою встановлюється в холодильник для охолодження. Тривалість охолодження становить не менше 12 годин [7].



Магній одержують методом електролітичного розкладання розплаву хлористого магнію і безводного карналіта в електролізерах. В електролізерах робочим розплавом є дихлорид магнію, безводний карналіт і кухонна сіль.

В результаті процесу електролізу утворюється металевий магній, який після додаткового очищення направляється на відновлення титану, хлор-газ - направляється в сольовий хлоратор, а відходи - вивозяться у відвал або споживачеві [9].



1 - колектори для подачі повітря, що обдуває реторту, 2 - косинки для підвіски печі; 3 - охолоджувані водою фланці реторти і кришки; 4 - футеровка печі; 5 - штуцер для приєднання до вакуумної системи і лінії подачі аргону; 6 - патрубок для заливання рідкого магнію; 7 - вузол подачі  $TiCl_4$ ; 8 - кришка реторти; 9 - реторта; 10 - термопара для заміру температури стінок і кришки реторти; 11 - нагрівачі; 12 - кріплення запору зливного пристрою; 13 - пісочний затвор; 14 - шток запірної голки зливного пристрою; 15 - помилкове дно

Рисунок 1.4 - Загальний вигляд апаратів відновлення титану

### 1.2.5 Вакуумна сепарація

Для поліпшення якості титану був розроблений спосіб вакуумної відгонки (сепарації) магнію і хлориду магнію з реакційної маси, який в даний час став домінуючим.

Вакуумна сепарація заснована на різній пружності парів титану, магнію і хлориду магнію. Так, температура кипіння при атмосферному тиску в титану магнію і хлориду магнію відповідно 1107, 1417 °С. Відділення вакуумної дистиляції. Однак, максимальна температура на стінці реторти не повинна перевищувати 1085 °С. При цій температурі залізо помітно взаємодіє з титаном з утворенням легкоплавкого з'єднання - евтектики. Тому для більш повного видалення магнію і хлориду магнію і зниження температури процесу возгонку ведуть під глибоким вакуумом [10].

Застосовуються напівсполучений спосіб отримання титанової губки. Після процесу відновлення апарат в гарячому стані в кришці монтують легкоплавку магнієву заглушку. На апарат з магнієвою заглушкою зверху монтують оборотну реторту - конденсатор і в зібраному вигляді апарат сепарації встановлюють в піч сепарації. При напівсполучені способі витрата електроенергії нижче, а якість титанової губки краще, ніж при роздільному [11].

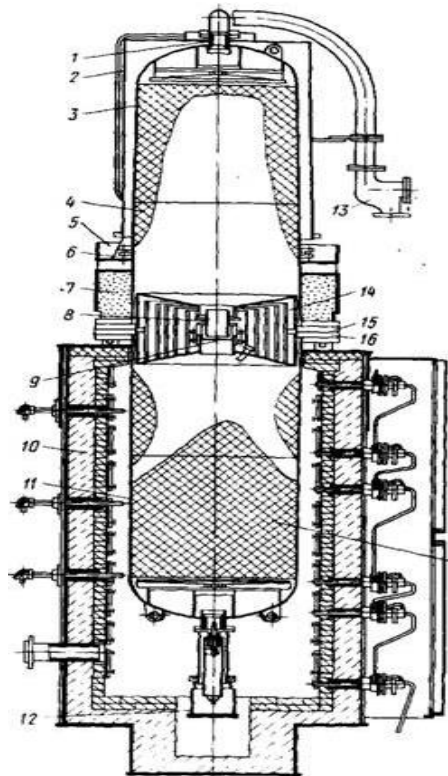
Апарат сепарації (див. рис. 1.5) з реакційною масою встановлюють в піч сепарації і включаються нагрівачі печі.

Процес відділення полягає в тому, що реакційну масу нагрівають до (900...950) °С в герметичному пристрої електронагрівальної печі, в якому створюється вакуум. При цьому частина хлористого магнію віддаляється в рідкому вигляді, а інша частина хлористого магнію і магній випаровуються. Титанова губка після очищення направляється на плавку. Плавка титанової губки відбувається в вакуумно-дугових печах.

Плавка губки методом вакуумно-дугового переплаву є основним способом переробки її в злитки. Вакуум печі оберігає титан від окислення і сприяє очищенню його від домішок. В процесі вакуумної сепарації хлорид

магнію і магній випаровуються й осаджуються в конденсаторі. Конденсат випаровується і частина самозаймається в контакті з повітрям при демонтажі апарата сепарації. Швидкість зволоження і вірогідність спалаху зростають зі збільшенням питомої поверхні і змісту дисперсного магнію.

Оскільки конденсат є оборотним, кисень, що міститься в продуктах зволоження і горіння, потрапляє в титанову губку, погіршуючи її якість. Тому на монтажному ділянці застосовується інертний газ - аргон, який витісняє повітря з реторти - конденсатора при монтажі апарату відновлення [12].



1 - патрубок для приєднання до вакуумної системи; 2 - зрошувач;  
3 - верхня (поворотна) реторта-конденсатор; 4 - конденсат; 5 - водозбірник;  
6 - ущільнювач; 7 - теплоізоляційний пояс; 8 - сполучна труба; 9 - магнеєва  
заглушка; 10 - електропіч; 11 - нижня реторта; 12 - заглушка - приварний  
стакан; 13 - вакуум-провід; 14 - екрани; 15,16 - кришки реторт

Рисунок 1.5 - Типовий апарат сепарації

Одним з основних факторів, що визначають умови конденсації і структури конденсату, є тепловий режим конденсатора, обумовлює швидкістю перегону магнію і хлориду магнію з титанової губки, конструктивними особливостями, габаритами апарату сепарації і режимом охолодження поверхні конденсатора. В даний час застосовується водне та повітряне охолодження, інтенсивність якого, в основному, задається в початку сепарації і не змінюється в ході процесу, що призводить до утворення пухкого конденсату в апаратах великої циклової продуктивності, яка характеризується підвищеної теплової навантаженням на конденсатор [13].

Після охолодження апарат сепарації демонтують, а реторту з блоком титану губчастого направляють на переробку. Отримані злитки титану переплавляють вдруге для видалення дефектів, використовуючи електроди. Після цього чистота титану становить (99,6...99,7) %. Після вторинного переплаву злитки використовують для обробки тиском (кування, штампування, прокатка).

### 1.3 Загальна характеристика енергетичних споживачів титанового виробництва

#### 1.3.1 Аналіз споживання енергоресурсів на підприємстві

Основною продукцією виробництва є титан губчастий, шлак титановий, тетрахлорид титану очищений, злитки титанові; відливки титанові фасонні, феротитан, гідрид титану губчастого.

Продукція комбінату затребувана у всіх країнах Європи та країнах близького сходу, але основним ринком збуту залишається Україна.

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, створення нових видів продукції і технології.

Загальне уявлення про результати діяльності та ефективності підприємства можна отримати з енергетичного обстеження підприємства - це передбачає оцінку всіх аспектів діяльності підприємства, які пов'язані з витратами на паливо та енергію різних видів.

До складу головних цехів заводу входять:

- цех електропостачання та ремонту (№ 1);
- цех з виробництва титанового шлаку (№ 2);
- цех з виробництва титанової губки (№ 3);
- теплоенергетичний цех (№ 4);
- цех з переробітки титана та германія (№ 5);
- ремонтно-механічний цех (№ 6);
- цех з виробництва магнія та титана губчатого (№ 7);
- цех лиття (№ 8);
- турбокомпресорна станція;
- насосна станція;
- адміністративно-побутові приміщення та навчальний комбінат.

Фінансові витрати цеху на оплату енергоносіїв приведені на рисунку 1.6.

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

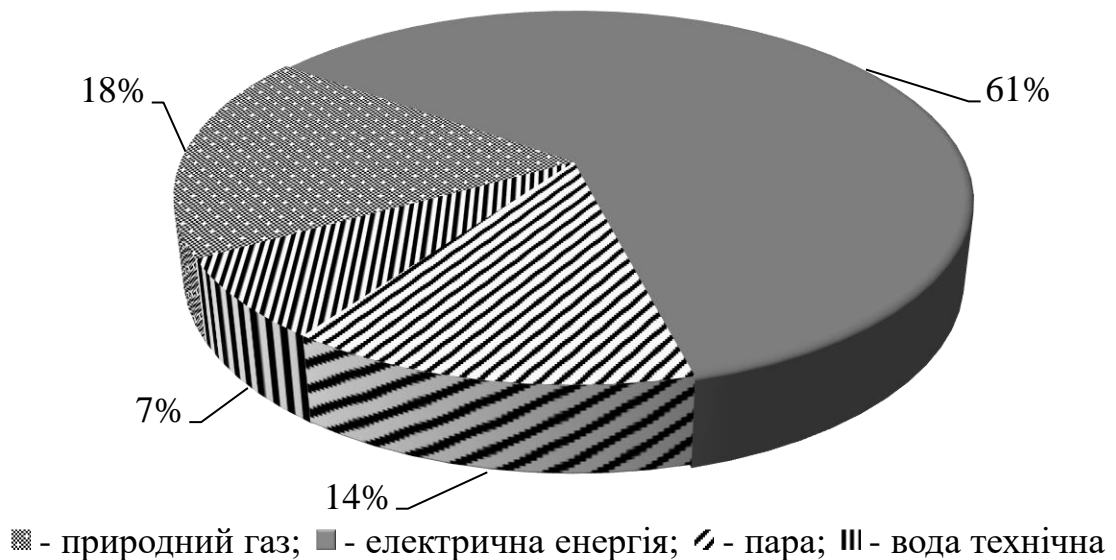


Рисунок 1.6 - Фінансові витрати підприємства на енергоносії за 2020 рік

Результати аналізу дозволяють отримати наочну фактичну картину щодо заходів з енергозбереження, експертну оцінку потенціалу енергозбереження та напрямки енергозбереження.

