

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ІНЖЕНЕРНО – ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

«На правах рукопису»

УДК 66.041.491

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Гондляр О.В.
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2019 р.

МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ

На здобуття ступеня магістра

зі спеціальності *133 – ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ*

на тему: Підвищення теплової енергоефективності обертової печі під час прожарювання вуглецевих матеріалів

Виконав: студент 2 курсу, групи ЛП-71мн
(шифр групи)

Єфименко Євген Андрійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник к.т.н., Лелека С.В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з математичного моделювання
д.т.н., проф. Карвацький А.Я. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ІНЖЕНЕРНО – ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Гондляр О.В.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2019 р

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Сфименку Євгену Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Підвищення теплової енергоефективності обертової печі під час прожарювання вуглецевих матеріалів

науковий керівник дисертації Лелека Сергій Володимирович
к.т.н.

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

затвержені наказом по університету від «13» березня 2019 р. № 881-с

2. Строк подання студентом дисертації: 16 травня 2019 р.

3. Об'єкт дослідження: процес прожарювання вуглецевого матеріалу в обертових печах

4. Предмет дослідження: енергетичні показники роботи та термомеханічний стан обертових печей прожарювання

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: розглянути сучасний стан прожарювання вуглецевого матеріалу та технічні характеристики обертових печей, розглянути методику дослідження, застосувати задачі теплопровідності та статичної термопружності, провести натурні та чисельні дослідження, розробити чисельну модель та верифікувати її, адаптувати технічні рішення з рекуперації теплоти кожуха та вихідного матеріалу з урахуванням

особливостей роботи обертових печей, розробити розрахункові моделі для визначення раціональних характеристик технічних рішень, розробити розрахункову модель на базі програмного забезпечення ANSYS, VESNA або ABAQUS, яка опише запропоновані технічні рішення, перевірити вплив технічних рішень на теплоенергетичний стан печі

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: плакати, що включають: загальну характеристику дисертації, постановку задачі теплопровідності та статичної термопружності, результати експериментальних досліджень, ескізи запропонованих технічних рішень, методика розрахунку генерації синтез-газу, тепловий та напружено-деформований стан обертової печі прожарювання.

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття у науковому фаховому виданні України, патент України на корисну модель, дві тези доповіді на науково-технічних конференціях

8. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літературних і патентних джерел з проблематики дисертації. Формулювання завдань досліджень.	31.12.17	
2	Розробка математичної моделі. Обробка експериментальних даних.	13.03.18	
3	Вибір та обґрунтування програмного забезпечення. Підготовка тез на конференцію.	31.05.18	
4	Аналіз отриманих результатів. Верифікація чисельної моделі.	05.10.18	
5	Аналіз ефективних технічних рішень, щодо рекуперації теплоти	24.10.18	
6	Числовий розрахунок технічних рішень	20.11.18	
7	Підготовка розділів 1-4 дисертації	31.11.18	
8	Оцінення впливу технічних рішень на термомеханічний стан печі	31.12.18	
9	Підготовка стартап проекту, охорони праці	28.02.19	
10	Підготовка розділу 5 дисертації	31.03.19	
11	Підготовка розділу 6-7 дисертації, формулювання висновків	20.04.19	
12	Оформлення дисертації	10.05.19	

Студент

(підпис)

С.А. Єфименко

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

С.В. Лелека

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

УДК 66.041.491

Магістерська дисертація на тему: «Підвищення теплової енергоефективності обертової печі під час прожарювання вуглецевих матеріалів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Керівник – Лелека С.В. – К., 2019. – 143 с.: іл. – 60. Виконавець – Єфименко Є.А. – Бібліогр.: 37 п.

Дисертація складається з переліку умовних позначень, вступу, семи розділів, висновків, переліку посилань та додатків. Повний обсяг роботи становить 143 сторінки, 60 рисунки, 36 таблиць і перелік посилань з 37 найменувань.

Об'єкт дослідження – процес прожарювання вуглецевого матеріалу в обертових печах.

Предмет дослідження – енергетичні показники роботи та термомеханічний стан обертових печей прожарювання.

Мета дослідження – розробка наукових основ та перевірки технічних рішень спрямованих на підвищення енергоефективності обертових печей.

У роботі представлено результати експериментальних та числових досліджень обертової печі прожарювання. На основі чисельного моделювання вибрані раціональні технічні рішення щодо рекуперації теплоти з відхідного матеріалу та поверхні кожуха печі. Оцінено тепломеханічний вплив технічних рішень на обертову піч прожарювання.

Матеріали магістерської дисертації викладено у 4 публікаціях (науковому фаховому виданні України, 2х тезах доповідей на конференціях, 1 патенті України на корисну модель).

Ключові слова: обертова піч, рекуперація теплоти, генерація синтез-газу, термомеханічний стан.

ABSTRACT

UDC 66.041.491

Master's dissertation on the theme: "Improvement of the thermal energy efficiency of a rotary kiln when calcinating carbon materials" / KPI them. Igor Sikorsky; Leader Leleka S.V. – K., 2019. – 143 ps.: ill. – 60. Executor Yefimenko Y.A. Bibliog: 37 r.

The dissertation consists of a list of symbols, an introduction, seven sections, conclusions, a list of references and applications. The full volume of work consists of 143 pages, 60 drawings, 36 tables and a list of references from 37 names.

The object of the research is the process of calcining carbon material in rotary kilns.

Subject of the research is an energy performance and thermomechanical state of rotary furnaces of calcining.

The purpose of the research is to develop scientific bases and check technical decisions aimed at increasing the energy efficiency of rotary kilns.

The paper presents the results of experimental and numerical studies of a rotary kiln of calcining. On the basis of numerical modeling, rational technical solutions are chosen for heat recovery from the waste material and the surface of the furnace casing. The thermomechanical influence of technical solutions on a rotary furnace of calcining is estimated.

The materials of the master's dissertation are presented in 4 publications (1 scientific professional editions of Ukraine, 2 theses of reports at conferences, 1 patent of Ukraine on utility model).

Keywords: survivor, period of heat, generation of synthesis-gas, thermomechanical state.

РЕФЕРАТ

УДК 66.041.491

Магистерская диссертация на тему: «Повышение тепловой энергоэффективности вращающейся печи при прокаливании углеродистых материалов» / КПИ им. Игоря Сикорского; Руководитель – Лелека С.В. – К., 2019. – 143 с.: ил. – 60. Исполнитель – Ефименко Е.А. – Библиогр.: 37 п.

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, семи глав, заключения, списка ссылок и приложений. Полный объем работы составляет 143 страницы, 60 рисунков, 36 таблиц и список литературы из 37 наименований.

Объект исследования – процесс прокаливания углеродного материала во вращающихся печах.

Предмет исследования – энергетические показатели работы и термомеханическое состояние вращающихся печей прокаливания.

Цель исследования – разработка научных основ и проверки технических решений, направленных на повышение энергоэффективности вращающихся печей.

В работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований вращающейся печи прокаливания. На основе численного моделирования выбраны оптимальные технические решения по рекуперации теплоты с отходящего материала и поверхности кожуха печи. Оценено термомеханическое влияние технических решений на вращающуюся печь прокаливания.

Материалы магистерской диссертации изложены в 4 публикациях (1 в научном профессиональном издании Украины, 2 тезисов докладов на конференциях, 1 патенте Украины на полезную модель).

Ключевые слова: вращающаяся печь, рекуперация теплоты, генерация синтез-газа, термомеханическое состояние.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОЖАРЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ ТА ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ.....	14
1.1 Промисловий спосіб отримання вугільних та графітових електродів.	14
1.2 Конструкція обертової печі прожарювання	17
1.3 Режими роботи печі	20
1.4 Теплова характеристика роботи печей	23
1.5 Літературний огляд вирішуваного питання	25
1.6 Методи дослідження.....	37
1.6.1 Методика проведення високотемпературних досліджень.....	38
1.7 Висновки до розділу 1	41
2 МОДЕЛЬ НДС ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ З УРАХУВАННЯМ ТЕРМОСИЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ	43
2.1 Постановка задачі теплопровідності та статичної термопружності.....	43
2.2 Чисельна модель обертової печі прожарювання	48
3 НАТУРНІ ТА ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ	50
3.1 Експериментальні дослідження реального стану печі	50
3.2 Верифікація чисельної моделі	60
3.3 Тепловий стан печі прожарювання	61
3.4 Напружено-деформований стан печі прожарювання.....	63
3.5 Висновки до розділу 3	65
4 ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	67
4.1 Рекуперация теплоти відхідного матеріалу.....	67
4.1.1 Підігрів вторинного повітря в барабані-охолоджувачі.....	67
4.1.2 Утворення синтез-газу	71

					<i>ЛП71мн.021286.01-70ПЗ</i>							
Зм.	Лист	№ докцм.	Підпис	Дата	<i>Підвищення теплової енергоефективності обертової печі під час прожарювання вуглецевих матеріалів</i>			Літ.	Арк.	Акрушів		
Розроб.	Єфименко Є.									1		
Перевір.	Лелека С.В.							<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ</i>				
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.												

4.1.2.1 Зони газифікації.....	71
4.1.2.2 Розрахунки характеристик процесу газифікації	73
4.2 Рекуперація теплоти з поверхні кожуха обертової печі.....	82
4.2.1 Теплообмін між корпусом печі та навколишнім середовищем	82
4.2.2 Рекуперації теплоти з корпусу обертової печі прожарювання	84
4.3 Комплексне технічне рішення	89
4.4 Висновки до розділу 4	92
5 ТЕРМОМЕХАНІЧНИЙ СТАН ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ.....	93
5.1 Тепловий стан модернізованої печі прожарювання	94
5.2 Напружено-деформований стан модернізованої печі прожарювання.....	97
5.3 Висновки до розділу 5	102
6 ОХОРОНА ПРАЦІ	104
6.1 Повітря робочої зони	106
6.2 Виробничий шум та вібрації	106
6.3 Оберткові частини обладнання.....	107
6.4 Електробезпека.....	108
6.5 Пожежна безпека.....	109
6.6 Висновки до розділу 6	110
7 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	111
7.1 Опис та технологічний аудит ідеї проекту	111
7.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	113
7.3 Розроблення ринкової стратегії проекту	117
7.4 Розроблення маркетингової програми стартап проекту	119
7.5 Висновки до розділу 7	122
ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	125
ДОДАТКИ.....	129
ДОДАТОК А ПІДГРІВ ВТОРИННОГО ПОВІТРЯ В БАРАБАНІ	130
ДОДАТОК Б РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ГАЗИФІКАЦІЇ	132
ДОДАТОК В РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛОТИ З КОРПУСУ ПЕЧІ	142

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Умовні позначення

- q_v – густина внутрішнього джерела теплоти, Вт/м³;
- q – густина теплового потоку, Вт/м²;
- ρ – густина, кг/м³;
- σ_{eqvM} – еквівалентне напруження за Мізесом, Па;
- E – енергія активації утворення синтез-газу, Дж/моль;
- F_s – запас міцності матеріалу;
- ν – кінематична вязкість, м²/с;
- $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}^k$ – коваріантний і контраваріантний векторний базис, відповідно;
- C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт(м²·К⁴) ;
- μ – коефіцієнт Ламе, Па; динамічна в'язкість, Па·с;
- ν – коефіцієнт Пуасона;
- α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);
- u – компонента швидкості, м/с;
- ε_{ij} – компоненти тензора деформацій;
- E – модуль пружності під час розтягу, Па;
- V – об'єм, м³; швидкість, м/с;
- S – площа, м²;
- g – прискорення вільного падіння, м/с²;
- r – радіус, м;
- ΔT – різниця температур, К;
- Ω – розрахункова область;
- δ_{ij} – символ Кронекера;
- ε – ступінь чорноти;
- T – температура, К;
- $\hat{\sigma}$ – тензор напружень 2-го рангу, Па;

- $\hat{\varepsilon}$ – тензор сумарних пружних і температурних деформацій 2-го рангу;
 Q – тепловий потік, Вт;
 c – теплоємність, Дж/м³;
 λ – теплопровідність середовища (тіла), Вт/(м·К); коефіцієнт Ламе, Па;
 p – тиск, Па;
 R – універсальна газова стала, Дж/моль ;
 Nu – число Нусельта;
 n – число обертів, об/с;
 π – число Пі;
 Re – число Рейнольдса;

Основні скорочення

- ГУ – граничні умови;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
МСЕ – метод скінченних елементів;
НДС – напружено-деформований стан;

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток хімічної промисловості, промисловості чорних та кольорових металів та промисловості будівельних матеріалів є одним з найбільш пріоритетних напрямків розвитку України. За ситуації, що склалася в промисловості України на 2019 рік, а саме використанням на більшості діючих підприємствах, застарілого обладнання, раціональним шляхом розвитку промисловості є збільшення енергоефективності виробництва та пов'язане з цим підвищенням якості та зниженням собівартості продукції. При чому збільшення ефективності виробництва доцільно проводити як завдяки удосконалюванню діючих, так і завдяки створенню нових високоефективних технологій і устаткування. До такого високоенергоємного устаткування відносяться й обертові печі прожарювання барабанного типу, що використовуються в електродній (прожарювання коксу та антрациту), будівельній промисловості (прожарювання портландцементу).

Сучасні обертові печі оснащені різноманітними механізмами, в яких протікають складні фізико-механічні і теплові процеси. Тому сучасні промислові печі справедливо називати тепловими агрегатами. Теплова енергія, яка отримана шляхом горіння палива, передається матеріалу або виробам, які піддаються тепловій обробці.

Обертові печі прожарювання барабанного типу характеризуються незначним ККД. Високий рівень споживання палива під час випалу та постійне зростання цін на технологічне паливо є однією з головних причин економічної кризи, яку переживають практично всі діючі заводи України.

При річному виробництві портландцементу в Україні на рівні 13 млн тон витрата енергії тільки на випал клінкеру становить 85 млн ГДж або в перерахунку на природний газ становить понад 2,0 млрд. м³. При прожарюванні коксу та антрациту в обертових печах витрати природного газу менші, та все ж становлять близько 25 м³/т, що в річному еквіваленті складає близько 4 млн м³ тільки по одному електродному підприємстві. Такий стан питання змушує виробників

цементу шукати шляхи зниження енерговитрат на виробництво цементу, проводити реконструкцію технологічних ниток та/або шукати дешеві види місцевого палива, яким може бути кам'яне вугілля, торф і горючі відходи промисловості та життєдіяльності людини [10].

Саме тому дослідження, модернізація та удосконалення таких обертових печей з метою підвищення їхньої енергетичної ефективності є надзвичайно актуальною задачею розвитку промисловості України, яку можливо ефективно вирішити за допомогою математичного моделювання, що дозволяє реалізувати системний підхід до аналізу поведження машин і апаратів у різних експлуатаційних режимах і зробити вибір раціональних параметрів їхньої роботи, так як велика потужність, значні габарити, високі температури, обертання печі ускладнюють дослідження цих процесів в реальних виробничих умовах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування і в науково-дослідному центрі «Ресурсозберігаючі технології» (НДЦ «РТ») Інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні (Постанова Кабінету Міністрів (КМ) України від 24.12.2001 р, № 1716), Державної програми розвитку промисловості на 2003-2011 роки (Постанова КМ України від 28.07.2003 р, № 1174), а також відповідно з планом науково-дослідних робіт: в рамках держбюджетної НДР «Розробка енергоефективних технічних рішень з модернізації обертових печей електродного виробництва із частковою заміною природного газу на сингаз», № ДР 0119U100163; в рамках господарчого договору №804/1880272/04 «Автоматизація ротаційної печі прожарювання №5» від 01.03.2018; автор – співвиконавець тем.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка наукових основ та перевірки технічних рішень спрямованих на підвищення енергоефективності обертових печей. Для досягнення мети були сформовані наступні задачі:

1 Проаналізувати і узагальнити літературні дані з тепломеханічного стану обертових печей прожарювання базових конструкцій та за діючих технологічних

регламентів, обґрунтувати доцільність їх модернізації. Визначити основні статті енергетичних втрат в обертових печах.

2 Розробити технічні рішення зі зниження енергетичних втрат в обертових печах за допомогою їх утилізації та/або рекуперації.

3 Провести комп'ютерне моделювання розроблених технічних рішень та оцінити їх вплив на технологічні параметри роботи обертової печі прожарювання.

4 Розробити проект печі з підвищеною ефективністю завдяки впровадження запропонованих технічних рішень.

Об'єкт дослідження – процес прожарювання вуглецевого матеріалу в обертових печах.

Предмет дослідження – енергетичні показники роботи та термомеханічний стан обертових печей прожарювання.

Методи дослідження. Дослідження ґрунтуються на достовірних гіпотезах і адекватних математичних моделях, пов'язаних системах рівнянь механіки суцільного середовища, використання апробованого математичного апарату чисельних методів МСЕ, розроблених числових методиках, алгоритмах і ПЗ, використанні сучасної контрольної-вимірювальної апаратури і статистичних методів обробки даних експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів. В результаті виконання магістерської дисертації отримані такі наукові результати:

1 Теоретично встановлено, що основним чинником, який впливає на енергоефективність роботи обертових печей прожарювання вуглецевих матеріалів, є використання синтетичного газу, що генерується за рахунок теплоти відхідного (прожареного) матеріалу.

2 Створено наукові основи для комплексного дослідження механічного та теплового стану високотемпературних агрегатів із вирішенням проблеми пошуку раціональних режимів та конструктивних рішень.

3 Удосконалено методіку визначення напружено-деформованого стану за допомогою обчислення інтегрованого теплового потоку, який містить в собі усі складові теплообміну в просторі печі.

4 Отримано залежності енергетичної ефективності обертової печі залежно від частки синтетичного газу в паливі печі прожарювання сипких вуглецевих матеріалів.

Практичне значення отриманих результатів.

1 Експериментальним шляхом отримана залежність коефіцієнту тепловіддачі від температури поверхні корпусу діючої печі.

2 Запропоновано методику для визначення теплової енергії утворення синтез-газу за допомогою середовища Mathcad.

3 Розроблено розрахункову методику визначення оптимального зазору каркасу, щодо рекуперації теплоти з відхідним матеріалом.

4 Створено числову модель, що забезпечує дослідження стану обертових печей в процесі їх проектування та модернізації, та визначення доцільних технологічних параметрів експлуатації.