На підприємстві використовуються такі основні енергоносії як: електроенергія (постійного і змінного струму); пара (тиск до 5 атм., температурою (200...250) °С); вода (2...3) атм., природний газ (1...2) атм.

Аналіз діаграми, показує, що найбільша частина енергії на підприємстві пов'язана з використанням електричної енергії (71 %), на другому й третьому місці природний газ і пара (12 %) і на четвертому - вода (5 %).

У таблиці 1.2 відображене основні цеха споживачі електроенергії і втрати на підприємстві за останній рік, до впровадження енергоефективних заходів.

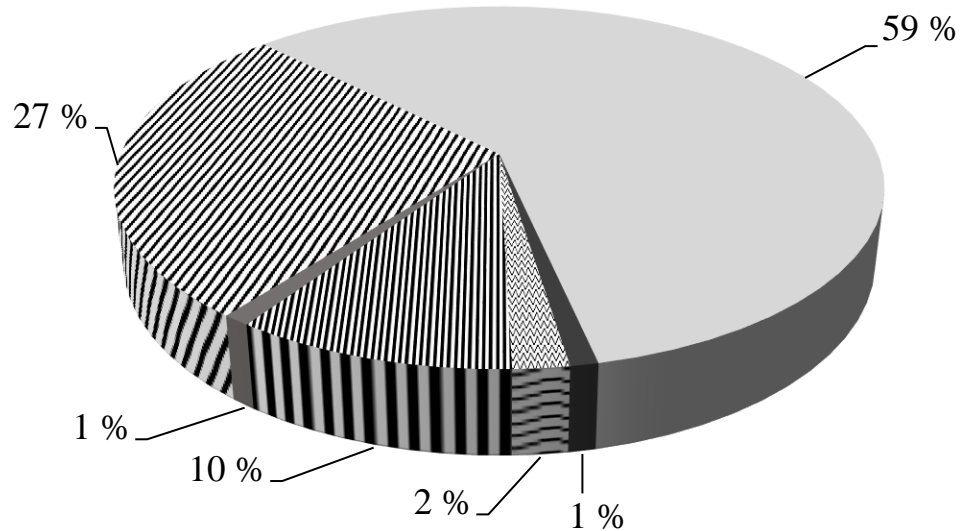
Таблиця 1.2 - Споживання електроенергії на ТОВ «ЗТМК» за останні 4 роки

Роки Споживачі	2017 рік, МВт	2018 рік, МВт	2019 рік, МВт	2020 рік, МВт
Цех № 2	90 811	97167	105340	113513
Цех № 3	21 138	22617	24520	26422
Цех № 4	33 354	35689	38691	41693
Цех № 7	198 658	212564	230443	248323
Цех № 8	2 095	2242	2431	2619
Інші	3 092	3309	3587	3866
Втрати в мережі	7 140	7640	8283	8925
Втрати в БСК	951	1017	1103	1189
Всього	339 242	362989	393521	424053

Видно, що у 2020 році, в середньому, на 24 % збільшилось споживання електроенергії у цехах. Це обумовлено збільшення кількості продукції що випускається комбінатом.

Збільшення обсягів споживання електроенергії призвело до збільшення втрат в мережах при транспортуванні і перетворені електроенергії на технологічних лініях. Щоб зменшити втрати, було прийнято рішення провести енергетичне обстеження одного з цеху підприємства.

З приведеної діаграми (рис. 1.7), видно що основними споживачами є цех № 7 з виробництва титанової губки та магнію, цех № 2 з виробництво титанового шлаку, теплоенергетичний цех № 4 та цех № 3 з виробництва титанової губки.



▨ - цех № 2; ■ - цех № 7; ■ - цех № 9; ≈ - цех № 10; || - цех № 12; ■ - інші

Рисунок 1.7 - Відсоткове співвідношення споживання електроенергії по цехам

На рисунку 1.8 показане розподілення електричної енергії за основними споживачами у цеху № 7 на 2020 рік.

З діаграми видно що перше місце за споживанням електричної енергії займають руднотермічні печі які розташовані у цеху № 7.

Зниження електроспоживання під час роботи руднотермічної печі є ефективним засобом для зменшення собівартості продукції.

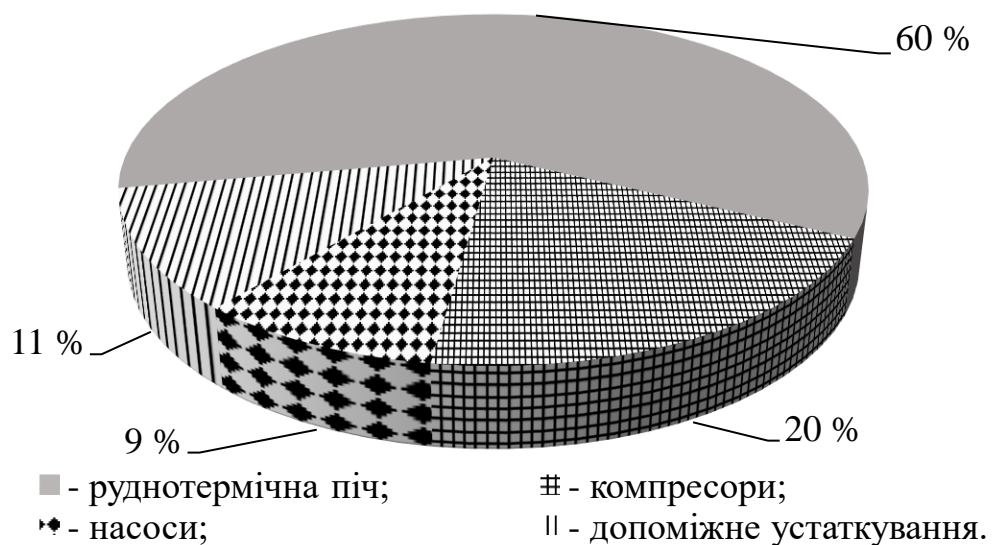


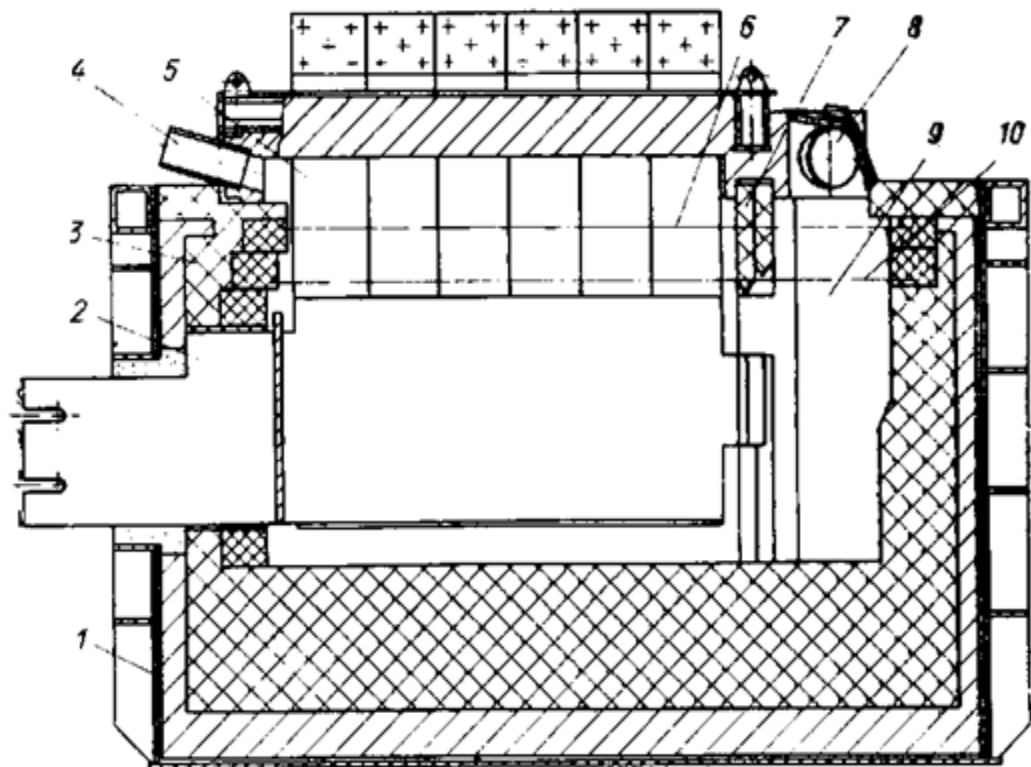
Рисунок 1.8 - Розподілення електричної енергії у цеху № 7



### 1.3.2 Енергетична характеристика основних споживачів цеху № 7

У цеху № 7 здійснюється виробництво магнію та титану губчастого. Цех включає декілька ділянок, зокрема ділянку електролізу магнію, першу пічну та другу пічну ділянку, ділянку титанової губки та вогнетривів тощо.

Ділянка електролізу магнію обладнана електролізерами бездіафрагменного типу ( рис. 1.9).



1 - кожух; 2 - рамний катод; 3 - футерування; 4 - відсмоктувач анодного хлору; 5 - графітові аноди; 6 - верхній рівень електроліту; 7 - перегородка; 8 - сантехнічний відсмоктування газу зі збірної осередку; 9 - збірна осередок; 10 - нижній рівень електроліту

Рисунок 1.9 – Бездіафрагменний електролізер

В результаті процесу електролізу утворюється металевий магній, який після додаткового очищення направляється на відновлення титану, хлор-газ

направляється в сольовий хлоратор, а відходи: шлам і шламoeлектролітна суміш – вивозяться на відвальне господарство або реалізуються споживачу. Відхідні гази з бездіафрагменних електролізерів направляються на газоочистку.

У технологічному процесі магнієвого виробництва задіяно 6 печей СМТ, які нагрівають розчин до необхідної температури.

Піч СМТ-3 призначена для отримання магнію відновника рафінуванням магнію-сирцю, переплавою і рафінуванням магнію первинного в чушках; переплавленням оборотного конденсату тютюнового виробництва, твердих хлористих солей.

Також у роботі розглядаються заходи щодо покращення роботи камерних печей.

Камерна піч, показана на рисунку 1.10, призначена для різних видів термічної обробки деталей та інструментів при одиничному і дрібносерійному виробництві. Для завантаження і вивантаження деталей в цих печах використовують підвісні кліщі на монорейці і завантажувальні машини. Повітря для горіння в цих печах підігрівається в рекуператорі. Якщо для печей використовують газ середнього тиску і спалювання газу проводиться в інжекційних пальниках, то повітря для горіння підігрівають і рекуператор не встановлюють. Продукти горіння відводяться під парасольку і потім у витяжну трубу. При роботі зі звичайною пічної атмосферою (окисної) печі мають максимальну температуру 1150 ° С. Іноді виготовляють печі з контрольованою атмосферою (захисною). Гранична температура нагріву в таких печах досягає 950 ° С.

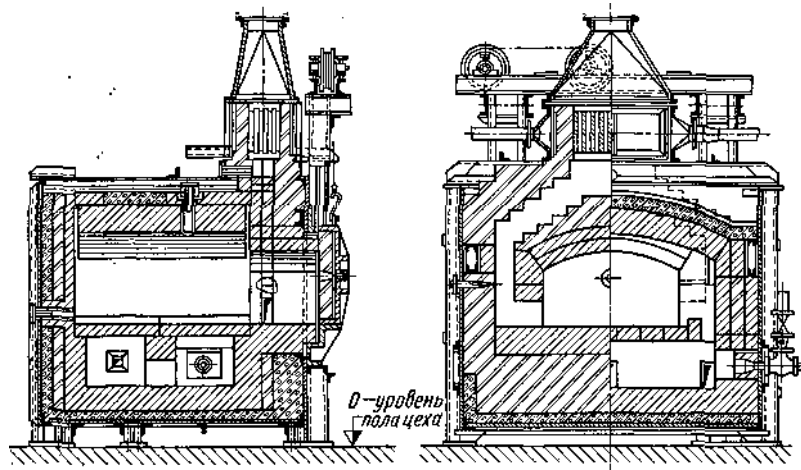


Рисунок 1.10 – Загальний вигляд камерної печі

## 2 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ БАЛАНСІВ ПІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

### 2.1 Аналіз ефективності технологічного процесу

Існують два способи одержання металевого магнію: термічним відновленням із руд і електролізом хлоридних розплавів. В основі першого способу лежить відновлення оксиду магнію вуглецем або кремнієм, а другого – електроліз розплавленого хлористого магнію  $MgCl_2$ . Більш розповсюджений електролітичний спосіб виробництва металевого магнію. Він складається з двох основних процесів: одержання хлористого магнію з вихідної сировини і його електролізу.

Хлористий магній одержують випалом магнезиту або доломіту і хлоруванням оксиду магнію, що утворився, при  $(800...900)^\circ C$  в присутності відновлювача (вуглецю).

Одержаний хлорид магнію піддають електролізу, який проводять в електролізерах, що представляють собою герметизовані ванни прямокутної форми із шамотним футеруванням заповнені в якості електроліту розплавом хлористих солей:  $(8...16)\% MgCl_2$ ,  $(25...35)\% CaCl_2$ ,  $(25...35)\% NaCl$  і  $(18...25)\% KCl$ . Аноди виготовлені із графіту, катодами служать дві сталеві пластини.

Електроліз – енергоємний процес, тому кількісний контроль корисності використання енергії є необхідним і проводиться за показником питомої витрати електроенергії

$$w = \frac{10^{-3} \cdot I \cdot U_{cp} \cdot \tau}{10^{-6} \cdot I \cdot \tau \cdot q \cdot B_c} = \frac{10^3 \cdot U_{cp}}{q \cdot B_c}, \quad (2.1)$$

де  $I$  – сила струму, А;

$U_{cp}$  – напруга на електролізері, В;

$\tau$  – час, год;

$q$  – електрохімічний еквівалент, г/ А·год;

$B_c$  – вихід за струмом, долі одиниці.

Величина, обернена видатку електроенергії – кількість металу, що виділяється при витраті 1 кВт·год електроенергії, називається виходом за енергією, розраховується за формулою

$$B_e = \frac{1}{W} = \frac{10^{-3} \cdot q \cdot B_c}{U_{cp}}, \quad (2.2)$$

і залежно від потужності і конструкції електролізера та умов електролізу при отриманні магнію становить 40 - 65% [2].

Виходом за струмом називають відношення практичної витрати енергії до мінімальної (теоретичної).

$$B_c = \frac{\Delta m_{\text{практ}}}{\Delta m_{\text{теор}}} \cdot 100\% = \frac{Q_{\text{практ}}}{Q_{\text{теор}}}. \quad (2.3)$$

Зазвичай вихід за струмом  $B_c$  при електролізі розплавів зменшується при підвищенні температури і зростає при збільшенні катодної густини струму і змінюється від 60 до 90 % [1].

Після отримання магнію – сирцю з метою видалення з нього домішок заліза, кремнію, нікелю, міді та алюмінію при температурі (700...825) °С здійснюють його рафінування. Процес рафінування шляхом переплавки з флюсом полягає в перемішуванні розплавленого магнію зі спеціальними флюсами, здатними розчиняти домішки і переводити їх в шлам. Для цього використовують електроліт (флюс), що має наступний склад: 64,2 %  $MgCl_2$ , 13 %  $KCl$ , 15,2 %  $CaF_2$ , 8,2 %  $NaF$ . У цьому флюсі розчиняється до одного

відсотка магнію. Також в нього переходять нітриди, на поверхню дифундують хлориди, а на дно електролізера осідає шлам. Катодна густина струму становить (6...10) А/см<sup>2</sup>, анодна густина струму (6...8) А/см<sup>2</sup>. Вихід магнію за струмом досягає (95...98) %, а витрати електроенергії складають (9,5...10) кВт·год на кілограм рафінованого магнію [10].

Для отримання магнію високої чистоти використовують рафінування сублімацією, сутність якої полягає в сублімації твердого магнію-сирцю в умовах глибокого вакууму з подальшою конденсацією парів чистого магнію. Осівший на стінках кристалізатора магній чистотою до 99,99 % переплавляють і розливають на злитки або чушки на розливній машині. При розливанні струмінь магнію оберігається від окислювання шляхом запилення металу порошком сірки.

Температура електролізу є основним фактором, що суттєво чинить вплив на вихід магнію за струмом. Температурний режим електролізера для отримання магнію і хлору схильний до значних коливань і залежить практично від усіх операцій з обслуговування електролізера (залівка сировини, вибірка шламу, якість сировини, температура навколишнього повітря). Такі коливання досягають (20...25) °С. Зниження діапазону коливань температури, стабілізація її на оптимальному рівні призводить до збільшення виходу магнію за струмом на (1,5...2) % на кожні 10 °С. Зниження коливань перепаду температури проводять шляхом зміни струму, напруги або кількості газів, що відсмоктуються. Також регулювання температурного режиму головного апарату здійснюється зміною щільності струму на електродах головного апарату і / або зміною міжелектродної відстані [11].

В промислових умовах її контроль є однією з найважливіших операцій в обслуговуванні електролізера. Оптимальні температурні межі, головним чином, залежать від складу електроліту і конструкції електролізера. Оптимальною робочою температурою електролізу є

приблизно (650...660) °С, [1], проте в робочій інструкції отримання магнію-сирцю електролітичним засобом для електролізників розплавлених солей дільниці виробництва магнію досліджуваного цеху зазначається (690...725)°С [8].

Окрім електролізерів у технологічному процесі задіяні піч безперервного рафінування (ПНР) та 6 печей СМТ, які нагрівають розчин до необхідної температури. При завантаженні сировини температура суттєво знижується, що впливає на ефективність процесу. Через це для підвищення ефективності використання електричної енергії, та якості продукції доцільно дослідити вплив кількості та комбінацію задіяного обладнання на питомих споживання електроенергії.

Стабілізація температурного режиму електролізу в процесі електролітичного виробництва магнію та оптимальний склад виробничого обладнання, задіяного процесі, забезпечує підвищення техніко-економічних показників електролізу, а саме зниження витрат електроенергії і підвищення виходу за струмом [5].

В таблиці 2.1 приведений енергетичний баланс електролізера [2].

Таблиця 2.1– Структура енергобалансу магнієвого електролізера

Надходження енергії			Витрата енергії		
позначення	кВт·год/год	%	позначення	кВт·год/год	%
$Q'_1$	687,4	93,8	$Q''_1$	385	49,4
			$Q''_2$	7,7	0,99
			$Q''_3$	7,54	0,96
			$Q''_4$	13,01	1,7
$Q'_2$	45,5	6,2	$Q''_5$	1,33	0,2
			$Q''_6$	46,94	6
			$Q''_7$	43,72	5,6
			$Q''_8$	249,37	32
Разом	732,9	100	$Q''_9$	24,53	3,15
Нев'язка	46,24	6	Разом	779,14	100

Нев'язка балансу 46,24 кВт·год/год (близько 6 %) обумовлена низкою допущених при розрахунку спрощень і наближеністю прийнятих в розрахунку температур поверхонь. Однак навіть подібне наближення дозволяє виявити основні напрямки витрати і втрат електроенергії.

Як видно з таблиці 2.1, 50 % енергії витрачається на електрохімічний процес розкладання  $MgCl_2$  і 40,75 % – на теплові втрати, причому основна частка теплових втрат припадає на анодне перекриття і особливо на анодні голівки (32 % від усіх енерговитрат). Теплова енергія виділяється в основному при подоланні електричним струмом омичного опору в електролізері і витрачається як на компенсацію тепловтрат, так і на підвищення ентальпії продуктів електролізу.