Особистий внесок автора. Усі загальні результати роботи одержані здобувачем. Результати розрахунків на всіх етапах роботи, виконаних у співавторстві, одержані при безпосередній участі здобувача.

Структура та обсяг дисертації. Магістерська дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Повний обсяг дисертації представлено на 143 сторінках і містить 60 рисунків (з них 2 рисунки повністю займають площу сторінки) та 36 таблиць.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОЖАРЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ ТА ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ

Як сказано вище, раціональним шляхом розвитку промисловості є збільшення енергоефективності виробництва за рахунок удосконалення діючих та створення нових високоефективних технологій та устаткування, до якого відноситься обертові печі прожарювання барабанного типу, які використовуються в електродній, будівельній промисловості.

1.1 Промисловий спосіб отримання вугільних та графітових електродів.

Вихідним матеріалом, сировиною, для отримання електродного графіту служать продукти нафтової і кам'яновугільної промисловості: піролізні і крекінгові нафтові кокси, пекові кокси, кам'яновугільні пеки і смолопеки [8].

Існують два сорти граничних за своїми властивостями і структурою коксів – голчастий і ізотропний. Проміжне положення займає рядовий кокс.

При виробництві монолітних графітових виробів кокс використовується як наповнювач, а в якості зв'язуючого служать кам'яновугільні пеки з різними температурами розм'якшення і смолопеки.

Виробництво графітових виробів включає ряд технологічних процесів і операцій, які зображені на Рисунок 1.1.

На першому етапі виконується первинна підготовка вуглецевмісної сировини: подрібнення з подальшим прожарюванням до температур не нижче температури подальшого випалення – 900-1200 °С, подрібнення та розсіювання по фракціям.

Прожарювання – це термічна обробка вуглецевих матеріалів без доступу повітря при високій температурі. Цієї операції піддаються всі види коксів та антрациту.

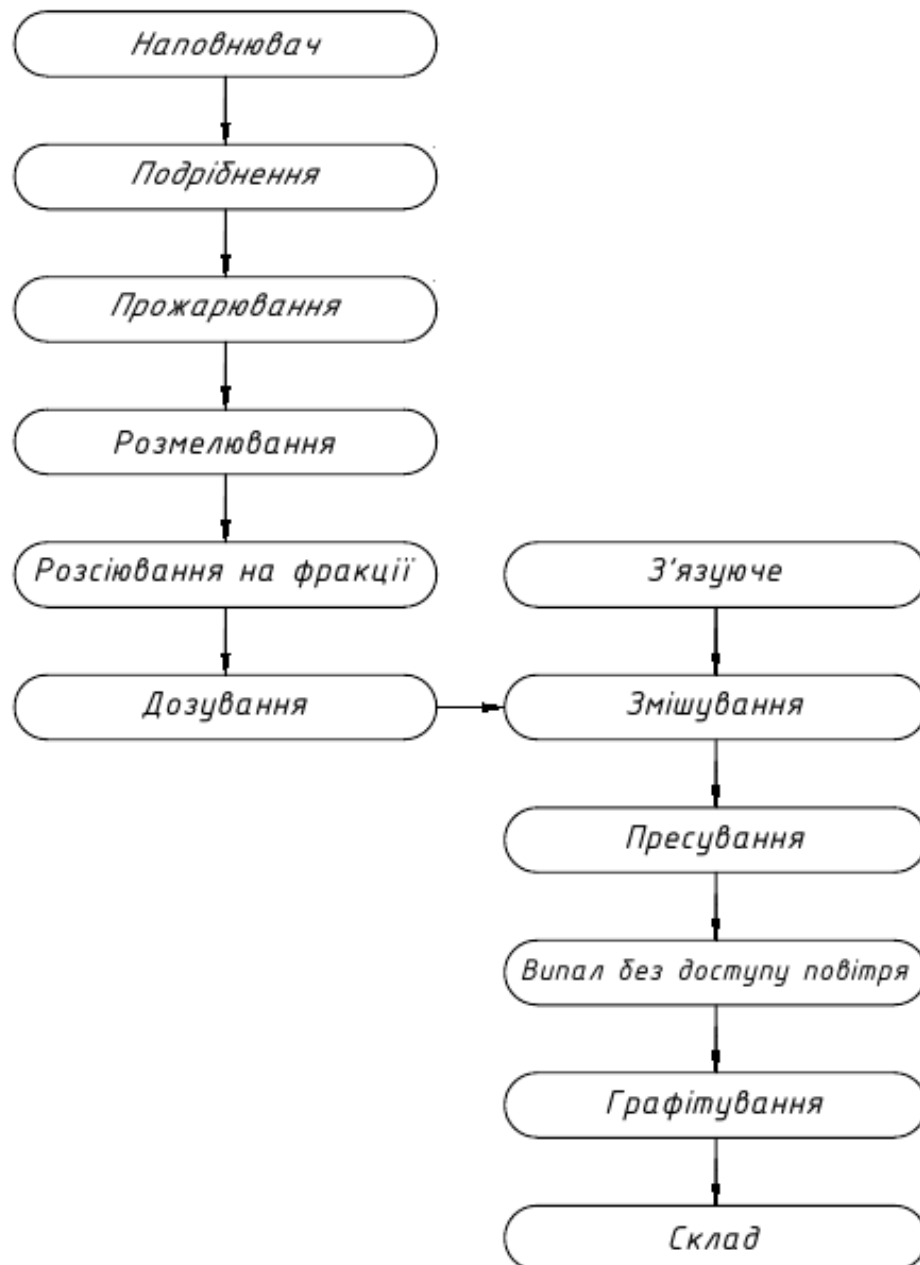


Рисунок 1.1 – Технологічна схема виробництва вуглецево-графітових виробів

При прожарюванні з наповнювача видаляється волога і леткі речовини, зростає щільність, механічна міцність, електрична провідність, теплопровідність і термостійкість, змінюється структура речовини [25]. Основна мета процесу прожарювання полягає в попередній усадці матеріалів, з яких будуть виготовлені вироби для того, щоб при подальшій термічній обробці (випалюванні) в виробі не протікали об'ємні зміни (усадка) окремих зерен, з яких воно складається. При нагріванні вуглецевих матеріалів до високої температури одночасно з усадкою змінюються властивості оброблюваного матеріалу: видаляється основна маса

летючих речовин, збільшується справжня і уявна густина, підвищуються електропровідність і механічна міцність.

Виділення летких речовин для всіх видів вуглецевих матеріалів починається з температури приблизно 250 °С і безупинно зростає з підвищенням температури. Однак швидкості газовиділення з підвищенням температури нарастають неоднаково для всіх вуглецевих матеріалів, у антрацитів, наприклад, кількість летючих, що виділяються, нарастає більш плавно, ніж у нафтових коксів. Характер і швидкість наростання газовиділення у коксу пояснюється температурним режимом коксування, а у антрацитів - ступенем метаморфізму. Газовиділення при прожарюванні нарастає до певного інтервалу температур: для нафтових коксів цей інтервал становить 550 – 650 °С, а для донецьких антрацитів 700 – 850 °С. Досягнувши максимальної величини, газовиділення при подальшому підвищенні температури різко знижується і при 1100 – 1400 °С в основному завершується [30].

Після розсіювання сировина надходить в сортові бункера. З сортових дозувальних бункерів певну кількість кожної фракції і зв'язуючого подають в змішувач. Фізичні властивості одержуваного штучного графіту істотно залежать від складу суміші [23]. Шихта в змішувачах перемішується протягом 1-5 год, температуру маси, що перемішують, доводять до 125-150 °С. У процесі перемішування маси до неї додають хімічно активні відновники, які сприяють вдосконаленню структури графіту. Отримана вуглецева маса при необхідності охолоджується і надходить в пресове відділення, де їй надають необхідну форму.

Пресування маси виконують або формуванням в закриту матрицю, або продавлюванням через мундштук певної форми. Вироби після пресування мають температуру близько 80 °С і для запобігання деформування під дією власної ваги їх охолоджують до затвердіння в водяному середовищі.

Після пресування і подальшого охолодження вуглецево-графітові вироби, що складаються з вуглецевого наповнювача і органічного зв'язуючого, піддають випалу. Метою випалу є термічна обробка виробів до температури 900-1200 °С, при якій органічне зв'язуюче має перейти в кокс і скріпити частинки наповнювача [7].

Після випалу отримані вироби піддають високотемпературній обробці – графітації. Процес графітування в основному проводять в однофазних електричних печах періодичної дії прямого або непрямого нагріву, які забезпечують рівень температур у виробках від 2400 °С до 3000 °С.

1.2 Конструкція обертової печі прожарювання

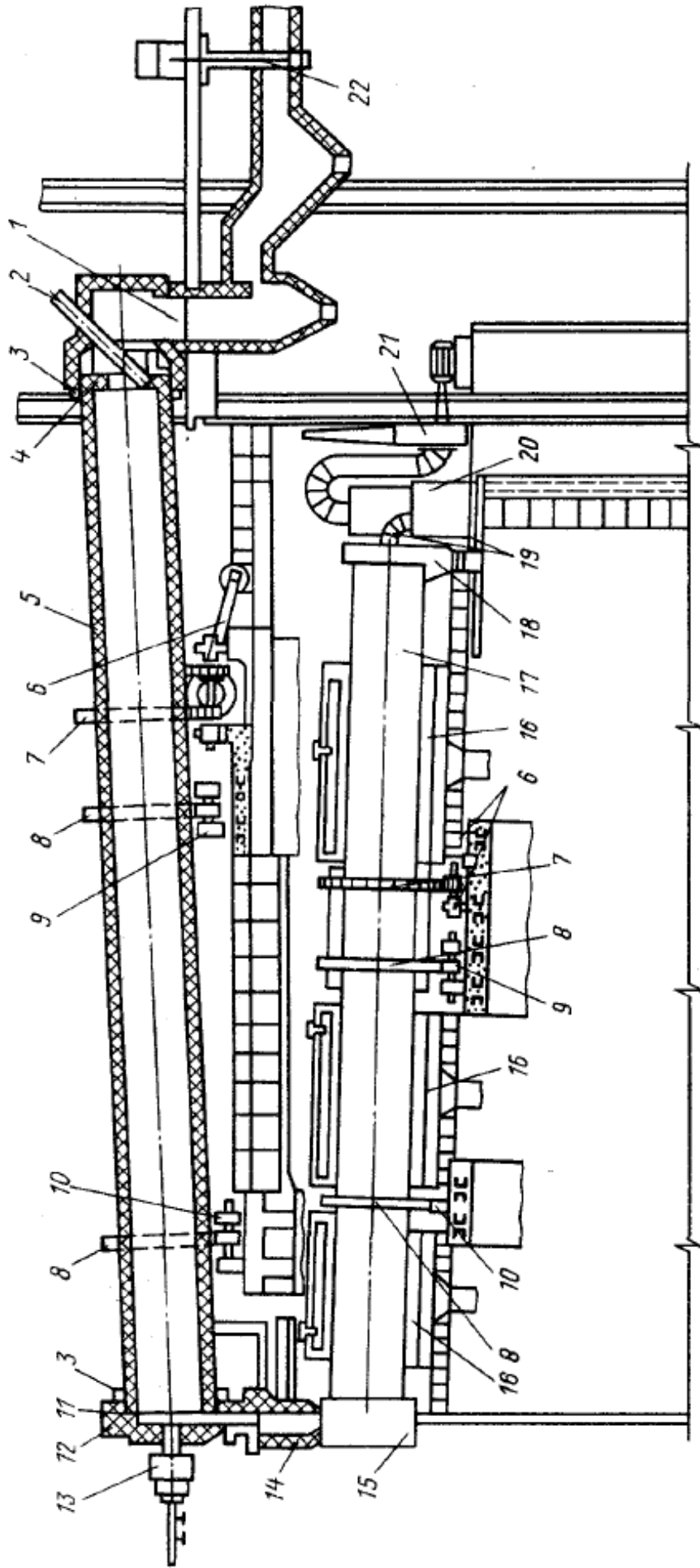
Обертові агрегати барабанного типу — обертові печі, широко застосовуються на підприємствах металургійної, хімічної, нафтопереробної та інших галузей промисловості, де вони є базовими технологічними установками. В обертових печах виготовляється більше 30 видів номенклатурних виробів.

Умовою функціонування теплових агрегатів є дотримання технологічних вимог до теплового режиму у робочому просторі. У них протікають взаємозалежні теплові, хімічні, механічні, аеродинамічні та інші процеси.

Конструкція обертової барабанної печі (Рисунок 1.2) включає в себе корпус з захисним та підпірним кільцями, опорних бандажів, зубчастого вінця, опорної станції, приводу, головки, пилової камери, вузлів ущільнення головок та футеровки. Незважаючи на те, що конструкція печі жорстка, вона забезпечує узгоджене теплове розширення окремих елементів, що гарантує міцність апарату та довговічність футеровки [30].

Корпус печі являє собою металеву трубу діаметром до 5м і довжиною до 185м, яка складається з окремих секцій, зварених із стандартних сталевих листів. Секції між собою з'єднані також зварюванням [14].

В кінці корпусу барабану зі сторони входу теплоносія встановлено захисне кільце. Ці кільця складають з окремих жаростійких L-подібних сегментів з підвищеною межею міцності. Підпірне кільце встановлюють на протилежному кінці корпусу барабана, яке слугує для запобігання просипки матеріалу з барабану в бункер пилової камери.



1 – пилова камера; 2 – завантажувальна тічка; 3 – вузол ущільнення головок печі; 4 – підірне кільце;
 5 – корпус печі; 6 – привід; 7 – зубчастий вінець; 8 – бандаж; 9,10 – опорна станція; 11 – захисне кільце;
 12 – нижня головка печі; 13 – газопальний пристрій; 14 – перевантажена тічка; 15 – верхня головка холодильника;
 16 – ванна холодильника; 17 – корпус холодильника; 18 – нижня головка холодильника;
 19 – повітрозабирач; 20 – рукавний фільтр; 21 – димосос; 22 – шибер

Рисунок 1.2 – Конструкція обертової печі

На корпусі печі закріплені бандажі, які спираються на ролики. Ролики розміщені на масивних сталевих плитах, які вмонтовані в залізобетонні фундаменти таким чином, що піч нахилена до горизонту в сторону «гарячого» кінця барабану. Корпус печі між точками опори працює на згин. Допустиме напруження металу на згин визначає вибір товщини корпусу барабану і відстань між опорами. Опорні бандажі виготовлені з міцної сталі. Башмаки під бандажами встановлюються з зазором 3-5 мм, який розрахований в кожному конкретному випадку в залежності від температури корпусу печі в даному перерізі з такої умовою, щоб при робочій температурі цього зазору не було.

Кожна з опор під бандажем складається з двох роликів з осями, які встановлені в роликотрещинниках. Для регулювання печі опорні ролики можуть переміщатись по опорних плитах. Для забезпечення довготривалої служби дорогих бандажів опорні ролики виготовляють з більш м'яких сталей ніж бандажі. Для запобігання великих осьових переміщень барабану та порушення зачеплення зубчастого колеса і шестерні біля найближчого до приводу бандажу розміщують опорну станцію.

Для передачі обертового руху печі на її корпусі змонтований зубчастий вінець. Його монтують різними способами (башмаками, тангенціальними пластинами або шарнірами), але у всіх випадках передбачено теплове розширення барабану печі.

Зі збільшенням діаметра печі сталевий вінець може складатися з двох частин і більш. Крім зубчастого вінця, до приводу барабанної печі входять електродвигуни основного й допоміжного приводів, редуктори і підвінцева шестерня. Зміна частоти обертання барабану печі досягається відповідною зміною числа обертів двигуна основного приводу.

Надзвичайно важливий вплив на умови роботи печі і якість процесу прожарювання надає футерування корпусу печі і його стан.

В обертових печах відносно тонкостінна (120-230 мм) кладка піддається односторонньому нагріву гарячими газами та матеріалом: температура робочої поверхні футеровки в зоні спікання досягає 1300-1450 °С, а зовнішньої поверхні – до 300 °С. Крім цього, за час кожного оберту печі поверхня футеровки піддається

періодичній дії гарячих газів та дії матеріалу, який прожарюється: коливання температури за один оберт печі складає 150-250 °С. Коливання температури в футеровці виникає також при зупинці печі або при переводі печі в тихий хід, при порушенні режиму прожарювання [24]. Саме тому футеровка повинна мати певні властивості: вогнетривкість, термостійкість, теплопровідність, теплове розширення, механічну міцність, пружність, опір стирання і, нарешті, хімічну стійкість до матеріалу, який прожарюється.

Обертіві печі характеризуються високою продуктивністю і надійністю експлуатації. Найбільшою перевагою обертючих печей є відносна рівномірність температури прожарювання матеріалу, зумовлено його пересипанням. Рівномірне прожарювання забезпечує високу якість продукції.

1.3 Режими роботи печі

Прожарюють різні за властивостями вуглецеві матеріали. Наприклад, нафтові кокси містять близько 7% летючих речовин, здатних згорати, антрацити – 3-4%, а пекові кокси – біля 1%. Антрацит – щільний матеріал і має високі абразивні властивості, кокс же пористий і менш абразивний. Властивості сировинних матеріалів, особливо їх вміст летючих речовин, сильно впливає на режим роботи печі.

За відповідністю послідовного ходу технологічних перетворень при прожарюванні вуглецевих матеріалів всю довжину печі слід розділити на три зони.

Перша – зона підсушки і підігріву газами, які відходять. Це найдовша зона, в якій прагнуть найефективніше використовувати тепло відхідних газів. Температура на початку зони близько 1100 °С, а вкінці - близько 500-600 °С, чим коротше піч, тим вище температура газів, що залишають її.

Друга – зона прожарювання, має найбільшу температуру газового потоку (1300-1400°С). Матеріал нагрівається в ній до 1250-1300 °С. Довжина зони прожарювання визначається довжиною факела палаючого газу і зазвичай складає

близько 5 м. Якщо в матеріалах міститься велика кількість летючих, наприклад нафтовий кокс, то в результаті їх горіння зона прожарювання може зрости до 12-15 м.