З наведеного енергетичного балансу з очевидністю випливає, що будь - які заходи щодо зниження теплових втрат з анодних перекриттів, і особливо з анодних головок, знизять енергоємність виробництва магнію. І це особливо важливо, тому що енергетичні витрати в структурі собівартості магнію досягають (30...33) %, що перевищує витрати на утримання обладнання, будівлі та споруд в цеху, а також і цехові витрати (28...30) %.

У наведеному енергетичному балансі представлені всі основні статті витрат енергії. Для примусового регулювання температури електролізера необхідно порушити тепловий баланс і відкоригувати ті статті витрат енергії, зміна яких не знижує продуктивність апарату. Очевидно, що з усіх статей витрат електроенергії доцільно впливати лише на втрати з газами санітарно - технічного відсмоктування і втрати з поверхонь електролізера (особливо з анодних головок). Щоб змінити температуру електроліту на один градус, необхідно порушити баланс теплообміну приблизно на (1...0,5) % (близько (4...6) кВт·год/год). Відхилення температури електроліту в бездіафрагменних електролізерах від середньої (680...695) °С



становлять (17...22) °С, тобто випадкові порушення балансу перевищують (10...15) %. Очевидно, що навіть повне виключення тепловтрат з хлором, магнієм, шламоелектролітною сумішшю не може істотно компенсувати ці відхилення.

Радикальним способом теплового регулювання може виявитися автоматизоване регулювання обсягу газів СТО, так як саме з ними відводиться до (60...86) кВт-год/год енергії при максимальному їх об'ємі 2000 м<sup>3</sup>/год. Об'єм газів СТО можна змінювати в діапазоні від (300...500) до (1500...12000) м<sup>3</sup>/год (при нормальних умовах) і відповідно змінювати кількість енергії, що відводиться на (12...80) кВт-год/год, а температури на (3...13) °С. Цей діапазон обумовлений максимально допустимим вмістом хлору в газах СТО та пропускною спроможністю системи газоочистки.

## 2.2 Енергетичний баланс тигельної печі

Методика складання теплового балансу печі викладена в [12]. Він складається з статей надходження тепла і статей витрат тепла. Статті надходження тепла включають в себе кількість теплоти, що приймається піччю, статті витрат включають в себе кількість теплоти, що витрачається на розплавлення і перегрів металу, а також втрати тепла теплопровідністю через стіни, подину і кришку печі, втрати тепла випромінюванням, втрати тепла на теплові короткі замикання.

### 2.2.1 Розрахунок теплових втрат через футеровку печі

Температуру на зовнішній поверхні кладки приймаємо рівною, °С

$$t_{\text{зов}} = 70 ,$$

температуру навколишнього середовища, °С

$$t_{\text{навк}} = 20 ,$$

температуру внутрішньої поверхні кладки, з урахуванням того що, °C

$$t_{\text{пл}} (Mg) = 660 ,$$

і необхідності перегріву розплаву, приймаємо рівною, °C

$$t_{\text{кл}} = 800 .$$

Опір шарів стінки в холодному стані,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$

$$R_{0\text{ш}} = \frac{\delta_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ш}}}; \quad (2.4)$$

$$R_{0\text{асб}} = \frac{\delta_{\text{асб}}}{\lambda_{\text{асб}}}; \quad (2.5)$$

де  $\delta_{\text{ш}}$  і  $\delta_{\text{асб}}$  – товщина шару шамотної цегли і асбоплити, м;

$\lambda_{\text{ш}}$  і  $\lambda_{\text{асб}}$  – коефіцієнт теплопровідності шамотної цегли і асбоплити,

Вт/ (м·°C).

Коефіцієнт теплопровідності шамотної цегли, Вт/ (м °C)

$$\lambda_{\text{ш}} = 0,88 + 0,00023 \cdot t . \quad (2.6)$$

Коефіцієнт теплопровідності асбоплити, Вт/ (м °C):

$$\lambda_{\text{асб}} = 0,048 + 0,00014 \cdot t . \quad (2.7)$$

Тоді, опір шарів стінки в холодному стані за формулами (2.4 та 2.5),

$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$

$$R_{0\text{ш}} = \frac{0,25}{0,88} = 0,284 ;$$

$$R_{0\text{абс}} = \frac{0,12}{0,048} = 2,5 .$$

Отже, тепловий опір всієї стінки,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$

$$R_0 = R_{0\text{ш}} + R_{0\text{абс}}; \quad (2.8)$$

$$R_0 = 0,284 + 2,5 = 2,784.$$

Знаходимо температуру на межі розділу шарів,  $\text{°C}$

$$t_{\text{ш-абс}} = t_{\text{зов}} + (t_{\text{кл}} - t_{\text{зов}}) \cdot \frac{R_{0\text{абс}}}{R_{0\text{абс}} + R_{0\text{ш}}}; \quad (2.9)$$

$$t_{\text{ш-абс}} = 70 + (800 - 70) \cdot \frac{2,5}{2,784} = 725,53.$$

Середня температура шарів,  $\text{°C}$

$$\bar{t}_{\text{ш}} = (t_{\text{кл}} + t_{\text{ш-абс}}) \cdot 0,5; \quad (2.10)$$

$$\bar{t}_{\text{абс}} = (t_{\text{зов}} + t_{\text{ш-абс}}) \cdot 0,5; \quad (2.11)$$

$$\bar{t}_{\text{ш}} = (800 + 725,53) \cdot 0,5 = 762,76;$$

$$\overline{t_{abc}} = (70 + 762,76) \cdot 0,5 = 416,38.$$

Коефіцієнти теплопровідності в гарячому стані, Вт/ (м · °С)

шамотної цегли:

$$\lambda_{ш} = 0,88 + 0,00023 \cdot 762,76 = 1,055;$$

асбоплити:

$$\lambda_{abc} = 0,048 + 0,00014 \cdot 416,38 = 0,106.$$

Щільність теплового потоку через стінку, Вт/м<sup>2</sup>

$$q = \frac{t_{кл} - t_{зов}}{\frac{\delta_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{\delta_{abc}}{\lambda_{abc}}}; \quad (2.12)$$

$$q = \frac{800 - 70}{\frac{0,25}{1,055} + \frac{0,12}{0,106}} = 533,257.$$

Знаходимо уточнене значення температур на межах розділу шарів футеровки за формулою, °С

$$t_{ш-abc} = t_{кл} - q \cdot \frac{\delta_{ш}}{\lambda_{ш}}; \quad (2.13)$$

$$t_{ш-abc} = 800 - 533,257 \cdot 0,284 = 648,55.$$

Уточнюємо значення температур на зовнішній поверхні стінки, °C

$$t_{\text{зов}} = t_{\text{навк}} + \frac{q}{\alpha_2}, \quad (2.14)$$

де

$$\alpha_2 = 10 + 0,06 \cdot t_{\text{зов}}; \quad (2.15)$$

$$\alpha_2 = 10 + 0,06 \cdot 70 = 14,2 \text{ Вт/ (м} \cdot \text{°C)};$$

$$t_{\text{зов}} = 20 + \frac{533,257}{14,2} = 57,55.$$

Визначаємо уточнене значення середніх температур шарів і їх коефіцієнтів теплопровідності:

$$\overline{t_{\text{ш}}} = (800 + 648,55) \cdot 0,5 = 724,275^\circ\text{C};$$

$$\overline{t_{\text{абс}}} = (57,55 + 648,55) \cdot 0,5 = 353,05^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{\text{ш}} = 0,88 + 0,00023 \cdot 724,275 = 1,0465 \text{ Вт/ (м} \cdot \text{°C)};$$

$$\lambda_{\text{абс}} = 0,048 + 0,00014 \cdot 353,05 = 0,097 \text{ Вт/ (м} \cdot \text{°C)}.$$

Знайдемо уточнене значення щільності теплового потоку через стінку, Вт/м<sup>2</sup>

$$q' = \frac{800 - 57,55}{\frac{0,25}{1,0465} + \frac{0,12}{0,097}} = 503,013.$$

Уточнюємо  $\alpha_2$ , Вт/ (м · °С)

$$\alpha_2 = 10 + 0,06 \cdot 57,55 = 13,453.$$

При цьому тепловий потік від стінки в навколишнє середовище,  
Вт / м<sup>2</sup>

$$q' = \alpha_2 \cdot (t_{\text{навк}} - t_{\text{зов}}); \quad (2.16)$$

$$q'' = 13,453 \cdot (57,55 - 20) = 505,16.$$

Тоді розбіжність, %

$$\Delta q = \frac{q'' - q'}{q''} \cdot 100\% \quad (2.17)$$

$$\Delta q = \frac{505,16 - 503,013}{505,16} \cdot 100\% = 0,42.$$

Оскільки розбіжність становить менш ніж 5 %, то уточнення температур і матеріалів вогнетривів не потрібно. Так як піч має циліндричну форму, то для знаходження площі зовнішньої поверхні печі скористаємося формулою, м<sup>2</sup>

$$F = 2\pi \cdot R \cdot H ; \quad (2.18)$$

де  $R$  – зовнішній радіус печі;  $R = 1500$  мм;

$H$  – висота печі;  $H = 3000$  мм.

Отже, площа зовнішньої поверхні печі дорівнює,  $\text{м}^2$

$$F = 2\pi \cdot 1,5 \cdot 3 = 28,27.$$

Тепловий потік через стінку, Вт

$$Q = q \cdot F ; \quad (2.19)$$

$$Q = 503,013 \cdot 28,27 = 14220,178 .$$

2.2.2 Визначення кількості теплоти, переданої теплопровідністю через подину печі

Приймаємо, що подина печі виконана з шамоту товщиною 250 мм і асбоплити товщиною 120 мм; відстань від нижньої частини тигля печі приймаємо 150 мм.