Третя – зона охолодження. Це – найкоротша зона, вона розташована в передній частині печі перед факелом палаючого газу. Нормальною довжиною для цієї зони слід вважати 2-3 м. Однак в залежності від стану зони прожарювання, яка може пересуватися як в одну, так і в іншу сторону печі, довжина зони може і скорочуватися до 1 м, і збільшуватися до 5–6 м.

Найбільш відповідальною є зона прожарювання, від довжини і розташування якої залежить якість прожарювання, величина угару. У разі найбільшого видалення зони прожарювання від гарячої головки печі різко зростає угар матеріалу, так як надходить в піч надлишок повітря, необхідний для спалювання летючих речовин, проходячи над шаром вже прожареного і нагрітого до 1200 °С матеріалу, спалює його. Чим довше ця ділянка, тим більше згорає матеріалу і більш збіднене киснем повітря надходить в зону прожарювання. Через нестачу кисню летючі речовини, які виділились, повністю не згорають в печі, а догорають вкінці, куди разом з матеріалом надходить повітря. Іноді летючі догорають за межами печі; при цьому спостерігається різке підвищення температури газів, що відходять.

Подовження зони прожарювання є позитивним фактором, так як створюються умови для більш тривалого перебування матеріалу при найбільш високій температурі в печі і, отже, більш швидкого і кращого прожарювання. При великій довжині зони прожарювання може бути збільшена продуктивність печі, для цього потрібно лише збільшити швидкість руху матеріалу за рахунок збільшення числа оборотів печі.

До параметрів технологічного режиму печі відносяться також обсяг завантаження печі матеріалом, швидкість руху матеріалу, температура і тягові умови.

Обсяг завантаження залежить від діаметра печі і складає 6-15 % її обсягу; чим більше діаметр печі, тим менше повинен бути коефіцієнт заповнення. При внутрішньому діаметрі печі близько 1 м коефіцієнт заповнення допускається 12-

15%, а при діаметрі 2,5-3,5 – до 6-8%. При занадто високому коефіцієнті заповнення печі погіршуються умови прожарювання, пересування матеріалу і тепловіддача футеруванню, тому корпус печі перегрівается, а якість прожарювання знижується. Однак при зменшенні коефіцієнта заповнення печі зменшується її продуктивність. Для створення сприятливих умов управління режимом і стабільної якості прожарювання коефіцієнт заповнення при експлуатації печі повинен бути постійним. Тому піч повинна бути обладнана точними дозаторами. Оскільки на печах зазвичай використовують, дозатори об'ємного дії, то для сталості масового завантаження потрібно сталість гранулометричного складу матеріалів, які потрапляють в піч. Особливу увагу слід звертати на максимальну крупність матеріалу, яка не повинна перевищувати 50 мм.

Час перебування матеріалу в печі в основному визначається її розмірами, температурним режимом і властивостями матеріалів, які прожарюються. Наприклад, для нафтового коксу, розміри шматків якого досягають 50 мм, при нормальному коефіцієнті завантаження і робочій температурі близько 1400 °С час перебування в зоні прожарювання має бути не менше 20 хв. У промисловій практиці в печах довжиною 40-45м час перебування матеріалу в печі становить 80-90 хв.

Для раціонального режиму прожарювання необхідно, щоб в печах існувала гнучка система регулювання розрідження в межах від 1 до 20 Па.

У Таблиця 1.1 приведено показники роботи обертових печей за [30].

Таблиця 1.1 – Показники роботи обертових печей

Довжина печі, м:	19,6	19,6	40	44	45	46
Діаметр барабану, м:						
– зовнішній:	1,6	2,4	2,3	3,0	2,35	3,0
– внутрішній:	0,85	1,9	1,8	2,5	1,85	2,5
Кут нахилу барабану:	2°35'	2°	4°	2°	2°30'	1°25'
Швидкість обертання барабану, об/хв:	4,1	1,5	1,5	2,3	2,5	3,5
Продуктивність, т/год:	2,5	5,5	6,5	11	7	10

Час перебування матеріалу в печі, хв:	45	70	72	75	76	72
Швидкість матеріалу в печі, м/хв:	0,55	0,38	0,72	0,76	0,77	0,82
Коеф. заповнення, %:	15,6	11,2	7,8	6,4	7,3	6,4
Температура відхідних газів, °С:	400	650	700	700	350	700

1.4 Теплова характеристика роботи печей

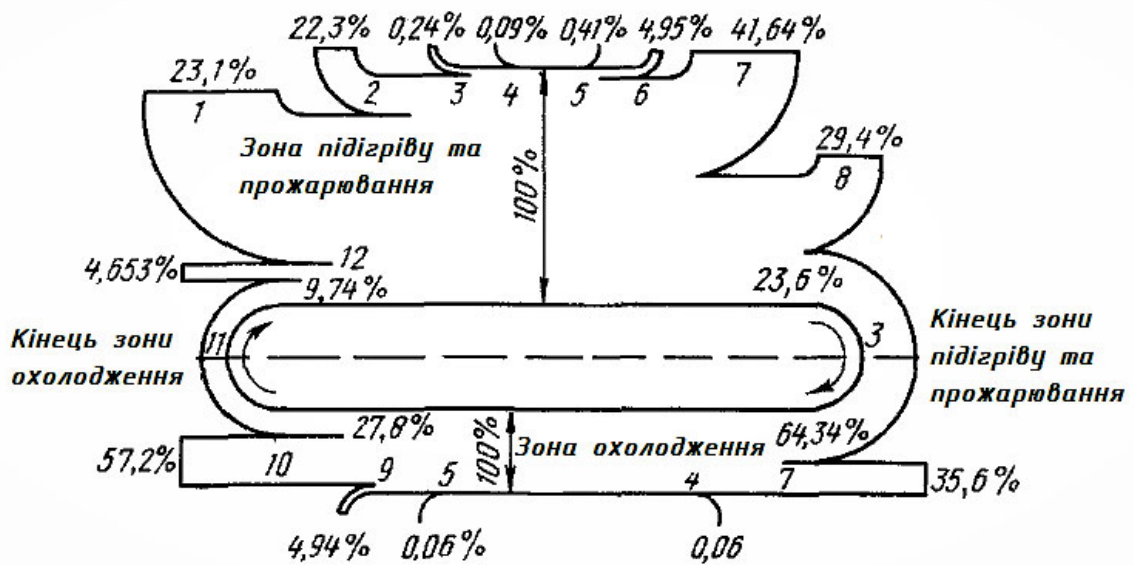
Із зазначено вище зрозуміло, що механічний стан печі та її технологічні характеристики (включно з продуктивністю та якістю прожарювання) залежать від теплового стану.

На Рисунок 1.3 (а, б) приведено теплові баланси обортових печей при прожарюванні різних матеріалів за [30].

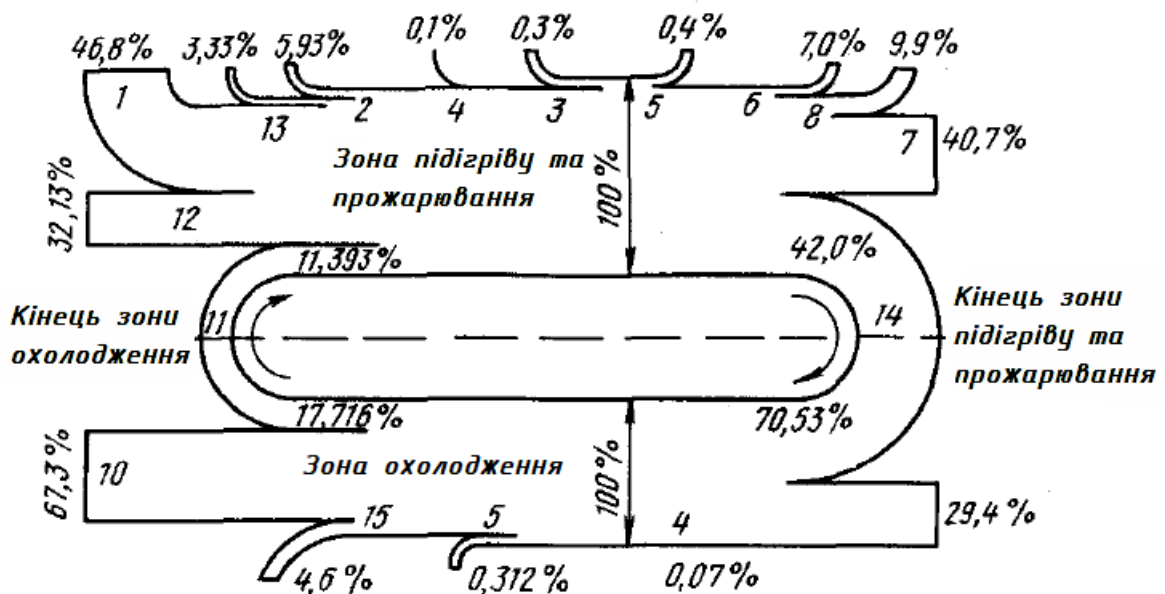
У першому випадку Рисунок 1.3 (а) прожарювалась суміш нафтового коксу з пековим, а на Рисунок 1.3 (б) – тільки пековий кокс. Вміст летючих в пековому коксі близько 1%, а в нафтовому – 7%.

При прожарюванні суміші коксу ККД печі становить 24%, а при прожарюванні пекового коксу він підвищується до 42%. Настільки різке коливання ККД печі пояснюється тим, що при складанні теплового балансу печі враховано тепло, отримане від спалювання летючих речовин, які виділяються у печі. При прожарюванні суміші нафтового коксу це – 22,3% від усього тепла, що надійшло в піч; а при прожарюванні пекового коксу ця величина складає 3,3%. Крім того, у відхідних продуктах горіння, що також впливає з теплових балансів, міститься велика кількість незгорілих горючих газів. При прожарюванні сумішей з нафтовим коксом ці втрати досягають надзвичайно великих величин і складають 41,6%, при прожарюванні пекового коксу вони значно нижчі і складають близько 10%. Пояснюється це тим, що до цих пір невідомий та не розроблений спосіб повного спалювання летючих речовин, що виділяються в печі.

Розглянувши тепловий баланс печі, можна переконатись, що найбільші втрати теплоти спостерігаються з газами, що відходять, з поверхні кожуха печі та з вихідним матеріалом, а отже вирішення задачі рекуперації цієї теплоти є найбільш доцільним з точки зору збільшення енергоефективності печі прожарювання вуглецевого матеріалу.



а)



б)

- а) суміш коксів – нафтового та пекового; б) тільки пековий кокс
 1 – хімічне тепло згорілого матеріалу; 2 – хімічне тепло летючих;
 3, 14 – фізичне тепло матеріалу; 4 – фізичне тепло повітря;
 5 – помилки розрахунку балансу; 6 – втрати в навколишнє середовище;
 7 – хімічне тепло відхідних продуктів; 8 – фізичне тепло відхідних продуктів;
 9 – фізичне тепло коксів; 10 – втрати тепла з водою і в навколишнє середовище;
 11 – хімічне і фізичне тепло відхідних продуктів горіння;
 12 – фізичне і хімічне тепло газу; 13 – фізичне і хімічне тепло палива;
 15 – фізичне тепло продуктів, які вивантажуються.

Рисунок 1.3 – Тепловий баланс обертової печі при прожарюванні суміші коксів та тільки пекового.

1.5 Літературний огляд вирішуваного питання

Сучасна промисловість розвивається в напрямку впровадження більш енергоефективних та чистих виробництв [29], при цьому вирішуються задачі як впровадження нового обладнання, так і відповідної модернізації діючих агрегатів та машин.

Для вирішення зазначеної в розділі 1.4 задачі рекуперації теплових втрат з обертових печей, був проведений літературний огляд.

Підвищенням теплової ефективності роботи печей займались Чалих В. Ю., Санніков А.К., Лисієнко В. Г., Панов Є.М., Щербина В.Ю., Карвацький А.Я., Лелека С.В., Торгунков В.Г., Павелко О.В. та інші.

Так авторами [14] описано технічне рішення для використання тепла відхідних газів, а саме використання зовнішніх теплообмінників різної конструкції. Деякі теплообмінники служать одночасно фільтрами для уловлювання пилу. Завдяки цьому досягають зниження палива.

В печах прожарювання температура вихідних димових газів досягає 800-1000 °С. З метою утилізації відхідних газів застосовуються рекуператори в печах прожарювання та котли-утилізатори в обертових печах. За допомогою цих пристроїв тепло відхідних газів використовується:

1 На нагрів повітря, що витрачається на спалювання палива і обігрів печі. В даному випадку утилізація тепла газів безпосередньо впливає на роботу печі, підвищуючи температуру в робочому просторі при цьому збільшуючи економію палива. Такий спосіб утилізації тепла газів здійснюється із застосуванням рекуператорів. Принцип роботи рекуператорів полягає в одночасному русі газу, який нагрівається та газу, який нагріває, розділених поверхнею. Оскільки температура димових газів вище температури холодного повітря, то тепло буде передаватися через роздільну поверхню повітря, поступово нагріваючи його [30]. Недоліком є те, що процес протікає не досить інтенсивно, що не дає можливості відібрати, рекуперувати значну кількість теплоти з вихідних газів. Крім того це

технічне рішення не вирішує проблему утилізації теплоти, що втрачається з поверхні барабану та з вихідним матеріалом.

2 На обігрів котлів – утилізаторів, в яких виробляється пар. У цьому випадку установка котла-утилізатора прямо не впливає на роботу печі, але дає цілком певний та значний ефект по виробництву в цілому [26].

Як вказано вище, до недоліків рекуператорів відноситься невисока інтенсивність тепловіддачі, тому Щербина В.Ю. в роботі [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] розглянув питання підвищення ефективності печі при використанні вихрового теплообмінника. Вказана конструкція дозволяє шляхом створення турбулентних пульсацій утворювати вихрові структури, які викликані зміною напрямку руху носія при проходженні його уздовж сегментів.

Вказаний теплообмінник, дозволяє створити прийнятне вихрове поле на полках з оброблюваним матеріалом і допустимою швидкістю газового потоку. З результатів розрахунку видно газовий потік, що рухається назустріч матеріалу, спочатку потрапляє в елементи дугоподібних сегментів, які виконані зі змінною поперечною формою щодо ходу руху газового потоку.

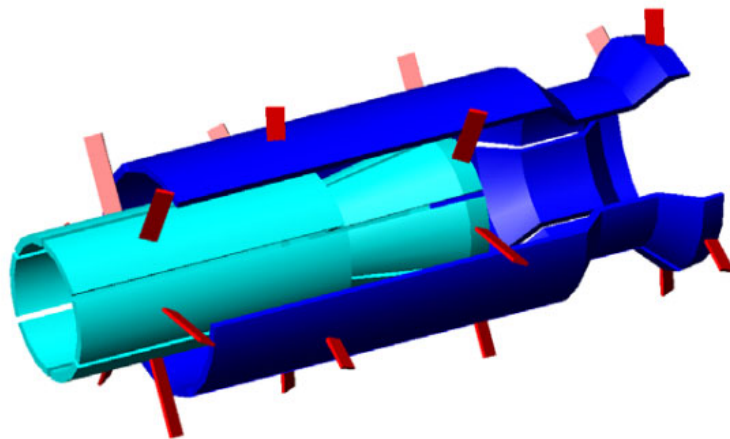


Рисунок 1.4 – Конструкція вихрового теплообмінника представлена в [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]

За рахунок цього змінюється аеродинамічний опір, що впливає на напрямок руху потоку, і за рахунок збільшення турбулентності та створенні вихрової структури газового потоку поліпшує теплообмін. Крім цього, опорні лопатки встановлені під кутом до руху газового потоку, створюють додатковий

гвинтоподібний вихровий рух. Потік, що набув руху вихрового характеру, охоплює елементи дугоподібних сегментів, нагріваючи вільні поверхні сегментів, і поліпшує теплообмін з ними й матеріалом, що у цей час перебуває на поверхні сегментів, або просипається крізь них.

Таким чином, використання вихрового теплообмінника даної конструкції підвищує теплову ефективність роботи за рахунок інтенсифікації теплообміну між газовим потоком, теплообмінником і матеріалом, що оброблюється. Але дане технічне рішення не вирішує проблеми утилізації та рекуперації теплоти з кожуха та з вихідним матеріалом.

В [9] розглянуто покращення теплової ефективності роботи пічного агрегату за рахунок встановлення всередині печі додаткових теплообмінників, збільшення густини навіски ланцюгової завіси, встановлення всередині рекуперативних теплообмінників з метою рекуперації тепла від димових газів різними холодоагентами.

Збільшення густини навіски ланцюгової завіси за рахунок заміни частини гірляндової завіси на завісу з "вільно звисаючими кінцями" дає змогу збільшити поверхню теплообміну між гарячими димовими газами і сировинними компонентами шламу на 20 %, що рівнозначне прямо-пропорційному приросту кількості тепла, переданого до матеріалу; встановлення всередині металевих рекуперативних теплообмінників із загальною поверхнею теплообміну 500 м² з метою рекуперації тепла від димових газів водою, яка після нагрівання в теплообмінниках може в подальшому використовуватися в підігрітому вигляді в технологічній лінії заводу. Використання металевих рекуперативних теплообмінників дає змогу підвищити температуру води на 5°C при витраті води до 0,25 м³/с. Але недоліками даних технічних рішень є: збільшення навантажень на привід та опори печі та залишається невирішеним питання втрати тепла корпусом печі в навколишнє середовище та з вихідним матеріалом.

Через високі температури в обертовій печі навіть з вогнетривкою футеровкою зовнішня поверхня барабану нагрівається і випромінює тепло в навколишнє середовище. Утилізація та рекуперація цієї теплоти було б вигідним як з економічної, так і з екологічної точки зору.

В [14] описана утилізація теплоти, яка міститься в матеріалі, який прожарюється, для підігріву матеріалу, який знову завантажується в піч. Результат досягається за схемою приведеною на Рисунок 1.5. У цьому випадку в футеровці виконані спіральні канали 1, в яких попадає матеріал через вікна 2 в кінці термообробки. При обертанні печі матеріал по спіральним каналам рухається на зустріч матеріалу, який рухається в циліндричній порожнині печі і віддає йому частину свого тепла.

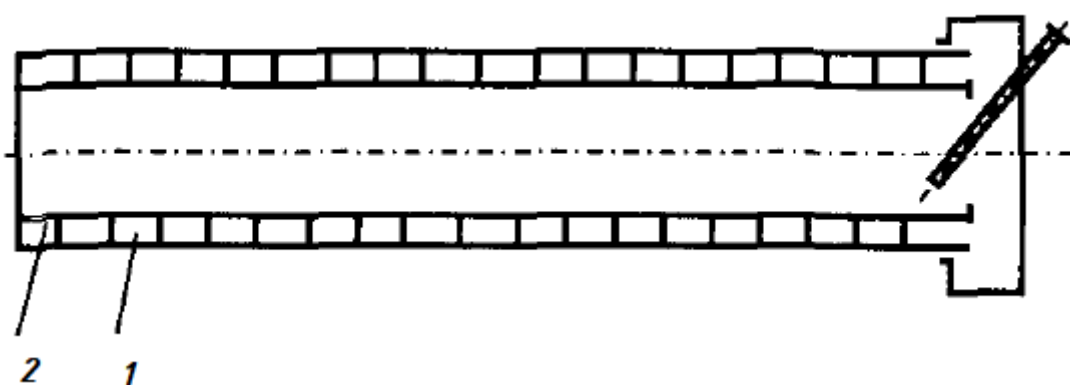


Рисунок 1.5 – Схема утилізації теплоти

Недоліками технічного рішення є суттєва зміна конструкції футеровки та залишається невирішеним питання рекуперації теплоти з вихідним матеріалом.

В [2] запропоновано метод рекуперації теплоти з поверхні барабану печі.

Трубопровід 1 з'єднаний з нагрівальною камерою 2 через кільцеву стінку 3, в якій випускний канал має вентилятор 4. Вентилятор втягує повітря через осьові кінці 5 і випускає повітря через випускную трубу 1. Коли повітря проходить через камеру 2 повітря нагрівається і отримане повітря з камери передається в рекупераційний пристрій 6. Звідти нагріте повітря може потрапляти безпосередньо в піч через лінію 7 або надходити до парогенераторів через лінію 8 або інших установ (Рисунок 1.6).

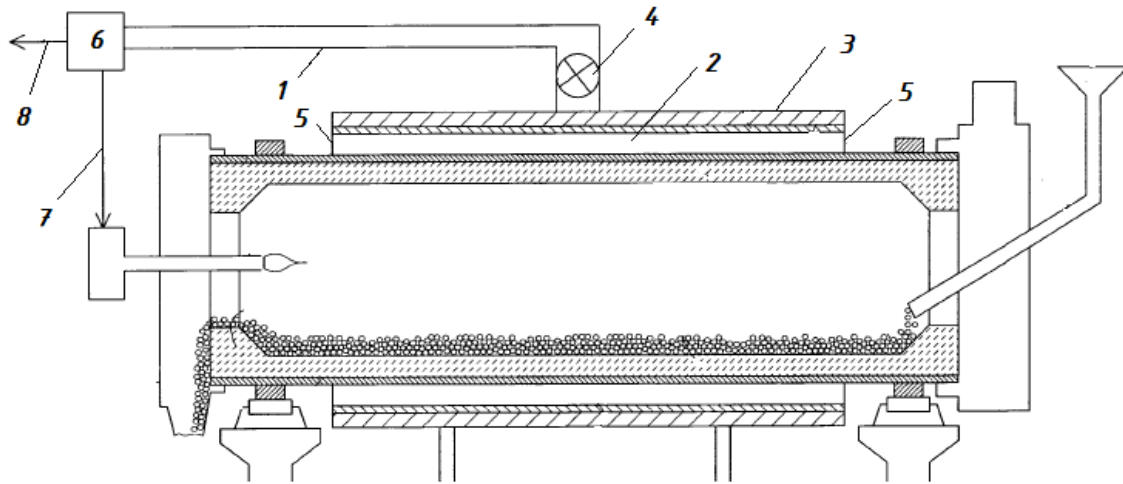


Рисунок 1.6 – Рекуперація теплоти з поверхні барабану печі

Дане технічне рішення вирішує проблему рекуперації теплоти з поверхні корпусу печі, але вимагає встановлення додаткового енергоспоживаючого обладнання – вентилятора та рекуператора, який як зазначалось вище характеризується низькою інтенсивністю тепловіддачі. Окрім того впровадження запропонованого технічного рішення ускладнюється вузлом подачі повітря в піч, адже при подачі необхідного на горіння летких та матеріалу повітря (близько $8000 \text{ м}^3/\text{год}$) через типове сопло діаметром 200 мм швидкість витікання повітря становитиме 250 км/год.

В [19] розглянуто пристрій для утилізації теплоти корпусу обертової печі. Пристрій розміщується в високотемпературній зоні обертової печі. Працює наступним чином (Рисунок 1.7). Вода по трубі 14 подається у вхідні колектори 8 та 10. Проходячи по трубах 3, 6 та по панелям 1, 5, вода нагрівається теплом, яке випромінює корпус 2 обертової печі. Панель 1, яка розміщена під корпусом 2 обертової печі, яка обладнана трубами 3 та яка має довжину, що дорівнює довжині дуги сегмента матеріалу, який прожарюється – 4. Панель 5 також сприймає тепло еквівалентне теплу, яке втрачає корпус обертової печі. Нагріта вода виводиться через колектори 9 та 11. Додатково вхідні колектори з'єднані патрубком 12 з запірною арматурою 13. Наявність роз'єму 7 дозволить монтувати та демонтувати установку без зупинки обертової печі.

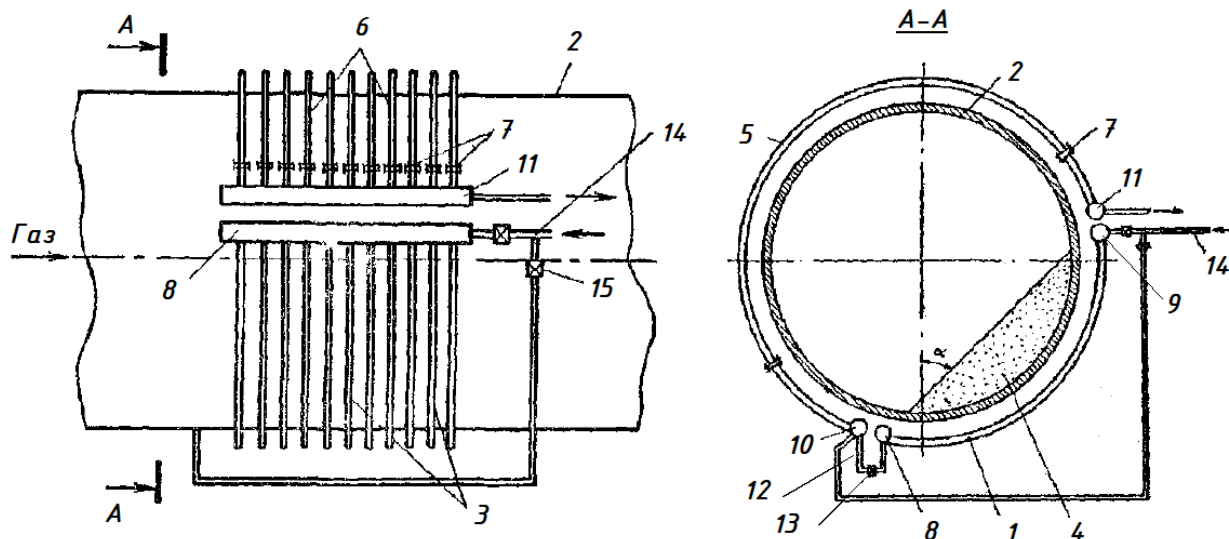


Рисунок 1.7 – Пристрій для утилізації теплоти корпусу обертової печі

В [18] запропонована корисна модель для регулювання температури корпусу обертової печі.

Корисна модель належить до пристроїв для регулювання витрат теплоти, що втрачаються розігрітим корпусом обертової печі для обробки сипучих матеріалів, і може бути використана в хімічній, металургійній промисловості, промисловості будівельних матеріалів та інших галузях, де використовуються обертові печі. Технічний результат запропонованого рішення полягає в тому, що теплообмінник може використовуватися як утеплювач корпусу обертової печі, так і як охолоджувач. Це дозволяє підтримувати постійну температуру корпусу печі в діапазоні ± 5 °C (Рисунок 1.8).

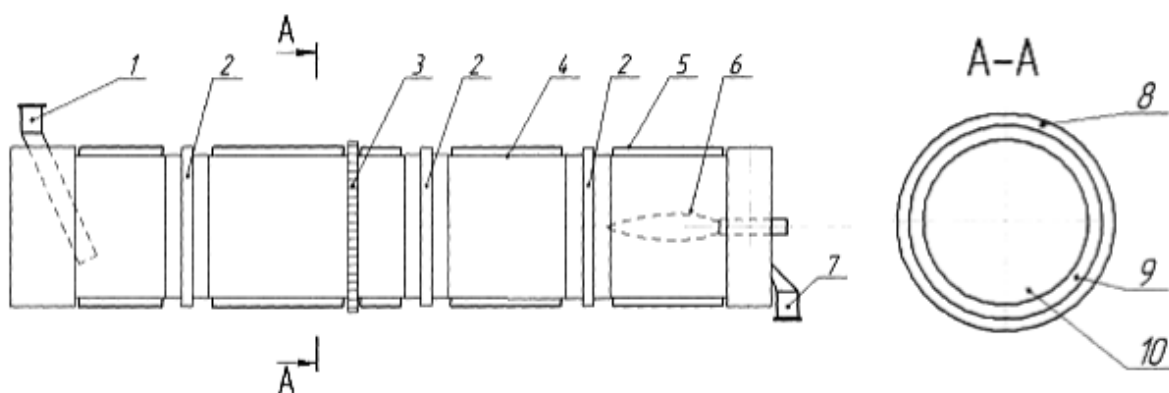


Рисунок 1.8 – Пристрій для регулювання температури корпусу обертової печі

Технічні рішення розглянуті в [19] та [18] вирішують проблему рекуперації теплоти з поверхні корпусу печі, але не вирішують проблему утилізації теплоти з вихідним матеріалом, а їх впровадження та експлуатація є складною технічною задачею, що й призвело до відсутності їх реального впровадження в виробництво.

В [14] описано підігрів вторинного повітря в барабані-охолоджувачі.

Повітря, необхідне для горіння палива і протікання технологічних операцій, потрапляє в піч в основному з навколишнього середовища за рахунок розрідження, яке створює димосос. Деяка кількість повітря, яке підігрівається в барабані-охолоджувачі до температури 120-200 °С при початковій температурі матеріалу 1000-1100 °С, потрапляє за допомогою вентилятора по спеціальному повітропроводу.

В [33] запропоновано технічне рішення підігріву повітря в барабані-охолоджувачі в міжкорпусному просторі.

Обертвий барабан-охолоджувач для охолодження сипучих матеріалів, наприклад, прожареного коксу, складається із зовнішнього 1 і внутрішнього 2 корпусів, встановлених з можливістю обертання і жорстко пов'язаних між собою. Холодильник оснащений завантажувальним 3 і розвантажувальним 4 отворами для завантаження гарячого і вивантаження охолодженого прожареного коксу. Корпуси 1 і 2 утворюють міжкорпусний простір 5. З боку розвантаження коксу встановлені вхідна труба 6 для подачі охолоджуючої води і вихідна труба 7 для відводу відпрацьованої води, наприклад, в систему циркуляційного охолодження (не показана). У внутрішньому корпусі 2 коаксіально розміщена приймальна камера 8, оснащена з боку виходу коксу вузлом відведення води 9 до центральної водовідвідної трубі 10. Вузол відводу води утворений хрестоподібним з'єднанням з трубами 11. Труби 11 з'єднані з одного боку з центральною водовідвідною трубою 10, а з іншого – з міжкорпусним простором 5 за допомогою кільцевого простору 12 між приймальною камерою 8 і внутрішнім корпусом 2. Холодильник оснащений шнековими елементами 13 і поздовжніми пластинами 14, встановленими на внутрішній поверхні корпусу 2 і приймальної камери 8.

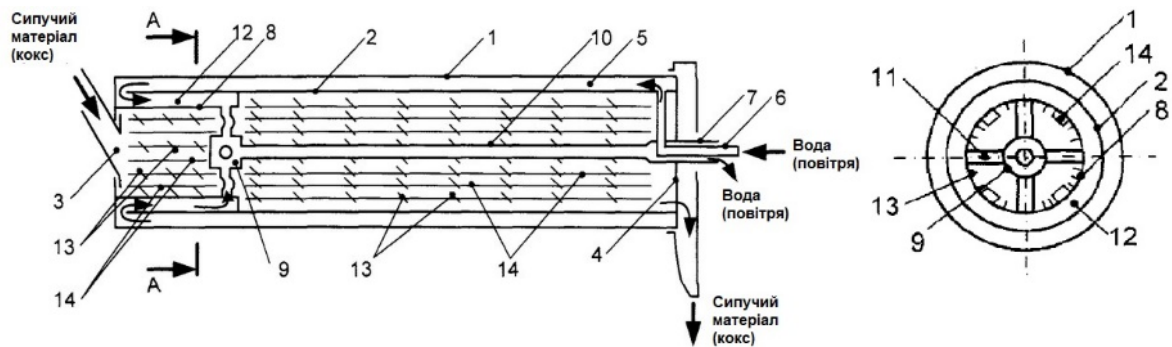


Рисунок 1.9 – Барабан-охолоджувач для сипучих матеріалів

Недоліком технічного рішення є суттєва зміна конструкції барабана-охолоджувача.

Відомо, що найбільш інтенсивно тепло можна відводити за допомогою процесу кипіння або випаровування. Якщо ми в одному місці випаровуємо, а в іншому конденсуємо, то таким чином ми перенесемо велику кількість тепла з одного місця в інше. В умовах прожарювання в обертових печах волога в чистому виді не потрібна, але відомо, що при взаємодії води з вуглецем при високих температурах на цю реакцію взаємодії витрачається досить велика кількість теплоти, яку можна забрати, а також виникає горючий газ – синтез-газ, який можна направити назад в піч.

Процеси перетворення органічної маси вугілля в газоподібні горючі речовини носять назву газифікації. У процесі газифікації вуглець перетворюється найчастіше в оксид вуглецю, водень – в водяну пару і разом з сіркою – в сірководень, азот – в оксиди азоту. Мінеральна частина вугілля в залежності від температури газифікації переходить в золу або шлак. Газифікація вугілля лежить в основі багатьох технологічних процесів, пов'язаних з його застосуванням. Найбільш старі процеси газифікації розроблялися з метою отримання з вугілля горючих газів, які застосовувалися як побутове паливо для вуличного освітлення, як промислове паливо для різних високотемпературних процесів. В енергетичних котлах електростанцій вугілля можна спалювати безпосередньо. Однак в ряді випадків доцільно попередньо газифікувати вугілля, а потім спалювати отриманий газ. Таке облагороджування вугілля становить інтерес у зв'язку з вимогами екології (особливо в разі застосування вугілля, яке містить багато сірки), або в тих випадках, коли бажано застосувати більш досконалі схеми

перетворення енергії (наприклад, парогазові установки на електростанціях). Нарешті, газифікація вугілля становить інтерес для хімічної технології (отримання синтез-газу), оскільки синтез-газ є вихідною сировиною в різноманітних органічних синтезах [12].

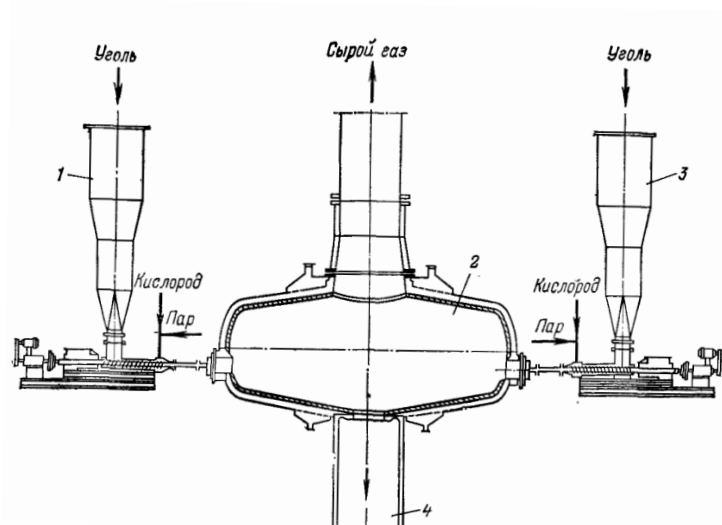
Оброблення прожареного вуглецевого матеріалу в потоці повітря й водяної пари після виходу з обертової печі та перед його охолодженням дає змогу отримати синтез-газ, що, наприклад, за температури 460 °С містить 18,9 % CO, 42,57 % H₂, 25,74 % CH₄ та 9,6 % CO₂, далі компоненти зтягнуться в піч де згорять з паливом для печі [4].

Важливою характеристикою газифікації є також розмір частинок вугілля. Якщо переробляють дрібнозернисте або пилоподібне вугілля, то процеси систематизують за принципом організації потоку. Кускове вугілля зазвичай газифікують в стаціонарному стані: сировина, яка завантажується, повільно опускається, а газифікуючі агенти вводяться знизу. Переваги цього способу обумовлені дуже хорошою теплопередачею. При цьому знижуються витратні показники і підвищується загальна ефективність процесу. Крім того, в цьому випадку створюються особливо благоприємні кінетичні умови для реакцій: паливо, яка знову загрузається, взаємодіє з уже в значній мірі газифікуючим агентом, а зола, яка містить тільки невелику кількість вуглецю, навпаки, контактує з газифікуючим агентом, який ще не прореагував.

В [27] авторами Францен Ю.Е., Геке Е.К., Тренкнер К.К. розглянуто спосіб газифікації пилового палива (спосіб Koppers – Totzek).