Так як подина печі виконана з такого ж матеріалу, що і стіни і тієї ж товщини, отже, щільність теплового потоку від подини в навколишнє середовище буде дорівнювати щільності теплового потоку від стінок в навколишнє середовище, з урахуванням коефіцієнта 0,7 і, отже, Вт /  $\text{м}^2$

$$q'' = 13,453 \cdot 0,7 \cdot (57,55 - 20) = 353,61$$

Тоді розбіжність, %

$$\Delta q = \frac{505,16 - 353,61}{505,16} \cdot 100\% = 29,7.$$

Тоді задаємося іншою температурою, приймаємо  $t_{зов\ под.} = 70$  °С.  
Знайдемо уточнене значення щільності теплового потоку через стінку, Вт/м<sup>2</sup>

$$q' = \frac{800 - 70}{\frac{0,25}{1,0465} + \frac{0,12}{0,097}} = 495,578.$$

Уточнюємо  $\alpha_2$ , Вт/ (м · °С)

$$\alpha_2 = 10 + 0,06 \cdot 70 = 14,2.$$

При цьому тепловий потік від подини в навколишнє середовище,  
Вт / м<sup>2</sup>

$$q'' = 14,2 \cdot 0,7 \cdot (70 - 20) = 497.$$

Тоді розбіжність, %

$$\Delta q = \frac{495,578 - 497}{495,578} \cdot 100\% = - 0,29.$$



Отже перерахунок робити непотрібно.

Так як піч має циліндричну форму, отже, площу подини можна визначити, м<sup>2</sup>

$$F = \pi \cdot D^2 / 4 ; \quad (2.20)$$

де  $D$  – зовнішній діаметр печі, приймаємо 3м.

$$F = \pi \cdot 3^2 / 4 = 7,068 .$$

Тепловий потік через подину, Вт

$$Q = q'' \cdot F ; \quad (2.21)$$

$$Q = 497 \cdot 7,068 = 3513,086.$$

2.2.3 Визначення кількості теплоти, яку переносять теплопровідністю через кришку

Приймаємо, що кришка виконана з асбоплити товщиною 80 мм, зовнішню температуру приймаємо рівною  $t_{к.зов} = 70$  °С.

Середня температура дорівнює, °С

$$\bar{t}_к = (800 + 70) \cdot 0,5 = 435.$$

Коефіцієнт теплопровідності кришки в гарячому стані, Вт/ (м·°С):

$$\lambda_{\text{acб}} = 0,048 + 0,00014 \cdot 435 = 0,1.$$

При цьому щільність теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>

$$q' = \frac{800 - 70}{\frac{0,08}{0,1}} = 912,5.$$

Знаходимо  $\alpha_2$ , Вт/ (м · °С)

$$\alpha_2 = 10 + 0,06 \cdot 70 = 14,2.$$

При цьому, Вт / м<sup>2</sup>

$$q'' = 14,2 \cdot 1,3 \cdot (70 - 20) = 923.$$

Розбіжність, %

$$\Delta q = \frac{923 - 912}{923} \cdot 100\% = 1,14.$$

Похибка становить менше 5 %, отже товщина кришки обрана правильно. Площа кришки:

$$F_{\text{кр}} = \pi \cdot \frac{D^2}{4}; \quad (2.22)$$

де  $D$  – діаметр кришки, приймаємо 4,195 м.

$$F_{\text{кр}} = \pi \cdot \frac{4,195^2}{4} = 13,827 \text{ м}^2.$$

Тепловий потік через кришку визначаємо за формулою, Вт

$$Q_{\text{кр}} = \frac{\tau_{\text{пл}}}{\tau_{\mu}} \cdot q' \cdot F; \quad (2.23)$$

$$Q_{\text{кр}} = \frac{1,96}{2,8} \cdot 912,5 \cdot 13,827 = 883,84 .$$

#### 2.2.4 Теплові втрати випромінюванням

Величина результуючого потоку випромінюванням відповідає, Вт

$$Q = C_0 \cdot \left( \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{навк}}}{100} \right)^4 \right) \cdot F_{\text{розпл}} \cdot \Phi, \quad (2.24)$$

де  $C_0$  – константа випромінювання, що дорівнює  $C_0 = 5,67$ ;

$T_n$  – температура печі,  $T_n = t_{\text{кл}} = 800 + 273 = 1073 \text{ К}$ ;

$T_{\text{навк}}$  – температура навколишнього середовища  $T_{\text{навк}} = 20 + 273 = 293 \text{ К}$ ;

$F_{\text{розпл}}$  – площа дзеркала розплаву, яку можна визначити, знаючи середній діаметр печі, м<sup>2</sup>.

$\Phi$  – коефіцієнт діафраграмування, приймаємо за довідником  $\Phi = 0,64$

$$F_{\text{розпл}} = \frac{\pi \cdot \overline{D^2}}{4}; \quad (2.25)$$

де середній діаметр становить  $\overline{D^2} = 966$  мм.

Отже, площа дзеркала розплаву дорівнює, м<sup>2</sup>

$$F_{\text{розпл}} = \frac{\pi \cdot 0,966^2}{4} = 0,733.$$

Величина результуючого потоку випромінюванням дорівнює, Вт

$$Q = 5,67 \cdot \left( \left( \frac{1073}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right) \cdot 0,733 \cdot 0,64 = 35062,63.$$

При цьому дійсний променистий потік, Вт

$$Q_1 = \frac{\tau_{\text{всп}}}{\tau_u} \cdot Q; \quad (2.26)$$

$$Q_1 = \frac{0,84}{2,8} \cdot 35062,22 = 10518,79.$$

### 2.2.5 Втрати на теплові замикання

Втрати на теплові замикання приймаються рівними 70 % від втрат теплопровідністю через всі поверхні [13], Вт

$$Q_{\text{кз}} = 0,7 \cdot (Q_{\text{ст}} + Q_{\text{под}} + Q_{\text{кр}}); \quad (2.27)$$

$$Q_{кз} = 0,7 \cdot (14220,178 + 3513,086 + 8831,84) = 18595,57.$$

### 2.2.6 Витрати енергії на розплавлення і перегрів

Приймаємо питому витрату на розплавлення однієї тонни магнію 200 кВт·год/т, а на перегрів на 1 °С – 0,298 кВт ·год/т, при цьому корисна енергія дорівнює [10], кВт

$$Q_{кор} = Q_{розпл} + Q_{пер}. \quad (2.28)$$

Час плавлення металу становить 2,8 год, з яких на розплавлення йде 1,4 год, і на перегрів 0,56 год.

Отже, корисна енергія, кВт

$$Q_{кор} = \left( \frac{200 \cdot 0,1}{1,4} + \frac{0,298}{0,56} \right) \cdot 4 = 75,28.$$

Загальні втрати визначають додаванням усіх витрат, кВт

$$Q_{заг} = Q_{кор} + Q_{ст} + Q_{под} + Q_{кр} + Q_1 + Q_{кз}; \quad (2.29)$$

$$Q_{заг} = 75,28 + 14,22 + 3,513 + 8,832 + 10,519 + 18,595 = 130,959 .$$

Тепловий коефіцієнт корисної дії, %

$$\eta_T = Q_{\text{кор}} - Q_{\text{заг}} \cdot 100\%, \quad (2.30)$$

$$\eta_T = 75,28 / 130,959 \cdot 100\% = 57,48.$$

Результати розрахунку енергетичного балансу тигельної печі опору представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Енергетичний баланс тигельної печі опору СМТ

Стаття приходу	кВт	%	Стаття витрати	кВт	%		
Теплота, що вноситься в піч	130,959	100	Теплота на розплавлення і перегрів металу	75,28	57,48		
			Втрати теплоти теплопровідністю				
			а) через стінки	14,22	10,86		
			б) через подину	3,513	2,68		
			в) через кришку	8,832	6,74		
			Втрати теплоти випромінюванням	10,519	8,03		
Втрати на теплові короткі замикання	18,595	14,2					
Разом	130,959	100	Разом	130,959	100		

Втрати енергії через подину та стінки становлять 17,733 кВт або 13,54 %.

### 2.3 Розрахунок теплового балансу камерної печі з викатним подом

На ТОВ «ЗТМК» для термообробки металу встановлена камерна піч з викатним подом, яка опалюється природним газом. Це пічне обладнання теж працює не ефективно, тому для з'ясування причин низької ефективності та розробки заходів щодо покращення роботи обладнання було розраховано тепловий баланс (табл.2.3).

Таблиця 2.3 – Тепловий баланс камерної печі

Статті приходу тепла	Величина	Статті витрати тепла	Величина
Тепло, отримане від горіння палива, ккал/год (%)	660387 (93,20)	Кількість тепла, витраченого на нагрів металу, ккал/год (%)	131040 (18,50)
Тепло, яке вноситься з повітрям, ккал/год (%)	23511 (3,30)	Тепло, акумульоване кладкою, ккал/год (%)	158954 (22,40)
		Втрати тепла зовнішньої поверхні печі, ккал/год(%)	56418 (8,00)
Тепло екзотермічних реакцій, ккал/год (%)	24570 (3,50)	Тепло, витрачене на нагрів транспортуючих пристроїв, ккал/год (%)	21344 (3,00)
		Втрати тепла з відхідними газами, ккал/год (%)	267163 (37,70)
		Невраховані втрати, ккал/ч (%)	73551 (10,40)
Всього, Гкал/год (%)	0,708 (100,0)	Всього, Гкал/год (%)	0,708 (100,00)

Аналіз зведеної таблиці теплового балансу дозволяє визначити основні втрати теплової енергії з робочої зони печі і запропонувати шляхи усунення цих недоліків, які будуть розглядатися у наступному розділі.