В даному способі вугілля чи інші вуглецевмісні матеріали газифікують киснем та водяним паром при атмосферному тиску. Газогенератор являє собою горизонтальну камеру (Рисунок 1.10), яка має термостійку футеровку. Форсунки для подачі вхідних матеріалів, розміщені один проти одного на торцевих поверхнях реакційної камери. Пилоподібне вугілля подають в бункери газогенератора. Звідти його забирають, перемішують з киснем та вводять в реакційну камеру. Склад сирого синтез-газу на виході з газогенератора Koppers – Totzek, який переробляє вугільний пил, зазвичай є таким: CO – 57,2 %, H₂ – 30,7

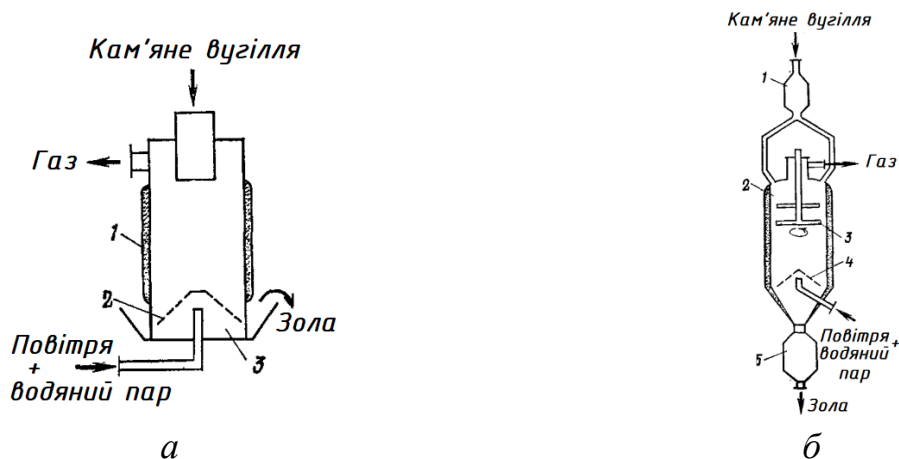
%, CO_2 – 10,5 %, CH_4 – 0,1 %. Теплота згорання такого газу складає $Q = 11,2$ кДж/м³.



1,3 – бункери-дозатори; 2 – газогенератор;
4 – система видалення шлаків

Рисунок 1.10 – Газогенератор Koppers – Totzek

В [27] також розглянуті установки газифікації коксу – генератори з обертовими решітками (Рисунок 1.11). Виготовляються такі установки діаметром до 5м при висоті слою палива 1,3-1,8м. У безперервному виробництві при використанні водяного пару та повітря, який насичений киснем, отримують низькокалорійний газ ($Q = 5,2$ кДж/кмоль). Для виробництва синтез (водяного) газу використовують аналогічні генератори, які експлуатаються циклічно; спочатку при подачі повітря нагрівають кокс, а потім при вдуванні водяного пару отримують водяний газ, який містить приблизно 40% CO та 50% H_2 .



- а) з обертовою решіткою: 1 – водяний охолоджуючий корпус,
2 – обертова решітка, 3 – чаша для золи;
б) для коксування вугілля: 1 – шлюз, 2 – водяний корпус, 3 – змішувач, 4
– обертова решітка, 5 – чаша для золи

Рисунок 1.11 – Газогенератори

Аналіз літературних джерел присвячених проблемі отримання синтез-газу показав наступне:

1 Під газифікацією вугілля розуміють перетворення вуглецевмісних матеріалів за допомогою агентів газифікації в суміш газів.

2 Принципово можливо газифікувати всі вуглецевмісні матеріали.

3 В якості агентів газифікації зазвичай застосовують повітря, кисень, водяна пара, діоксид вуглецю і (особливо останнім часом) водень, а також суміші цих речовин. Отримані гази містять оксид і діоксид вуглецю, водень, метан, водяна пара і у вигляді домішки азот, який вноситься з повітрям (Рисунок 1.12).

1	2	3	4	
Газифікація повітрям та паром	Газифікація повітрям та паром під тиском	Газифікація киснем та паром	Газифікація киснем та паром під тиском	
↓	↓	↓	↓	↓
Горючий (генераторний) газ (CO, H ₂ , N ₂ , не багато CH ₄)	Горючий газ (такий же, що 1, але більше CH ₄)	Синтез-газ, газ відновник (CO, H ₂ , N ₂)	Побутовий (міський) газ (H ₂ , CH ₄ , можливі N ₂ та CO ₂)	Газ замітник природного газу (CH ₄ , можливі N ₂ та CO ₂)
↓	↓	↓	↓	↓
Для різних промислових підприємств	Для енергетичних підприємств (попередньо газ направляють в турбіни)	Синтез NH ₃ та CH ₃ OH, синтез Фішера-Тропша, оксосинтез, відновлення руд	Побутове газопостачання	

Рисунок 1.12 – Методи газифікації вуглецевмісного матеріалу та направлення використання отриманих газів

4 Генерація основних компонентів генераторного, горючий і синтез газу відбувається при високих температурах, згідно наступних реакцій (1.1)-(1.5).





5 Температура початку перебігу реакцій утворення синтез газу складає приблизно 600 °С, а швидкість протікання реакцій утворення синтез газу залежить від швидкості хімічної реакція, яка в інтервалі 680-900 °С є лімітуючої стадією газифікації (Рисунок 1.13).

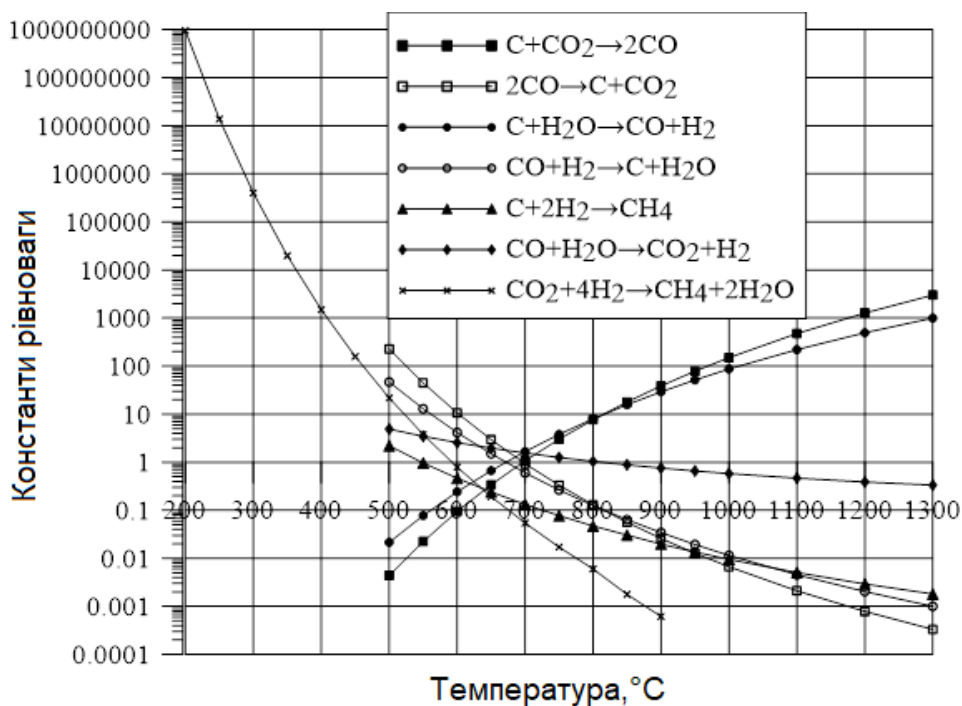


Рисунок 1.13 – Температурні залежності констант рівноваги основних реакцій газифікації вуглецевого матеріалу

6 У випадку отримання необхідного тепла шляхом спалювання частини введеного вуглецю розрізняють періодичну і безперервну газифікацію. Періодична газифікація складається з двох етапів – подача повітря (повітряне дуття) для нагріву вуглецю і подачі водяної пари (парове дуття) для отримання необхідного синтез-газу. За рахунок ендотермічного взаємодії водяної пари з вуглицем шар матеріалу в зоні реакції знову охолоджується. Найбільш ефективно процес утворення синтез-газу відбувається при безперервній газифікації.

Розглянутий літературно-патентний пошук показав, що відсутні технічні рішення, які в повному обсязі вирішують поставлену задачу – рекуперації та

утилізації втрат теплоти з печі прожарювання. Вочевидь, немає готового технічного рішення, яке в повному обсязі вирішить проблеми рекуперації теплоти в обертовій печі прожарювання. Найбільш раціональними підходами вирішення проблеми рекуперації теплоти з поверхні кожуха є технічне рішення описане в [2]; для вирішення проблеми рекуперації теплоти вихідного матеріалу найбільш доцільне рішення є продування повітря, що подається на згорання природного газу та матеріалу, який прожарюється, яке описано в [14], або шляхом утворення синтетичного газу, який затягнеться в піч на згорання.

Для визначення раціональних характеристик та адаптування технічних рішень потрібно дослідити об'єкт – обертову піч прожарювання.

1.6 Методи дослідження

Розробка технічних рішень повинна базуватися на визначенні реального енергетичного стану об'єкта досліджень, розробки самих технічних рішень, перепереверки технічних рішень та впровадження їх в виробництво.

Дослідження реального теплового стану печі прожарювання проводиться як за допомогою натурних та чисельних методів так і може бути основане на літературних даних з відкритих джерел. Нажаль енергетичний стан печі суттєво залежить від матеріалів, що прожарюються, які в свою чергу залежать від родовища та технології отримання, а отже фактично енергетичний стан печей різних підприємств суттєво відрізняється, біль того постійно енергетичний стан печей одного підприємства також змінюється з часом. Отже єдиним достовірним джерелом реального теплового стану печі є натурні експерименти.

До натурних способів відносяться – вимірювання температури конструкційних елементів печі, матеріалу в печі в різних зонах та температури вихідного газу з печі. Крім того важливим є фіксація достовірних показників масових характеристик роботи печі, а саме продуктивності роботи печі по

матеріалу, угару матеріалу, кількості природного газу, який подається в піч, кількості вихідних газів, які відходять з печі.

1.6.1 Методика проведення високотемпературних досліджень

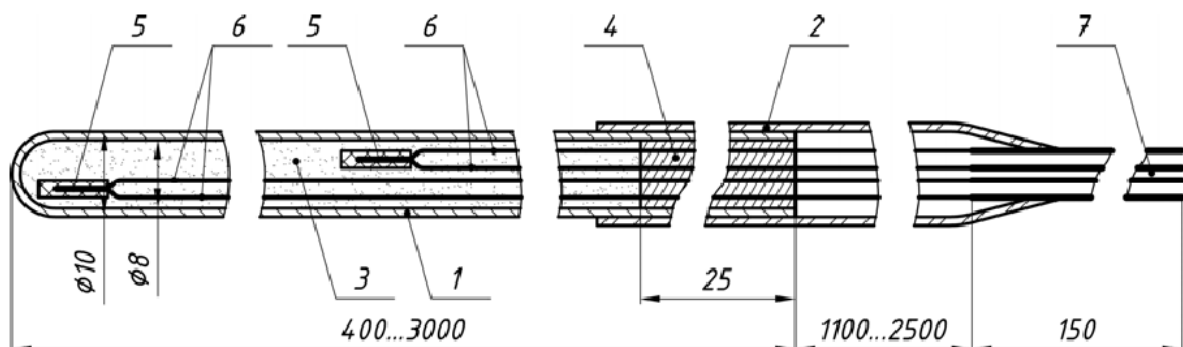
У науково-дослідному центрі «Ресурсозберігаючі технології» [29] для проведення вимірювання температур у високотемпературних промислових агрегатах розроблені комплексні багаторівневі методики досліджень [17, 15]:

- до 1200°C – 1-й рівень. Термопари хромель–алюмелеві (ХА) [22], термопінт виробництва фірми Agema TPT 62;
- до 1800°C – 2-й рівень. Термопари (ВР 5/20) [22], оптичні пірометри;

Для вимірювання швидкості повітряних потоків і відхідних газів та їх температури застосовується термоанемометри та анемометри.

Для безпосереднього вимірювання теплового стану печі застосовують термопари вольфрамо-ренієві (ТВР), платино-родієві (ТПР), хромель-алюмелеві (ТХА), графітові дилатометри, оптичні пірометри, термометричні кільця і інші.

Хромель-алюмелеві термопари (Рисунок 1.14) являють собою сталевий чохол заповнений порошком оксиду магнію або нітриду бору, всередині якого знаходяться термопари з перетином проводів 0,5 та 0,7 мм. Рівень температур, який дозволяють виміряти в печі хромель-алюмелеві термозонди знаходиться в діапазоні 1100–1200 °С. ХА термопари використовуються для виміру температури відхідних газів, температуру газового середовища в гарячій та холодній головках печі та температуру відхідних газів за межами головки печі.



- 1 – чохол (сталь); 2 – рукав (кремнійорганічна резина); 3 – оксид магнію;
 4 – пробка з високотемпературного клею та оксиду магнію;
 5 – гарячі снаї; 6 – електроди термопар у мулітокремнеземному сплетінні; 7 – зовнішні електроди (фтор-пластиковою ізоляцією)
- Рисунок 1.14 – Конструкція ХА термозонду на 2 термопар

Для виміру температури матеріалу, який виходить з печі застосовуються вольфрамо-ренієві термопар в керамічному чохлі. Матеріал, який виходить з обертової печі заповняє чавунний посуд об'ємом 5-7л, і в нього вставлялась ВР термопара для виміру температури.

Термометричні кільця марок LTH (діапазон температур 970-1250 °С) та STH (діапазон температур 1130-1400 °С) в графітових стаканах зображені на Рисунок 1.15.



Рисунок 1.15 – Термометричні кільця контролю температури та конструкція графітового стакану

Платинова термопара використовується для виміру температури до 1800°С. Вона дуже дорога, тому для вище перерахованих замірів використовувати її економічно недоцільно. Але її можна використовувати для постійного вимірювання температури кожуха печі, або температури футеровки печі. Для виміру кожуха печі термопара прикріплюється безпосередньо на кожух. Для виміру температури футеровки печі в кожусі печі робиться невеликий отвір, в цей отвір вставляється керамічний чохол, сам цей керамічний чохол розміщується в заздалегідь відфрезеровуваний отвір в футеровці печі. В цей чохол вставляється платинова термопара, яка весь час обертається з корпусом печі. Для зняття показань термопар, на корпус печі через ізолятор встановлюється два мідні кільця. Термопара та мідні кільця з'єднанні між собою.

Схожий принцип роботи описано в [20]. На Рисунок 1.16 представлено схему методу виміру температури в обертових об'єктах. Робочий спай термопар 2 розташовують в місці вимірювання температури на обертовому об'єкті 1, вільні кінці спаюються з двома відхідними провідниками, приєднаними до контактних кілець, отримані термопар 5 і 6 ізолюють від зовнішнього середовища кожухом з теплоізоляцією 7 і контролюють їх температуру стаціонарною термопарою 8, різниця термоЕРС термопар, утворених електродами струмознімачів 9 і 10 з контактними кільцями подають на реостати 11 і 12, з двигунів яких знімають термоЕРС і по ній визначають температуру з урахуванням поправки на температуру вільних кінців вимірювальної термопар 2, знайденої по напрузі від стаціонарної термопар 8.

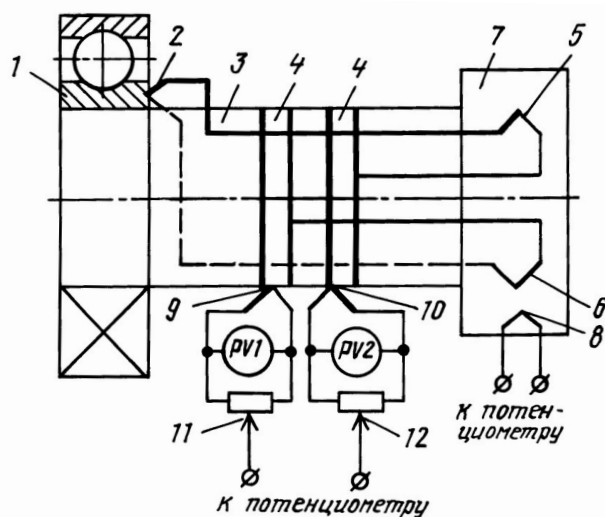


Рисунок 1.16 – Спосіб виміру температури обертових об'єктів термопарою

Перераховані методи виміру температур відносяться до контактних, а до безконтактним відносяться оптичні пірметри, термопоінти і тепловізори.

За допомогою термопоінтов і тепловізорів визначаються в основному температури зовнішніх поверхонь печі. Оптичний пірметр використовується для високотемпературних вимірювань – понад 900 °С.

Основним недоліком вимірювання температури за допомогою оптичного пірметра є суттєва похибка вимірюваних температур.

Масу матеріалу, який загрузається в піч, можна виміряти тензодатчиками, які встановлені на конвеєрі, знаючи швидкість роботи конвеєру можна визначити продуктивність печі по завантаженню.

Матеріал, який уже охолоджений, також потрапляє на конвеєр, на якому встановлені тензодатчики, і знаючи швидкість цього конвеєру можна дізнатися продуктивність печі по розвантаженню.

У промислових умовах проблема достовірного прямого виміру температур не вирішена остаточно. Більш того, розглянуті методи оцінки температур печі досить обмежені через відносно невеликого числа контрольованих точок, тяжкої складності експерименту і високу вартість експериментального обладнання. Саму тому для оцінки температурних полів в печах найбільш прийнятний є використання методів математичного моделювання.

1.7 Висновки до розділу 1

Визначено, що найбільші втрати теплоти спостерігаються з газами, що відходять, з поверхні кожуха печі і з вихідним матеріалом.

Визначено, що зменшити витрати теплоти неможливо, так як це не дозволяє сам технологічний процес, можливо тільки рекуперувати цю теплоту.

Проведений літературно-патентний пошук показав, що відсутні технічні рішення, які в повному обсязі вирішують поставлену задачу – рекуперації та утилізації втрат теплоти з печі прожарювання. Вочевидь, немає готового технічного рішення, яке в повному обсязі вирішить проблеми рекуперації теплоти в обертовій печі прожарювання. Найбільш раціональними підходами вирішення проблеми рекуперації теплоти з поверхні кожуха є технічне рішення описане в [2]; для вирішення проблеми рекуперації теплоти вихідного матеріалу найбільш доцільне рішення є продування повітря, що подається на згорання природного газу та матеріалу, який прожарюється, яке описано в [14], або шляхом утворення синтетичного газу, який затягнеться в піч на згорання.

На основі цього сформульовані наступні задачі:

1 Адаптувати запропоновані іншими авторами технічні рішення з рекуперації теплоти з кожуха та вихідного матеріалу для їх використання в печах прожарювання вуглецевого матеріалу з урахуванням особливостей роботи обертових печей та розробити ескізний проект технічних рішень.

2 Визначити вхідні параметри для обчислення характеристик технічних рішень – геометрію, витратні характеристики.

3 Розробити розрахункові моделі які дозволять визначити раціональні характеристики запропонованих технічних рішень.

4 Розробити проект модернізації обертової печі для прожарювання вуглецевого матеріалу.

5 Розробити розрахункову модель модернізованої печі на базі програмного забезпечення ANSYS, VESNA або ABAQUS, яка описує запропоновані технічні рішення, та перевірити вплив запропонованих технічних рішень на теплоенергетичний стан печі.

2 МОДЕЛЬ НДС ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ З УРАХУВАННЯМ ТЕРМОСИЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Використання математичного моделювання раціонально не тільки для визначення теплового стану печі так і перепереверки впливу на цей стан різноманітних технічних рішень, тому що впровадження цих технічних рішень в реальне виробництво вимагає дуже багато часу та ще більше ресурсів. Математичний метод дає змогу перевірити технічні рішення на віртуально змодельованій печі, тому цей метод є найбільш ефективним.

Одними із найбільш поширеними у світі апаратами для розрахунку фізичних полів в різноманітних об'єктах є (CAD-CAM-CAE – Computer-Aided Design – Computer-Aided Manufacturing – Computer-Aided Engineering), ядром яких є універсальні обчислювані системи, до яких належать ANSYS (Multiphysics, CFX, Fluent) [1], ABAQUS, BECHA [32].

2.1 Постановка задачі теплопровідності та статичної термопружності

Рівняння лінійної стаціонарної теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти для ізотропного середовища можна записати у вигляді:

$$\Delta T(\mathbf{x}) + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (2.1)$$

де $\mathbf{x} = x^i \mathbf{e}_i$ – радіус-вектор, м; $\Delta = \nabla^2$ – оператор Лапласа; $\nabla = \mathbf{e}^k \nabla_k \equiv \mathbf{e}^k \frac{\partial}{\partial x^k}$, – оператор Гамільтона (оператор градієнта); $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}^k$ – коваріантний і контраваріантний векторний базис, відповідно; T – температура,

K ; q_v – густина внутрішнього джерела теплоти, $\text{Вт}/\text{м}^3$; λ – теплопровідність середовища (тіла), $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; Ω – розрахункова область.

Граничні умови для рівняння (1.1) можуть включати ГУ трьох родів:

– I роду – задана температура на границі тіла T_b

$$T = T_b; \quad (2.2)$$

– II роду – задана нормальна складова вектора густини теплового потоку

$$n_i(-\lambda T_{,i}) = q_n, \quad (2.3)$$

де q_n – нормальна складова вектора густини теплового потоку $q = -\lambda \nabla T$, що визначається законом Фур'є, $\text{Вт}/\text{м}^2$; n – вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла;

– III роду – задані конвективні умови теплообміну (закон Ньютона-Ріхмана)

$$n_i(-\lambda T_{,i}) = \alpha(T - T_p), \quad (2.4)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; T_p – температура оточуючого середовища, К .

Система рівнянь (2.1)-(2.4) є повним формулюванням стаціонарної задачі теплопровідності ізотропного середовища.

Система стаціонарних диференціальних рівнянь задачі статичної пружності для ізотропного матеріалу включає рівняння руху й рівноваги, геометричне рівняння – тензор малих деформацій та фізичне рівняння – узагальнений закон Гука (2.5):

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0; \\ \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}); \\ \sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \varepsilon_{kk} \right), \end{cases} \quad (2.5)$$

де σ_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$ – симетричний тензор напруження другого рангу, Па;
 $\sigma_{ij,j}$, $i, j = 1, 2, 3$ – частинна похідна від тензора напруження, Па/м; ρ – густина матеріалу, кг/м³; b_i , $i = 1, 2, 3$ – вектор масових сил, наприклад, гравітаційних, Н/кг;
 ε_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$ – симетричний тензор другого рангу пружних деформацій;
 u_i , $i = 1, 2, 3$ – вектор переміщень, м; $u_{i,j}$, $i, j = 1, 2, 3$ – частинна похідна від вектора переміщення; E – модуль пружності, Па; ν – коефіцієнт Пуассона;
 $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j; \\ 0 & \text{при } i \neq j, \end{cases}$ – символ Кронекера.

Граничні умови для (2.5):

– переміщення або защемлення (повинно бути задано хоча б в одній точці на поверхні тіла) (2.6):

$$u_i|_{S_u} = 0, \quad (2.6)$$

де S_u – поверхня (або точка поверхні), на якій задано переміщення, м²;

– симетрії (2.7):

$$n_i u_i|_{S_{su}} = 0, \quad (2.7)$$

де n_i , $i = 1, 2, 3$ – компоненти вектора зовнішньої нормалі до поверхні тіла;

S_{su} – поверхня симетрії тіла, м²;

– зовнішній тиск (2.8):

$$(\sigma_{ij} n_j) n_i|_{S_p} = p, \quad (2.8)$$

де p – зовнішній тиск, який задано на поверхні S_p , Па;

– зовнішня сила, що прикладена в деякій точці тіла (2.9):

$$F_i^P = \int_{\Delta S_p} \sigma_{ij} n_j dS, \quad (2.9)$$

де F_i^P , $i = 1, 2, 3$ – компоненти вектора зовнішньої сили в точці P , Н;

ΔS_p – елементарна площадка поверхні тіла в околі точки P , m^2 .

Система рівнянь (2.5)-(2.9) є повним математичним формулюванням задачі статичної пружності ізотропного твердого тіла.

Співвідношення для визначення запасу міцності, що є необхідним для визначення експлуатаційної придатності вузла або деталі будь-якого обладнання.

Еквівалентні напруження σ_{eqvM} за Мізесом визначаються для пластичних тіл за формулою (2.10):

$$\sigma_{eqvM} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}, \quad (2.10)$$

де σ_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$ – компоненти тензора напруження, Па.

Запас міцності F_s пластичних матеріалів визначається за формулою (2.11):

$$F_s = \frac{[\sigma_T]}{\sigma_{eqvM}}, \quad (2.11)$$

де $[\sigma_T]$ – межа текучості матеріалу, Па; σ_{eqvM} – еквівалентне напруження за Мізесом (2.10), Па.

У випадку незв'язаної термопружної задачі для ізотропного матеріалу узагальнений закон Гука приймає дещо інший вигляд (2.12):

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\varepsilon_{ij}^e - \varepsilon_{ij}^T), \quad (2.12)$$

де $\hat{C} = C^{ijkl} = \mu(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + \lambda\delta_{ij}\delta_{kl}$ – тензор 4-го рангу пружності, Па;
 $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ і $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ – коефіцієнти Ламе, Па; ε_{ij}^e – компоненти тензора малих пружних деформацій (1); $\varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij}$ – компоненти тензора температурних деформацій; α – коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу, K^{-1} ; T_0 і T – початкова і поточна температура тіла, відповідно, К; δ_{ij} – символ Кронекера.

Рівняння (2.12) дістало назву співвідношення Дюамеля-Неймана.

У разі врахування температурного навантаження для забезпечення однозначності системи диференціальних рівнянь (2.5), (2.12), окрім ГУ (2.6)–(2.9), треба додати початкові умови у вигляді температурного навантаження, яке може бути задано як різниця $T - T_0$ для визначення початкової температурної деформації $\varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij}$.

Розглядаючи стаціонарні задачі термомеханіки твердих тіл, для яких усі параметри НДС та температура є незалежні від часу, взаємно зв'язані системи рівнянь вирішуються послідовно.

При вирішенні задачі використовувався алгоритм наведений в [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Система диференціальних рівнянь (2.1), (2.5) за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) дискретизується й представляється у вигляді двох систем алгебраїчних рівнянь високого порядку – теплопровідності й термопружності. Матричне рівняння теплопровідності:

$$[\Lambda]\{T\} = \{Q\}, \quad (2.13)$$

де $\{T\}$ – вектор вузлових температур, $[\Lambda]$ – матриця теплопровідності, яка враховує нелінійні граничні умови теплообміну та властивості теплопровідності матеріалу, $\{Q\}$ – вектор граничних та внутрішніх теплових джерел.

Відносно вузлових переміщень задача термомеханіки, формулюється:

$$[K]\{U\} = \{P\}, \quad (2.14)$$

де $[K]$ – матриця жорсткості, з врахуванням граничних умов та пружних властивості матеріалу, $\{P\}$ – вектор вузлових термосилових навантажень зумовлених дією градієнту температури внутрішніх, теплових джерел та зовнішніх сил, $\{U\}$ – вектор вузлових переміщень.

Моделювання НДС конструкції виконується в два етапи. На першому етапі розраховується задача теплопровідності. Другий етап полягає у визначенні вектору еквівалентних вузлових термосилових навантажень, враховуючи значення отриманого температурного поля та формуванні матриці жорсткості.

Вказана вище математична модель та алгоритм розрахунку реалізований в інтегрованій системі VESNA, розробленій на кафедрі ХПСМ КПІ ім. Ігоря Сікорського [32]. Дана система використовує фундаментальні закони термодинаміки та механіки, універсальні ефективні числові методи розв'язання диференціальних рівнянь. Систему доцільно використовувати для моделювання теплових та гідродинамічних процесів, розрахунків на міцність, дослідження процесів нелінійного та лінійного деформування просторових систем, виконаних з ізотропних та/або анізотропних матеріалів, методом скінченних елементів. Подальші розрахунки напружено-деформованого стану виконувались з використанням зазначеної системи.

2.2 Чисельна модель обертової печі прожарювання

У роботі розглядається обертова піч прожарювання 2,5x40 м. У розрахунковому співвідношенні корпус печі є тонкостінною циліндричною оболонкою, яка спирається на опори. Товщина корпусу становить 20 мм. Опорні елементи – бандажі – встановлені на підбандажні обичайки. Для захисту від температури газового потоку та матеріалу, корпус печі обкладено футеровкою.

Поряд з однієї опор печі на корпус встановлюється зубчасте колесо, яке передає крутний момент та, відповідно, має вагу, яка враховується при розрахунку печі.

Обертova піч прожарювання 2,5x40 м моделюється фрагментами, які являють собою наступні елементи конструкції: металевий корпус, бандажі, підбандажні обичайки, вінцева шестерня, шар листового азбесту, футеровка з шамотної та периклазо-хромітової вогнетривкої цегли.

Конструкція обертovої печі є симетричною, тому для зменшення машинного часу обрахунку, розглядається тільки половина конструкції, отримана шляхом розділу вертикальною площиною симетрії. Вага оброблюваного матеріалу становить приблизно 3-4% від загальної ваги конструкції, тому в чисельній моделі вона не враховувалась.

На Рисунок 2.1 приведена розрахункова сітка обертovої печі.

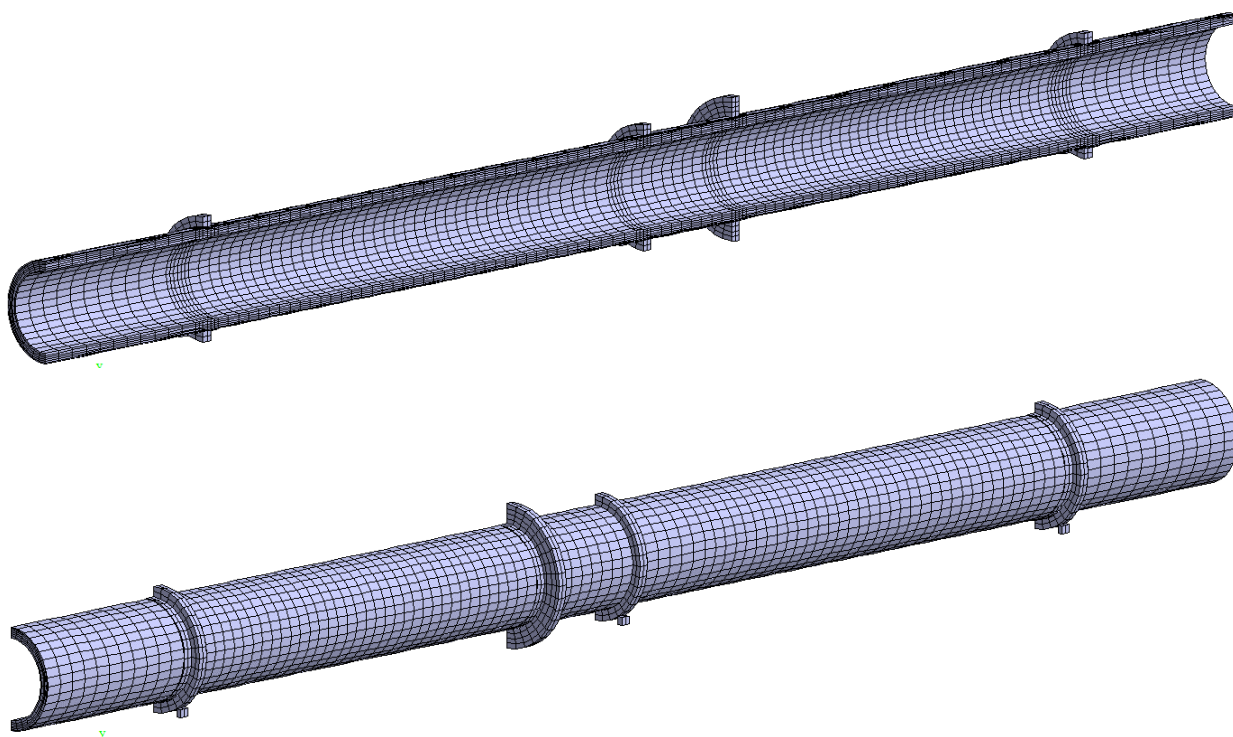


Рисунок 2.1 – Розрахункова сітка обертovої печі

Для вирішення задач теплопровідності та термопружності конструкції потрібно задати початкові та граничні умови, які зазначені в розділі 2.1 – величина теплового потоку на внутрішню поверхню футерівки, значення

розподілу температури газового середовища в середині печі, коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище від поверхні корпусу печі. Для подальшого розрахунку обертової печі прожарювання потрібно провести натурний експеримент та провести верифікацію чисельної моделі.

3 НАТУРНІ ТА ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ

3.1 Експериментальні дослідження реального стану печі

Для проведення натурних досліджень був розроблений наступний план експериментальних вимірювань, який складається з визначення:

- температури зовнішньої поверхні корпусу печі;
- теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі зовнішньої поверхні печі;
- температур газового середовища;
- температури футеровки всередині печі в доступних точках;
- температури зовнішньої поверхні корпусу барабана-охолоджувача;
- температури матеріалу, який подається в піч, всередині печі, на виході з печі та на виході з барабана-охолоджувача;
- швидкостей газових потоків в патрубках печі;
- матеріального та теплового балансу печі прожарювання;

Експериментальні дослідження виконувались за методикою описані в розділі 1.6.

Результати експериментальних досліджень приведені нижче.

Температура зовнішньої поверхні корпусу печі.

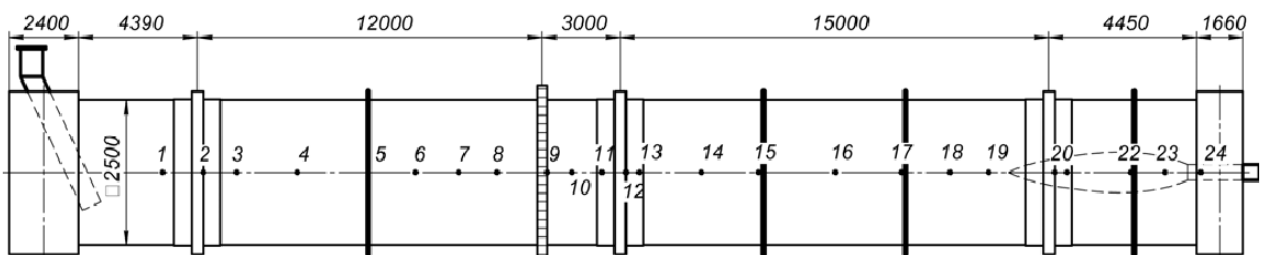


Рисунок 3.1 – Схема вимірювання температури поверхні корпусу печі

Таблиця 3.1 – Вимірювання температури в відповідних точках

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T, °C	96	72	113	120	129	135	140	142	60	182	190	86
№	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T, °C	150	166	166	180	200	200	208	115	205	200	195	85

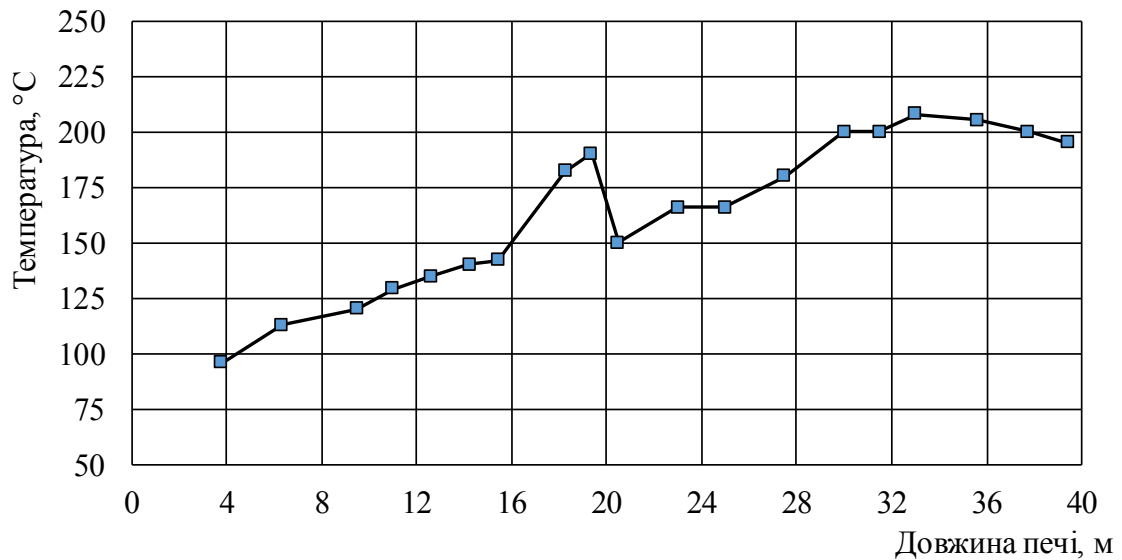


Рисунок 3.2 – Розподіл температури по зовнішній поверхні корпусу печі

Тепловий потік та коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні печі.