## 3 ЗАХОДИ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

### 3.1 Обґрунтування теплоізоляції тигельної печі

Ефективність обладнання визначається рівнем витрат на експлуатацію обладнання за умови досягнення необхідної якості продукції. Витрати на термообробку складаються з безлічі факторів: втрати тепла через бічні стінки печі, ефект акумуляції тепла футеровкою, витрати на періодичний ремонт і т.д. Що стосується футерування печей, то в багатьох промислово розвинених країнах цегляна вогнетривка кладка застосовується тільки в тих місцях, де її застосування незамінне, наприклад, в місцях контакту футерування з рідким металом [15]. У таких випадках за вогнетривкою кладкою слідує пористі і волокнисті вогнетривкі матеріали. Тому замінити цегляну кладку на іншу неможливо, проте для зниження витрат енергії пропонується зробити додатковий шар теплоізоляції волокнистого мату CONLIT MAT (PRO ROX WM950 ALU) ROCKWOOL [16].

Безумовною перевагою волокнистих і пористих футерувальних матеріалів є: низька теплопровідність (в 3-5 разів нижче деяких марок шамотних вогнетривів), термічна стійкість, висока пористість в поєднанні з низькою щільністю і малою теплоємністю.

Досвід виготовлення, монтажу та експлуатації печей в різних галузях промисловості показує, що застосування футеровок з волокнистих матеріалів дозволяє скоротити трудові витрати на монтаж в 2-3 рази; зменшити матеріаломісткість конструкцій печей, тобто скоротити витрату вогнетривів в 5-6 разів і масу металокаркасів на (15...20) %; скоротити витрату палива і електроенергії в печах періодичної дії на (25...30) %, підвищити продуктивність теплових агрегатів періодичної дії на (15...20) % завдяки більш швидкому розігріву і охолодженню.

На основі аналізу роботи футеровок, витрат тепла, градієнтів в стінці



печі виведено емпіричне правило, за яким футерування повинно бути обраним таким, щоб температура на зовнішній поверхні печі становила близько 10 % від температури на внутрішній поверхні печі. При менших значеннях погіршується стійкість футеровки, при великих – збільшуються втрати тепла [15].

### 3.1.1 Розрахунок теплових втрат через футеровку печі

Розрахунок виконуємо за припущень, що використовувались в розділі.

Опір додаткового шару теплоізоляції,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$

$$R_{\text{дод}} = \frac{\delta_{\text{дод}}}{\lambda_{\text{дод}}}, \quad (3.1)$$

де  $\delta_{\text{дод}}$  – товщина шару теплоізоляції, приймаємо 0,07м;

$\lambda_{\text{дод}}$  – коефіцієнт теплопровідності обраного шару теплоізоляції,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ .

Коефіцієнт теплопровідності волокнистого мату CONLIT MAT (PRO ROX WM950 ALU) ROCKWOOL,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ , залежить від температури, і приведений в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Теплопровідність волокнистого мату CONLIT MAT (PROROX WM950 ALU) ROCKWOOL [16]

T, °C	50	100	150	200	250	300	350	400	500	600	640
$\lambda$ , Вт/м·К	0,039	0,045	0,053	0,062	0,072	0,084	0,097	0,112	0,146	0,192	0,213

Числовий ряд теплопровідності волокнистого мату CONLIT MAT (PRO ROX WM950 ALU) ROCKWOOL відповідає залежності вигляду:

$$\lambda_{\text{дод}} = 0,0345 \cdot e^{0,0029 \cdot t} \quad (3.2)$$

Коефіцієнт теплопровідності волокнистого мату CONLIT MAT (PRO ROX WM950 ALU), в холодному стані приймаємо 0,039 Вт/(м · °С).

Опір додаткового шару теплоізоляції,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$

$$R_{\text{дод}} = \frac{0,07}{0,039} = 1,794 .$$

Отже, тепловий опір всієї стінки,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$

$$R_0 = R_{0\text{ш}} + R_{0\text{асб}} + R_{0\text{дод}} \quad (3.3)$$

$$R_0 = 0,284 + 2,5 + 1,794 = 4,578 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}.$$

Знаходимо температуру на межі розділу шарів, °С

$$t_{\text{асб-дод}} = t_{\text{зов}} + (t_{\text{кл}} - t_{\text{зов}}) \cdot \frac{R_{0\text{абс+ш}}}{R_0}; \quad (3.4)$$

$$t_{\text{асб-дод}} = 70 + (800 - 70) \cdot \frac{2,784}{4,578} = 513,93;$$

$$t_{\text{ш-асб}} = t_{\text{зов}} + (t_{\text{кл}} - t_{\text{зов}}) \cdot \frac{R_{0\text{асб}}}{R_0}; \quad (3.5)$$

$$t_{\text{ш-асб}} = 70 + (800 - 70) \cdot \frac{2,5 + 1,794}{4,578} = 754,71.$$

Середня температура шарів, °С

$$\overline{t}_{\text{дод}} = (t_{\text{кл}} + t_{\text{асб-дод}}) \cdot 0,5; \quad (3.6)$$

$$\overline{t}_{\text{ш}} = (t_{\text{кл}} + t_{\text{ш-асб}}) \cdot 0,5; \quad (3.7)$$

$$\overline{t}_{\text{абс}} = (t_{\text{абс-дод}} + t_{\text{ш-асб}}) \cdot 0,5; \quad (3.8)$$

$$\overline{t}_{\text{дод}} = (70 + 513,93) \cdot 0,5 = 291,965;$$

$$\overline{t}_{\text{ш}} = (800 + 754,71) \cdot 0,5 = 777,355;$$

$$\overline{t}_{\text{абс}} = (513,93 + 754,71) \cdot 0,5 = 634,32.$$

Коефіцієнти теплопровідності в гарячому стані:

шамотної цегли за формулою (2.6), Вт/ (м · °С)

$$\lambda_{\text{ш}} = 0,88 + 0,00023 \cdot 777,355 = 1,059$$

асбоплити за формулою (2.7), Вт/ (м · °С)

$$\lambda_{\text{асб}} = 0,048 + 0,00014 \cdot 634,32 = 0,136;$$

волокнистого мату за формулою (3.2), Вт/ (м · °С)

$$\lambda_{\text{асб}} = 0,0345 \cdot e^{0,0029 \cdot 291,965} = 0,08.$$

Щільність теплового потоку через стінку, Вт/м<sup>2</sup>

$$q = \frac{t_{\text{кл}} - t_{\text{зов}}}{\frac{\delta_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ш}}} + \frac{\delta_{\text{асб}}}{\lambda_{\text{асб}}} + \frac{\delta_{\text{дод}}}{\lambda_{\text{дод}}}}; \quad (3.9)$$

$$q = \frac{800 - 70}{\frac{0,25}{1,059} + \frac{0,12}{0,136} + \frac{0,07}{0,08}} = 366,195.$$

Знаходимо уточнене значення температур на межах розділу шарів футеровки за формулою (2.13), °С

$$t_{\text{ш-асб}} = 800 - 366,195 \cdot 0,284 = 696.$$

Уточнюємо значення температур на зовнішній поверхні стінки за формулою (2.14), °С

$$t_{\text{зов}} = 20 + \frac{366,195}{14,2} = 45,79.$$

Знаходимо уточнене значення температур на межах розділу шарів футеровки, °С

$$t_{\text{дод-асб}} = t_{\text{зов}} + q \cdot \frac{\delta_{\text{дод}}}{\lambda_{\text{дод}}}; \quad (3.10)$$

$$t_{\text{дод-асб}} = 45,79 + 366,195 \cdot 1,794 = 702,74.$$

Визначаємо уточнене значення середніх температур шарів і їх коефіцієнтів

теплопровідності:

$$\bar{t}_{\text{ш}} = (800 + 702,74) \cdot 0,5 = 751,37 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{\text{ш}} = 0,88 + 0,00023 \cdot 751,37 = 1,053 \text{ Вт/ (м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)};$$

$$\bar{t}_{\text{асб}} = (696 + 702,74) \cdot 0,5 = 699,37^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{\text{асб}} = 0,048 + 0,00014 \cdot 699,37 = 0,1459 \text{ Вт/ (м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)};$$

$$\bar{t}_{\text{дод}} = (45,79 + 696) \cdot 0,5 = 370,895^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{\text{дод}} = 0,0345 \cdot e^{0,0029 \cdot 370,895} = 0,101 \text{ Вт/ (м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}.$$

Знайдемо уточнене значення щільності теплового потоку через стінку,  
Вт/м<sup>2</sup>

$$q' = \frac{800 - 45,79}{\frac{0,25}{1,053} + \frac{0,12}{0,1459} + \frac{0,07}{0,101}} = 430,264.$$

Уточнюємо  $\alpha_2$ , Вт/ (м · °C)

$$\alpha_2 = 10 + 0,06 \cdot 45,79 = 12,75.$$

Тепловий потік від стінки в навколишнє середовище за формулою (2.16),  
Вт / м<sup>2</sup>

$$q' = 12,75 \cdot (45,79 - 20) = 328,755.$$

Тоді розбіжність за формулою (2.17), %

$$\Delta q = \frac{430,264 - 328,755}{430,264} \cdot 100\% = 23,6.$$

Оскільки розбіжність становить більше 5 %, то необхідне уточнення температур і матеріалів вогнетривів. Уточнюємо значення температур на зовнішній поверхні стінки за формулою (2.14), °C

$$t_{\text{зов}} = 20 + \frac{430,264}{12,75} = 53,74.$$

Знайдемо уточнене значення щільності теплового потоку через стінку, Вт/м<sup>2</sup>

$$q' = \frac{800 - 53,74}{\frac{0,25}{1,053} + \frac{0,12}{0,1459} + \frac{0,07}{0,101}} = 425,709.$$

Уточнюємо  $\alpha_2$ , Вт/ (м · °C)

$$\alpha_2 = 10 + 0,06 \cdot 53,74 = 13,2244.$$

Тепловий потік від стінки в навколишнє середовище за формулою (2.16), Вт / м<sup>2</sup>

$$q'' = 13,2244 \cdot (53,74 - 20) = 446,19.$$

Тоді розбіжність за формулою (2.30), %

$$\Delta q = \frac{446,19 - 425,709}{446,19} \cdot 100\% = 4,59.$$

Оскільки розбіжність становить менше 5 %, то подальше уточнення не потрібно.

Тепловий потік через стінку за формулою (2.19), якщо площа зовнішньої поверхні печі  $F = 28,27 \text{ м}^2$ , Вт

$$Q' = 425,709 \cdot 28,27 = 12034,79.$$

Зниження теплового потоку через стінку при додатковому шарі волокнистого мату, %

$$\delta Q = \frac{Q - Q'}{Q} \cdot 100\%; \quad (3.11)$$

$$\delta Q = \frac{14220,178 - 12034,79}{14220,178} \cdot 100\% = 15,4.$$

3.1.2 Визначення кількості теплоти, переданої теплопровідністю через подину печі

Приймаємо, що подину печі також вкриваємо додатковим шаром волокнистого мату, отже, щільність теплового потоку від подини в навколишнє середовище буде дорівнювати щільності теплового потоку від стінок в навколишнє середовище, з урахуванням коефіцієнта 0,7 і, отже,  $\text{Вт} - \text{м}^2$

$$q'' = 13,2244 \cdot 0,7 \cdot (53,74 - 20) = 312,334.$$

Тоді розбіжність, %

$$\Delta q = \frac{425,709 - 319,334}{425,709} \cdot 100\% = 26,63.$$

Тоді задаємося іншою температурою, приймаємо  $t_{зов\ под.} = 60$  °С. Знайдемо уточнене значення щільності теплового потоку через стінку, Вт/м<sup>2</sup>

$$q' = \frac{800 - 60}{\frac{0,25}{1,059} + \frac{0,12}{0,136} + \frac{0,07}{0,08}} = 371,859.$$

Уточнюємо  $\alpha_2$ , Вт/ (м · °С)

$$\alpha_2 = 10 + 0,06 \cdot 60 = 13,6.$$

При цьому тепловий потік від подину в навколишнє середовище, Вт / м<sup>2</sup>

$$q'' = 13,6 \cdot 0,7 \cdot (60 - 20) = 380,8.$$

Тоді розбіжність, %

$$\Delta q = \frac{371,859 - 380,8}{471,859} \cdot 100\% = - 2,4.$$

Отже перерахунок робити непотрібно.

Тепловий потік через подину площею  $F = 7,068$  м<sup>2</sup> за формулою (2.35), Вт

$$Q' = 380,8 \cdot 7,068 = 2691,49.$$

Зниження теплового потоку через подину при додатковому шарі волокнистого мату за формулою (3.10),



$$\delta Q = \frac{3513,086 - 2691,49}{3513,086} \cdot 100\% = 23,39.$$

3.1.3 Визначення кількості теплоти, яку переносять теплопровідністю через кришку

На кришку додаткову теплоізоляцію не встановлюємо, тому перерахунок не проводимо.

Тепловий потік через кришку, Вт

$$Q_{кр} = 883,84.$$

3.1.4 Теплові втрати випромінюванням

Величина результуючого потоку випромінюванням та дійсний променистий потік залишаються без змін, Вт

$$Q_1 = 10518,79.$$

3.1.5 Втрати на теплові замикання

Втрати на теплові замикання приймаються рівними 70 % від втрат теплопровідністю через всі поверхні за формулою (2.27), Вт

$$Q_{кз} = 0,7 \cdot (12,035 + 2,691 + 8,832) = 16,49.$$

3.1.6 Витрати енергії на розплавлення і перегрів

Корисна енергія, Вт

$$Q_{\text{кор}} = 75,28 .$$

Загальні втрати за формулою (2.29), Вт

$$Q_{\text{заг}} = 75,28 + 12,035 + 2,691 + 8,832 + 10,519 + 18,595 = 120,88.$$

Тепловий коефіцієнт корисної дії за формулою (2.30), %

$$\eta_T = 75,28 / 120,88 \cdot 100\% = 62,27 .$$

Результати розрахунку енергетичного балансу тигельної печі опору представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Енергетичний баланс печі СМТ з ізоляцією

Стаття приходу	кВт	%	Стаття витрати	кВт	%
Теплота, що вноситься в піч	120,88	100	Теплота на розплавлення і перегрів металу	75,28	62,27
			Втрати теплоти теплопровідністю		
			а) через стінки	12,035	9,96
			б) через подину	2,691	2,23
			в) через кришку	8,832	7,31
			Втрати теплоти випромінюванням	10,519	8,7
			Втрати на теплові короткі замикання	18,595	15,38
Разом	120,88	100	Разом	120,88	100

Втрати енергії через подину та стінки становлять 14,726 кВт або 12,19 %.

Зниження загального теплового потоку при додатковому шарі волокнистого мату за формулою (3.11), %

$$\delta Q = \frac{130,959 - 120,88}{130,959} \cdot 100\% = 8,98.$$

Враховуючи постійний режим роботи печі СМТ розрахуємо річне споживання електроенергії, кВт · год

$$W_{P \text{ баз}} = P \cdot T, \quad (3.12)$$

де  $P$  – електрична потужність печі, кВт;

$T$  – приведений час використання максимальної потужності, год., приймаємо 6000 год.

$$W_{P \text{ баз}} = 200 \cdot 6000 = 1200000.$$

При використанні автоматичного регулювання потужності печі від температури розчину, потужність печі буде знижуватись і зниження річного споживання електроенергії можна оцінити, кВт · год

$$W_p = W_{P \text{ баз}} \cdot \left(1 - \frac{\delta Q}{100\%}\right); \quad (3.13)$$

$$W_p = 1200000 \cdot \left(1 - \frac{8,98}{100\%}\right) = 1092240.$$

Економія електроенергії за рік складає, кВт · год

$$\Delta W = W_{p \text{ баз}} - W_p ; \quad (3.14)$$

$$\Delta W = 1200000 - 1092240 = 107760 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

### 3.2 Заміна теплоізоляції камерної печі

У камерній печі, яка встановлена на ТОВ «ЗТМК» використані такі вогнетривкі матеріали як динасова та шамотна цегла. Однак ці матеріали вже є неефективними, до того ж оскільки вони жодного разу не змінювались впродовж всього використання печі, тому більшість цегли має тріщини та інші недоліки.

Найбільш ефективною є волокниста футеровка, до того ж вона зменшить об'єм футерування у декілька разів. Тому найбільшого поширення набули саме волокнисті матеріали.

Волокнисті вироби поєднують в собі високі теплоізоляційні властивості і зручність застосування у вигляді гнучких матів, листів, войлоків, тканин. Вони мають більш високі механічні характеристики в порівнянні з порошковими і іншими пористими матеріалами однаковою об'ємної щільності.

Найбільш поширеними у сфері термічного обладнання стали теплоізоляційні матеріали на основі керамічного волокна, люмосилікатних волокон і неорганічних сполучень у вигляді модифікованих гідрозолей. Всі вони в основі містять штапельне волокно (крім тканин), проте відрізняються методами подальшої обробки.

В ході реконструкції футеровка існуючої печі була замінена на сучасні системи теплоізоляції. Бічні стіни і склепіння печі були виконані волокнистим матеріалом у вигляді розкатаних керамічних рулонів (матеріал нового покоління, який поєднує в собі високотемпературні, вогнетривкі та ізоляційні властивості, низьку теплопровідність і малоінерційність).

При виборі ізоляційного матеріалу були враховані такі фактори як максимальна температура печі з висувним подом (1100 °С), стійкість до частого

нагріву та охолодження, тиск який може витримати під час роботи, а також зручний монтаж.

Характеристики обраних волокнистих матеріалів представлено в таблиці 3.3 [19, 20].

Таблиця 3.3 Характеристика обраних волокнистих матеріалів

Матеріал	Плита МКРГП О-650	Плита ШВП-350	Плита ШПГТ-450	Блок БВ-300	Блок ТБКВ
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	0,28	0,29	0,25	0,24	0,22
Теплоємність, Дж/(кг·К)	1000	900	1000	900	900
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	650	350	450	240	180

Волокнисті керамічні вогнетривкі футеровки забезпечують гнучкий режим роботи - пуск і зупинку печі без шкоди для її стійкості, швидкий розігрів до робочої температури на максимальній потужності. Забезпечується прекрасна керованість температурою в печі при ручному і автоматичному управлінні. При застосуванні цієї футеровки значно зменшуються габарити печі.

Переваги керамічного вогнетривкого матеріалу:

- низька теплопровідність;
- стійкість проти теплових шоків;
- немає необхідності в сполучних матеріалах;
- легко і швидко ремонтується;
- відмінна термостійкість, зберігає свої властивості при багаторазовому нагріванні;
- швидкий монтаж здійснюється за допомогою блоків і кріплення з окалиностійкої сталі.

Особливо ефективним є застосування волокнистих матеріалів в термічних печах періодичної дії, а також в печах, що працюють з так званим «рваним циклом» експлуатації. На акумуляцію тепла кладкою може затратитися до (20...25) % тепла на відміну від печей зі стаціонарним режимом роботи.

Розрахуємо зменшення теплових втрат при застосуванні нових теплоізоляційних матеріалів.

При поперечному обтіканні циліндра газовим потоком Міхєєвим М.А. рекомендуються формули для визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі [3, 13, 15]:

– для потоків з числом Рейнольдса  $Re_{\text{п}}$  від 10 до 1000

$$Nu_{\text{п}} = 0,5 \cdot Re_{\text{п}}^{0,5} \cdot Pr_{\text{п}}^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr_{\text{п}}}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25}; \quad (3.15)$$

– для потоків з числом Рейнольдса  $Re_{\text{п}}$  від 1000 до  $2 \cdot 10^5$

$$Nu_{\text{п}} = 0,25 \cdot Re_{\text{п}}^{0,5} \cdot Pr_{\text{п}}^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr_{\text{п}}}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25}. \quad (3.16)$$

Тут величина з індексом «п» відноситься до температури потоку, а величина з індексом «ст» до температури стінки.