Таблиця 3.2 – Результати вимірювання теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі

№	1'	1''	7'	7''	19'	19''	22'	22''
u , мВ	10,5	11	17	18	23	25	27,5	28
q , Вт	821,1	860,2	1329,4	1407,6	1798,6	1955	2150,5	2189,6
$T_{\text{пов.}}$, °C	101	101	126	129	155	159	148	152
$T_{\text{нс.}}$, °C	39	39	37	37	39	39	37	37
α , Вт/(м ² К)	13,2	13,9	14,9	15,3	15,5	16,3	19,4	19,0

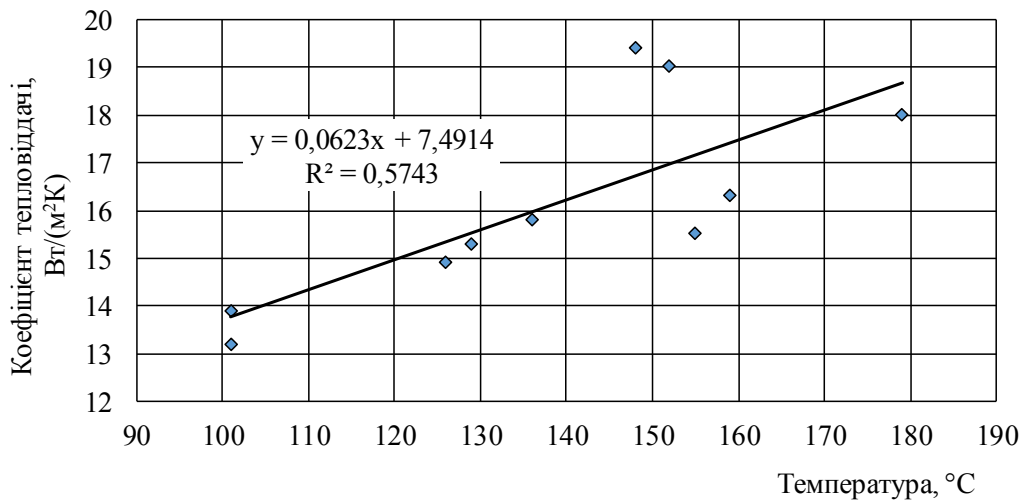


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури зовнішньої поверхні корпусу печі прожарювання

Температура газового середовища в завантажувальній головці печі.

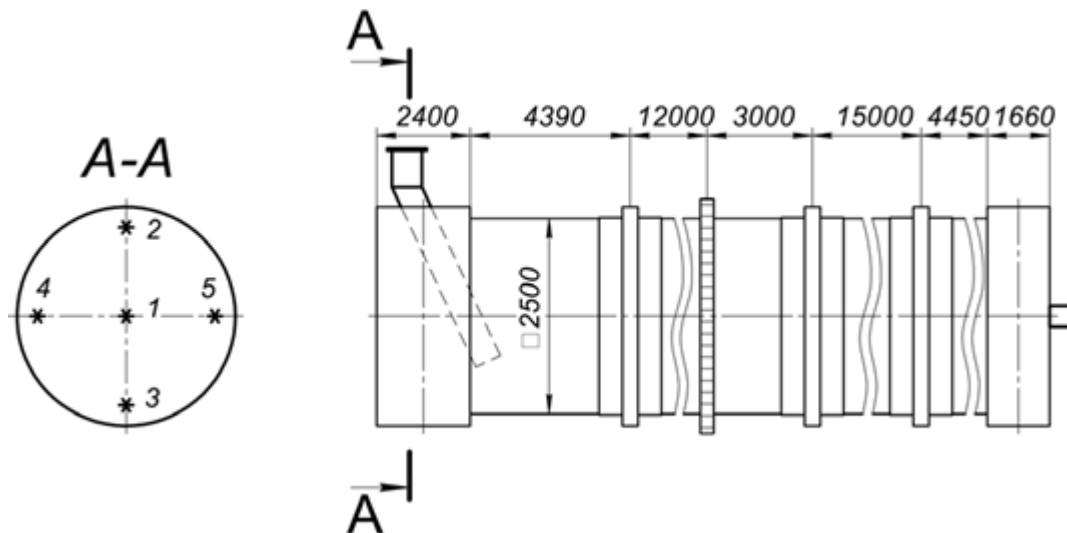


Рисунок 3.4 – Схема вимірювання температури газового середовища в завантажувальній головці печі

Таблиця 3.3 – Результати вимірювання температури газового середовища в завантажувальній головці печі

№	1	2	3	4	5	Середня	Інтегральна
T, °C	533	577	562	615	612	560	586

Розрідження в завантажувальній головці печі $P = 110$ Па

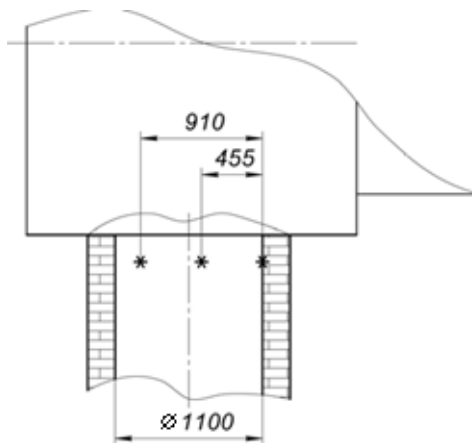


Рисунок 3.5 – Схема вимірювання температури газового середовища та внутрішньої поверхні футеровки патрубку від завантажувальної головки до пилезбірника.

Температура газового середовища, °С	563
Температура футеровки, °С	453
Швидкість газового потоку в патрубку, м/с	8,82
Витрата газового потоку в патрубку, нм ³ /год	10000

Температура газового середовища в розвантажувальній (пальниковій) головці печі.

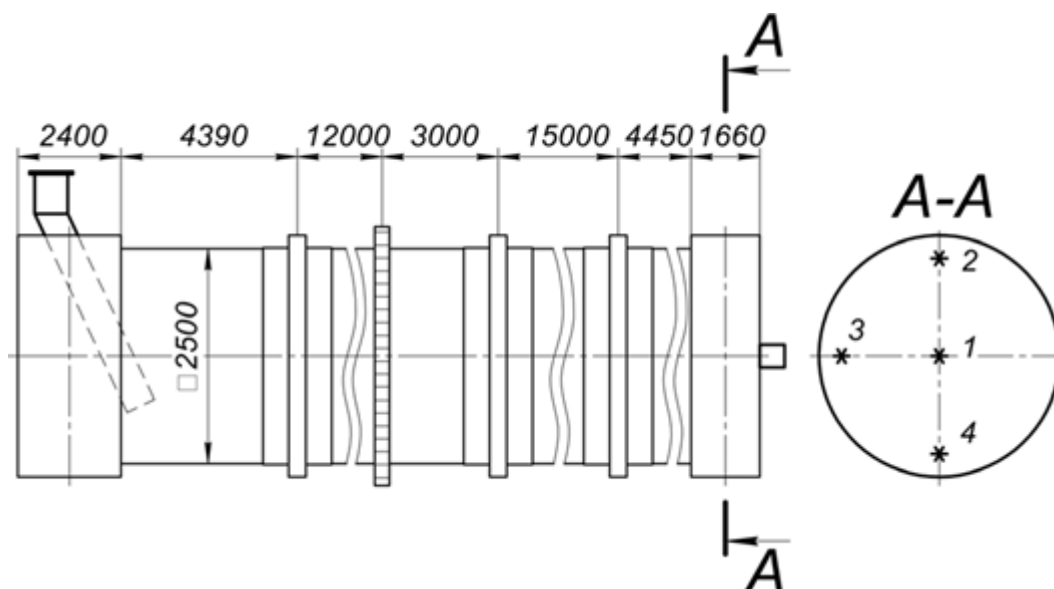


Рисунок 3.6 – Схема вимірювання температури газового середовища в пальниковій головці печі

Таблиця 3.4 – Результати вимірювання температури газового середовища в пальниковій головці печі

№	1	2	3	4	Середня	Інтегральна
T, °C	473	475	627	540	529	574

Температура внутрішньої поверхні футеровки і зовнішньої поверхні корпусу печі біля завантажувальної головки.

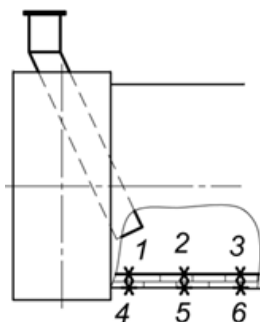


Рисунок 3.7 – Схема вимірювання температури внутрішньої поверхні футеровки і зовнішньої поверхні корпусу печі біля завантажувальної головки

Таблиця 3.5 – Результати вимірювання температури внутрішньої поверхні футеровки і зовнішньої поверхні корпусу печі біля завантажувальної головки

№	1	2	3	4	5	6
T, °C	520	510	525	195	105	102

Температура внутрішньої поверхні футеровки та зовнішньої поверхні корпусу печі біля розвантажувальної головки.

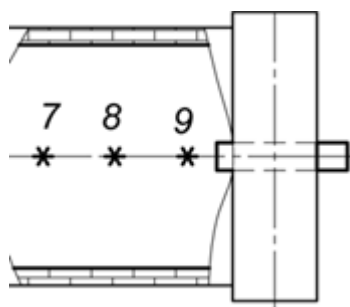


Рисунок 3.8 – Схема вимірювання температури внутрішньої поверхні футеровки біля розвантажувальної головки

Таблиця 3.6 – Результати вимірювання температури внутрішньої поверхні футеровки біля розвантажувальної головки

№	7	8	9
T, °C	980	955	930

Температура двокомпонентного середовища (матеріал та газ) в тічці розвантажувальної головки печі.

$$T = 954 \text{ } ^\circ\text{C}$$

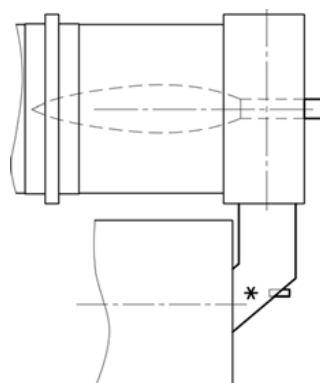


Рисунок 3.9 – Схема вимірювання температури двокомпонентного середовища (матеріал та газ) в тічці розвантажувальної головки печі

Температура зовнішньої поверхні корпусу барабана-охолоджувача.

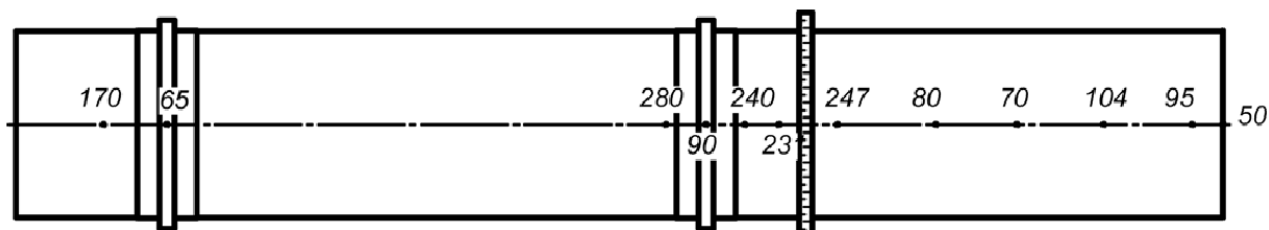


Рисунок 3.10 – Схема вимірювання температури зовнішньої поверхні корпусу барабана-охолоджувача

Температура та характеристика вхідного та вихідного матеріалу.

Таблиця 3.7 – Результати вимірювання температури та характеристик вхідного та відхідного матеріалу з печі прожарювання та відхідного матеріалу з барабана-охолоджувача

Матеріал: антрацит	Вхід в піч	Вихід з печі	Вихід з барабана
Температура, $^\circ\text{C}$	21	1065-1104	127
Питомий електричний опір, мкОм·м	4991	1162	1088
Густина істинна, кг/м^3	1780	1840	1840
Густина удавана, кг/м^3	989,4	1071	1071

Вміст золи, %	5,8	4,8	4,2
Вміст летючих, %	1,8	1,0	0,9
Вміст сірки, %	1,3	1	1
Вологість, %	4	0	0

Таблиця 3.8 – Гранулометричний склад вхідного матеріалу в піч

+25	20	15	12	10	8	6	4	2	1	0,5	0,16	0,07	залиш.	втрат.
56,4	6,1	4,7	9,1	8,2	4,4	3,6	2,4	1	0,3	0,2	0,1	0	3,5	0,2

Максимальна температура матеріалу в печі зафіксована термометричними кільцями (див. розділ 1.6): $T = 1240...1250$ °С

Таблиця 3.9 – Гранулометричний склад відхідного матеріалу з печі

25	20	15	12	10	8	6	4	2	1	0,5	0,16	0,07	зал.	втр.
0	17,5	12,8	14,6	6,0	5,5	7,3	8,3	10,4	7,5	6,0	3,6	0	0,2	0,2

Таблиця 3.10 – Гранулометричний склад відхідного матеріалу з барабану

25	20	15	12	10	8	6	4	2	1	0,5	0,16	0,07	зал.	втр.
0	20,7	34,5	9,3	9,8	43,3	5,3	2,7	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	3,5	0,2

Таблиця 3.11 – Матеріальний баланс печі прожарювання

Параметр	Вхід в піч		Вихід з печі		Вихід з барабану	
	%	кг	%	кг	%	кг
Волога	4,3	313,9	0		0	
Зола	5,8	423,4	4,8	280,3	4,2	243,4
Сера	1,3	94,9	1	58,4	1	58,0
Летючі	1,8	131,4	1	58,4	0,9	52,2
Водень	2,37	173,0	2,37	138,4	2,37	137,3
Вуглець	84,43	6163,4	90,83	5304,3	91,53	5304,3
Разом	100	7300	100	5839,8	100	5795,2

Таблиця 3.12 – Матеріальний баланс по вуглецю

Вхід в піч		Угар		Винесення пилу в газотрансп. систему		Вихід з барабана	
%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
100	6163,4	12,48	769,1	1,46	90,0	86,06	5304,3

Таблиця 3.13 – Тепловий баланс печі прожарювання

ВИХІДНІ ДАНІ			%
Кількість продукту, який завантажується, кг/год		7300	
Кількість вологи в матеріалі, %		4,3	
Вихід готової продукції, кг/год		5795,2	
Фактична витрата газу, м ³ /год		192	
Температура повітря, яке затягується в піч, °С		22	
Температура матеріалу, який завантажується, °С		22	
Температура газу в завантажувальній головці, °С		574	
Коефіцієнт надлишку повітря		1,09	
Кількість пилу, який виходить з печі, кг/год		90	
Кількість пилу, який потрапив в газохід, кг/год		20	
РОЗРАХУНКОВІ ДАНІ			
Вихід готової продукції, %		79,4	
Кількість матеріалу, який згорає, м ³ /год		895,7	
Теплота згорання природного газу, кДж/м ³		34050	
Теплота згорання летючих, кДж/кг		3431	
Теплота згорання матеріалу, кДж/кг		29290	
Теор. к-сть повітря на згорання газу, м ³ /м ³		9,9	
Теор. к-сть повітря на згорання летючих, м ³ /м ³		0,8	
Теор. к-сть повітря на згорання матеріалу, м ³ /м ³		8,04	
Об'єм повітря, яке потрапляє в піч, м ³ /год		7911,58	
Об'єм відхідних з печі газів, м ³ /ч (за н.у.)		18400	
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ ПЕЧІ			
ПРИБУТОК ТЕПЛОТИ			
Теплота згорання природного газу, Вт	Q01	1562688	19,58
Фізична теплота повітря, яке потрапляє в піч, Вт	Q02	54301,28	0,68
Фізична теплота газу, який потрапляє в піч, Вт	Q03	1381,23	0,02
Фізична теплота матеріалу, Вт	Q04	37965,84	0,48
Теплота згорання матеріалу, Вт	Q05	6269900	78,57
Теплота згорання летючих, Вт	Q06	53874	0,68
Загальний прибуток теплоти, Вт	Qп	7980110,4	
ВИТРАТИ ТЕПЛОТИ			
Витрати теплоти з матеріалом після барабана, Вт	Q07	204928,01	2,74
Витрати теплоти на випаровування вологи, Вт	Q08	205428,72	2,74
Втрати теплоти з відхідними газами, Вт	Q09	3432520	45,82
Втрати теплоти від хімічного недопалу, Вт	Q10	9446,56	0,13
Втрати теплоти теплопровідністю в н.с., Вт	Q11	1732391	23,13
Втрати теплоти з пилом, Вт	Q12	21278,18	0,28
Втрати теплоти з барабана-охолоджувача, Вт	Q13	1885051,6	25,16
Сумарні втрати теплоти, Вт	Qв	7491044,1	