Вихідні дані для розрахунку:  $\lambda_{\text{сталі}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $C = 614 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $t_{\text{пов.в.}} = 960 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\rho_{\text{в}} = 7920 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $C_{\text{нп}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$ ,

де,  $C_{\text{нп}}$  – постійна швидкість нагріву виливка;

$t_{\text{пов.в.}}$  – кінцева температура поверхні виливка;

$\rho_{\text{в}}$  – щільність сталі;

$\lambda_{\text{сталі}}$  – коефіцієнт тепловіддачі сталі;

$t_0$  – початкова температура поверхні виливка;

$C$  – теплоємність сталі.

Розрахуємо  $\alpha$  (коефіцієнт тепловіддачі) для печі з викатним подом ТОВ «ЗТМК» за наступними даними: швидкість диму 6,3 м/с; довжина печі  $L = 4,18 \text{ м}$ ; висота печі  $H = 3,353 \text{ м}$ .

У відповідності з даними при температурі  $925 \text{ }^\circ\text{C}$  значення теплофізичних властивостей диму складають: коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu_{\text{д}} = 174,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{\text{д}} = 10,8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ; критерій Прандтля  $Pr_{\text{д}} = 0,581$ .

Отже число Рейнольдса буде дорівнювати

$$Re = \frac{W_{\text{д}} \cdot l \cdot 10^6}{\nu_{\text{д}}}, \quad (3.17)$$

де  $l$  висота внутрішньої частини камери печі,  $l = 2,11$  м.

$$Re = \frac{6,3 \cdot 2,11 \cdot 10^6}{174,3} = 7,63 \cdot 10^4.$$

Значення коефіцієнта  $Nu$  визначається за формулою (3.16)

$$Nu = 147,5, \alpha_k = 16,77.$$

Розрахуємо коефіцієнт тепловіддачі від середовища камери печі до стінки [15, 21, 22], Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_d \cdot Nu}{l}. \quad (3.18)$$

$$\alpha_1 = \frac{10,8 \cdot 10^{-2} \cdot 147,5}{2,11} = 7,55.$$

Проведемо розрахунки втрат теплоти при початкових умовах (коли футерування печі складається з двох шарів: шамоту та динасу).

Розрахуємо коефіцієнт теплопередачі стінок печі, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3.19)$$

де  $\delta_1$  – товщина шамотної цегли, 0,3 м;

$\delta_2$  – товщина динасової цегли, 0,115 м;

$\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності шамотної цегли, 1,13 Вт/(м·К);

$\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності динасової цегли, 1,3 Вт/(м·К);

$\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі від динасової цегли у зовнішнє середовище, для повітря 22 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$$k = \frac{1}{\frac{1}{7,55} + \frac{0,35}{1,13} + \frac{0,115}{1,3} + \frac{1}{22}} = 1,26.$$

Кількість теплоти втрачену через футерування знайдемо за формулою, Вт

$$Q = k \cdot F_{\text{пов}} \cdot (t_1 - t_2), \quad (3.20)$$

де  $F_{\text{пов}}$  – площа зовнішньої поверхні печі, м;

$t_1, t_2$  – температура всередині печі та зовні.

$$Q = 1,02 \cdot 108,03 \cdot (925 - 20) = 109499.$$

Розрахуємо теплові втрати при встановленні нових теплоізоляційних матеріалів (для БВ-300).

Розрахуємо коефіцієнт теплопередачі стінок печі, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{7,55} + \frac{0,125}{0,22} + \frac{0,115}{1,3} + \frac{1}{22}} = 0,93,$$

де  $\delta_1$  – товщина войлокових керамоблоків (для БВ-300) 0,25 м;

$\delta_2$  – товщина динасової цегли, 0,115 м;

$\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності керамоблоків, 0,21 Вт/(м·К);

$\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності динасової цегли, 1,3 Вт/(м·К);

$\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі від динасової цегли у зовнішнє середовище, для повітря 22 Вт/(м·К).

Кількість теплоти втрачену через нове футерування знайдемо за формулою, Вт

$$Q = 0,82 \cdot 108,03 \cdot (925 - 20) = 83704,7.$$

Тобто теплові втрати при встановленні нових теплоізоляційних матеріалів зменшаться на 15 %.

Аналогічним чином розрахуємо зменшення теплових втрат та економію палива для кожного обраного матеріалу за один цикл, результати представлені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Ефект від зміни теплоізоляції

Показники	Плита МКРГПО-650	Плита ШВП-350	Плита ШПГТ-450	Блок БВ-300	Блок ТБКВ
Зменшення теплових втрат, Вт	15762,5	20342	28277,7	25794,3	32262,9
Економія палива, %	11,97	13,8	16,6	15	18



## ВИСНОВКИ

1. У роботі виконано аналіз шляхів покращення роботи енергетичного обладнання промислового підприємства.

2. Розраховано енергетичний баланс тигельної печі опору. Втрати енергії в печі опору через стінку та подину складають 13,54 %. Забезпечити підтримку температурного режиму технологічного процесу з мінімальними просадками температури при довантаженні сировини можливо при додатковій теплоізоляції основного обладнання. Обґрунтовано застосування волокнистого мату CONLIT MAT (PRO ROX WM950 ALU) ROCKWOOL товщиною 70 мм для термоізоляції обладнання з метою зниження втрат енергії через футеровку. Для печі зниження втрат призводить до зниження загального теплового потоку на 8,98%.

3. Виконано розрахунок теплового балансу камерної нагрівальної печі цього ж підприємства. Запропоновано замінити теплоізоляційні матеріали камери печі, що дозволить значно зменшити теплові втрати через кладку печі, істотно полегшити навантаження на каркас печі та зменшити витрату палива на (12...18) %. Розрахований економічний ефект від заміни футерування свідчить про доцільність впровадження запропонованих заходів.

## 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> – 13.05.23 р. – 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) – 13.05.23 р. – 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> – 13.05.23 р. – Загол. з екрану.
4. Організаційна структура управління енергогосподарством підприємства [Електронний ресурс] / Студопедія. – Режим доступу : \WWW/ URL: [https://studopedia.su/5\\_17720\\_organizatsiy-na-struktura-upravlinnya-energogospodarstvom-pidpriemstva.html](https://studopedia.su/5_17720_organizatsiy-na-struktura-upravlinnya-energogospodarstvom-pidpriemstva.html) – 13.05.23 р. – Загол. з екрану.
5. Організаційна структура управління: типи і характерні особливості [Електронний ресурс] / Навчальні матеріали онлайн. – Режим доступу : \WWW/ URL: <https://pidruchniki.com/15880315/menedzhment/organizatsiy-na-struktura-upravlinnya-tipi-harakterni-osoblivosti> – 13.05.23 р. – Загол. з екрану.
6. Технологія виробництва [Електронний ресурс] / Запорожский титано-магниеый комбинат. – Режим доступа : \WWW/ URL: <http://ztmc.zp.ua/ru/o-kombinate/tekhnologiya-proizvodstva> – 13.05.23 г. – Загол. с экрана.
7. Иссерлин, А. С. Основы сжигания газового топлива [Текст] : справочное пособие / А. С. Иссерлин. – Л. : Недра, 1987. – 336 с. – Библиогр. : с. 332-334. – ISBN 5-1238319.

8. Губинский, В. И. Нагревательные печи металлургии – сегодня и завтра [Текст] / В. И. Губинский // Теория и практика металлургии. – 2004. – № 6 (20). – С. 56-60.

9. Свинолобов Н.П. Печи черной металлургии: Учебное пособие для вузов./ Н.П. Свинолобов, В.Л. Бровкин – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 154 с.

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

11. Кривандин В. А. Металлургические печи/ В. А. Кривандин, Н. Г. Молчанов: М.: Высшая школа. – 1962. – 600 с.

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

13. Гусовский В. Сожигательные устройства нагревательных и термических печей. Справочник. В. А. Гусовский, А. Е. Лифшиц. - М.: Металлургия, 1981. – 272 с.

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

15. Цыганков Г.Т. Повышение эффективности использования топлива при сжигании газов в печах / Г.Т. Цыганков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1990. - №2. – С.56-58.

16. Губинский В. И. Теория пламенных печей / В. И. Губинский, Лу Чжун-У. – М.: Машиностроение, 1995. – 256с.

17. Парсункин Б.Н. Оптимальный режим использования топлива при энергосберегающем нагреве / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, А.В. Комаров // Изв. ВУЗ. ЧМ. – 2004.-№12.-С. 48-53.

19. Тайц Н. Ю.Технология нагрева стали /Н.Ю. Тайц. – М.: Металлургия, 1962. – 568 с.

19. Ревун М.П. Перспективные направления совершенствования тепловой работы нагревательных и термических камерных печей / М.П. Ревун, В.Ю. Зинченко // Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов НМетАУ. - 2006. - № 6. - С.294-302.

20. Оснос С.П. Применение современных волокнистых теплоизоляционных и огнеупорных материалов в тепловых агрегатах и сооружениях/ С.П.Оснос, О.И.Гололобов // Строительные материалы и изделия.– 2000.–№11.– С. 120-125.

21. Братута Е.Г. Пористі теплоізоляційні матеріали: [монографія] / Е.Г.Братута, А.М. Павленко, А.В. Кошлак, О.В. Круглякова. – Х.: ТОВ «ЕДЕНА», 2010. – 107 с.

22. Shay M.A. Optimizing reheat furnace combustion systems / M.A.Shay // IronandSteelEngineer. – 1989. – №5. – P.35-37.