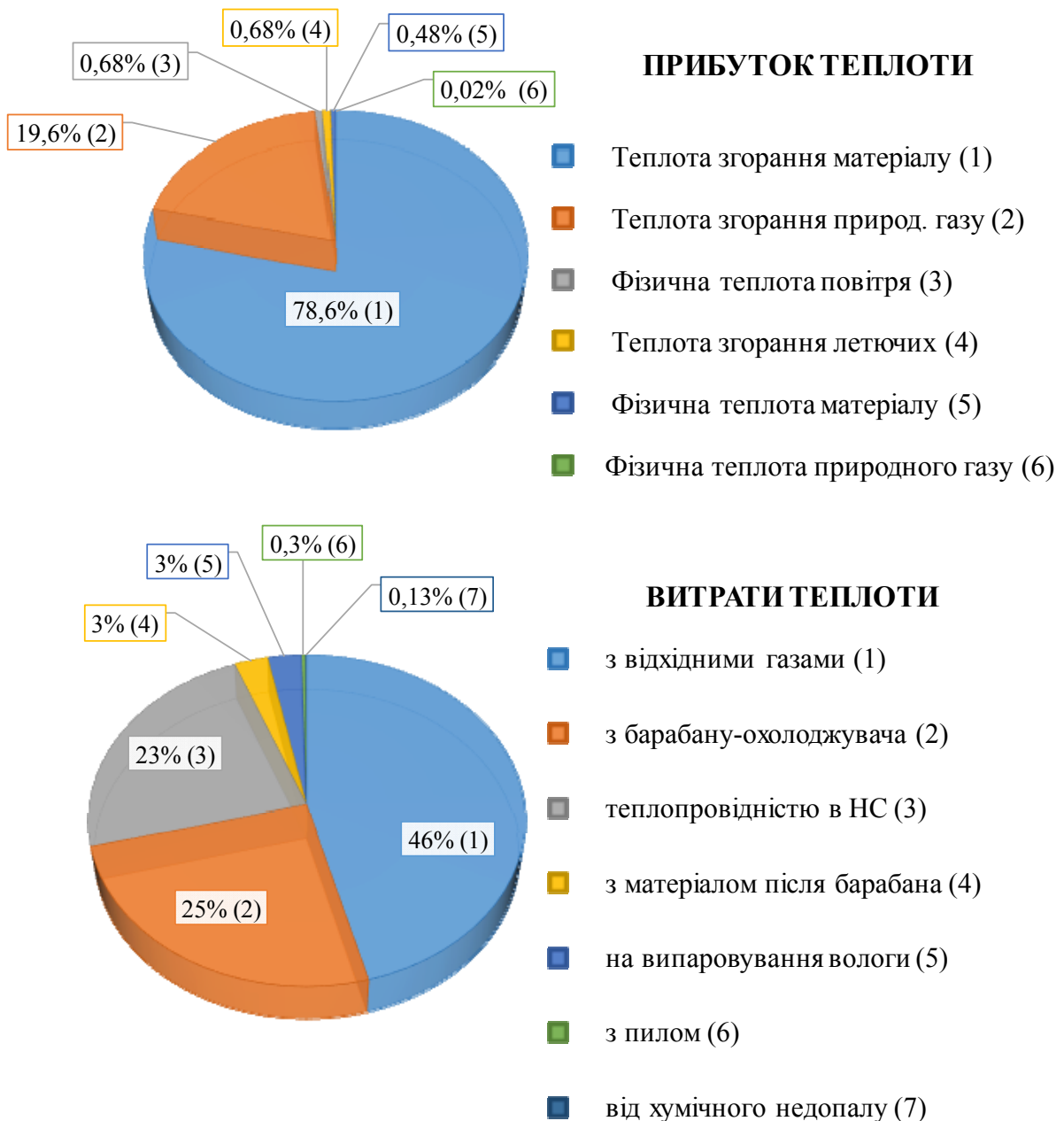


Рисунок 3.11 – Статті теплового балансу печі прожарювання

На підставі вище наведених даних матеріального і теплового балансів печі прожарювання можна зробити наступні висновки:

- угар матеріалу становить 12,4 %;
- в печі існує 2 джерела теплоти – від згорання природного газу (20%) і від згорання матеріалу (78%), що практично в 4 рази вище, ніж від згорання природного газу.

Виділена в печі теплота втрачається:

- з димовими газами – 46%;
- в барабані-охолоджувачі – 28% (25% + 3%);
- в навколишнє середовище від поверхні печі – 23%.

Складений тепловий баланс вочевидь підтверджує проблему рекуперації теплоти обертових печей та актуальність даної роботи.

3.2 Верифікація чисельної моделі

Як зазначено в розділі 2.2 створена чисельна модель потребує верифікації з натурними експериментами, результати досліджень яких наведені в розділі 3.1. Налаштування чисельної моделі виконувалась шляхом ітераційних розрахунків, при яких змінювався графік температури газового потоку всередині печі та проводилось співставлення отриманих розрахункових даних зовнішньої температури корпусу печі з даними натурального дослідження.

Теплообмін в навколишнє середовище від відкритих поверхонь корпусу, бандажів і вінцевої шестерні задавався відповідно до залежності, отриманої в результаті експериментальних досліджень (див. Рисунок 3.3):

$$\alpha_{ef} = 0,0623T + 7,7914 \quad (3.1)$$

де T – температура поверхні кожуха барабана-охолоджувача, °С.

Результати розрахунку налаштованої чисельної моделі приведено на Рисунок 3.12.

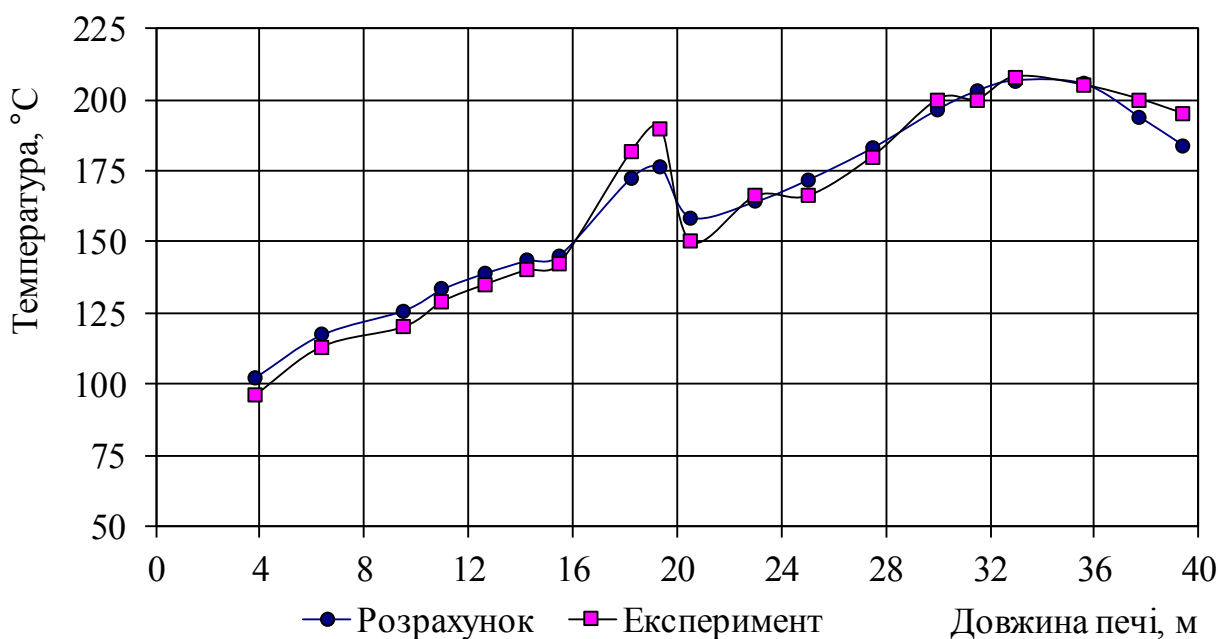


Рисунок 3.12 – Результати співставлення розрахункових даних з даними натурального експерименту по зовнішній температурі кожуха печі прожарювання

Результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними (відмінності розрахункових і експериментальних даних не перевищує 5%), що дозволяє застосовувати модель для оцінки придатності розроблюваних технічних рішень.

Отримана в результаті корекції чисельної моделі температура газового потоку всередині печі наведена на Рисунок 3.13.

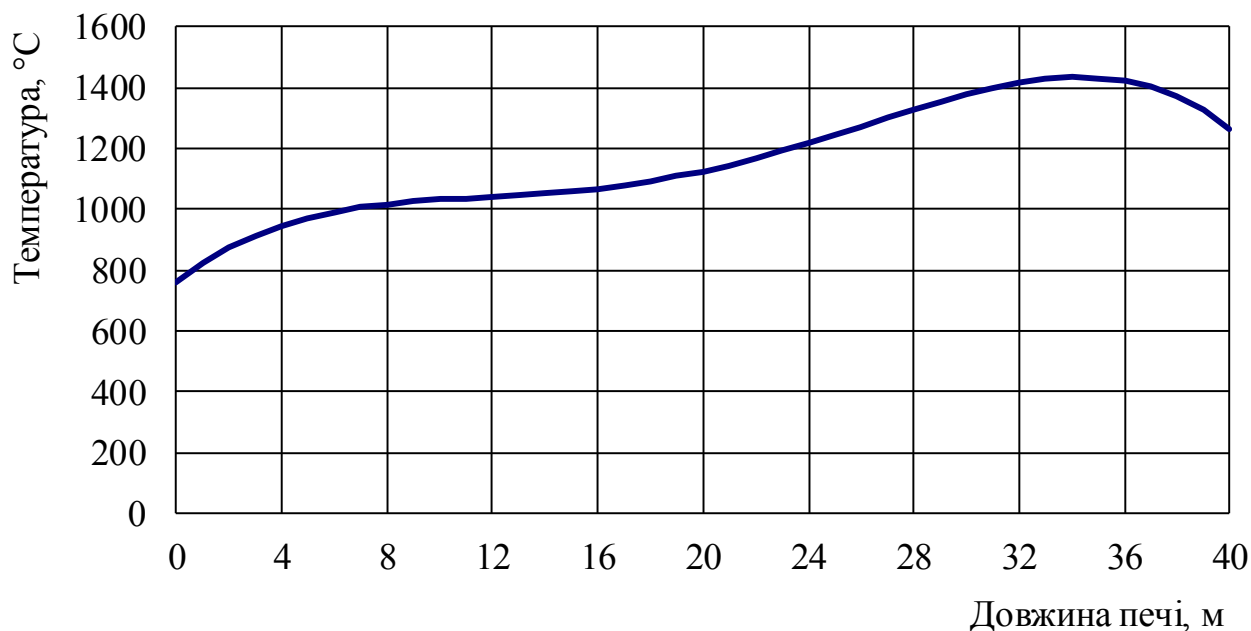


Рисунок 3.13 – Розрахункова температура газового потоку всередині печі

3.3 Тепловий стан печі прожарювання

Розрахунковий розподіл температури по металевому корпусу печі прожарювання наведено на Рисунок 3.14.



Рисунок 3.14 – Температура корпусу печі прожарювання

Графік зміни температури поверхні корпусу печі прожарювання приведено на Рисунок 3.15.

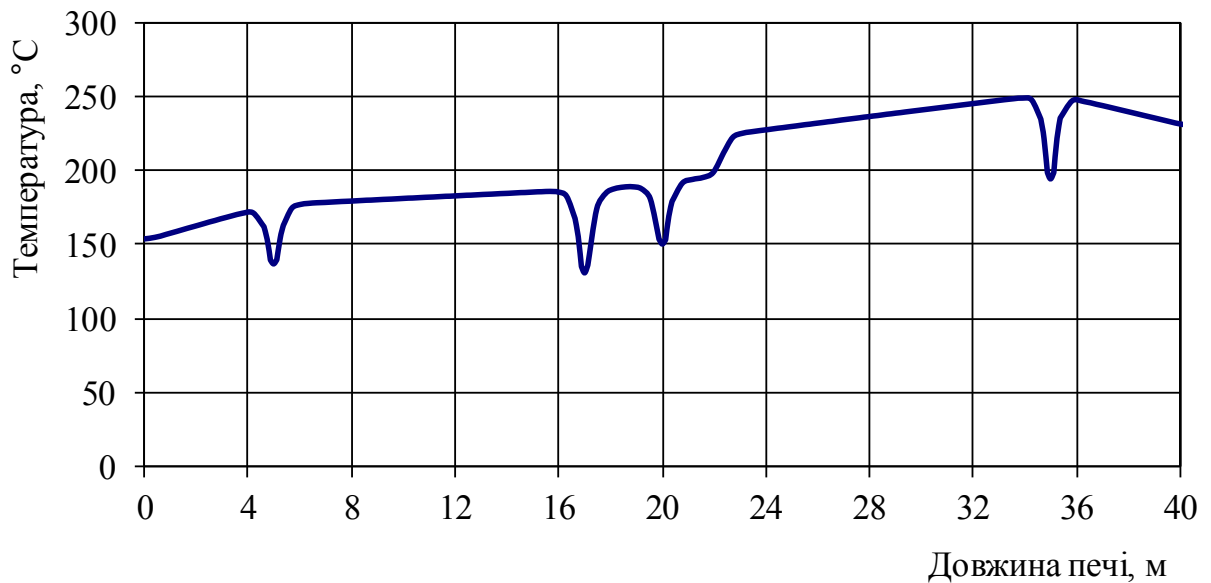


Рисунок 3.15 – Графік зміни температури корпусу печі прожарювання

З графіка видно, що в місцях установки бандажів і вінцевої шестерні спостерігається локальне зменшення температури, що викликано збільшенням металевої поверхні конструкції в цих місцях. Більш висока температура корпусу з 22 по 40 м пояснюється як більш високою температурою газового потоку так і

різним термічним опором вогнетривкої футеровки в цих зонах (до 22 м – шамотна, з 22 м по 40 м – периклазо-хромітова і шамотна).

3.4 Напружено-деформований стан печі прожарювання

Переміщення металевого корпусу печі, з коефіцієнтом масштабування $K=500$, приведено на Рисунок 3.16.

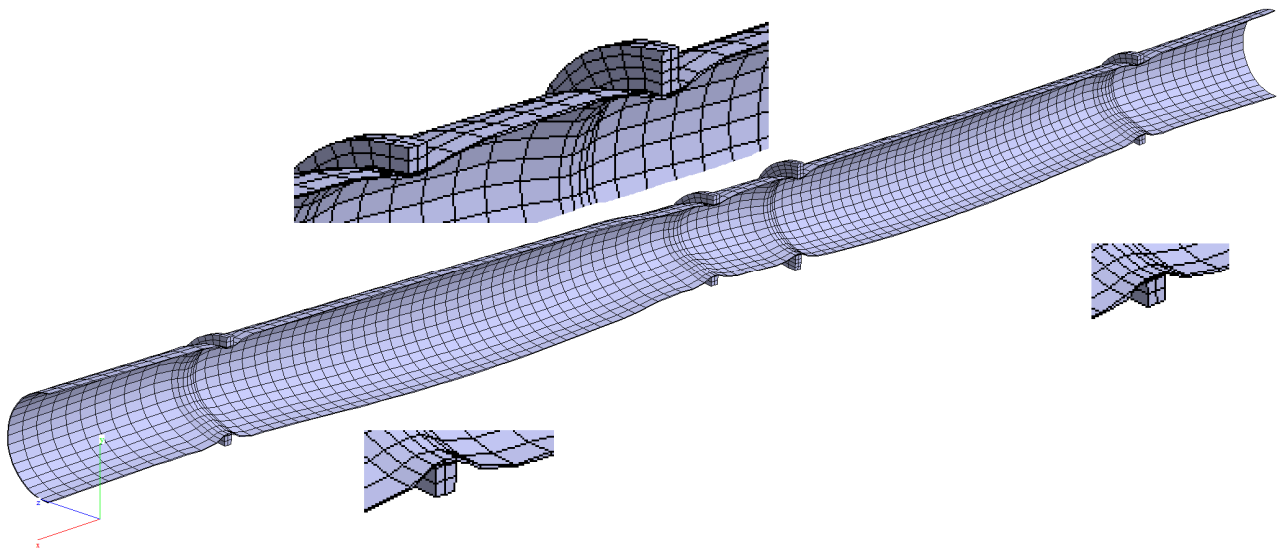


Рисунок 3.16 – Деформація корпусу печі прожарювання ($K=500$)

Головні напруження в корпусі обертової печі приведені на Рисунок 3.17.

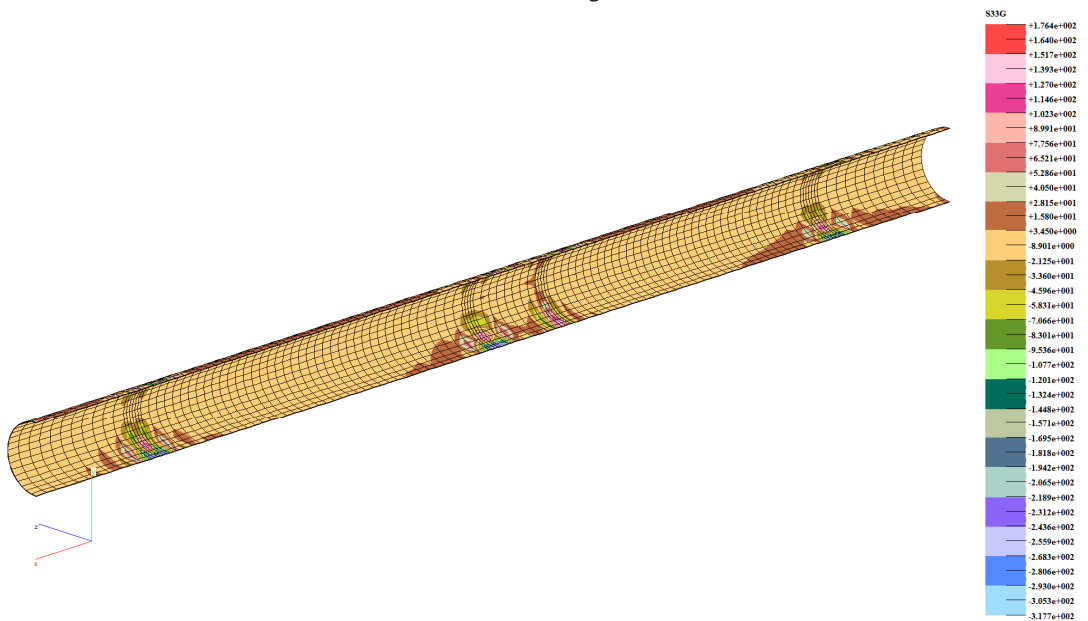
Видно, що основні зони напружень виникають в місцях установки бандажів і вінцевої шестерні, особливо в місці контакту бандажів з опорними роликами.



a



б



б

Рисунок 3.17 – Головні напруження в корпусі печі прожарювання
Результати обробки кінцевих елементів приведені на Рисунок 3.18.

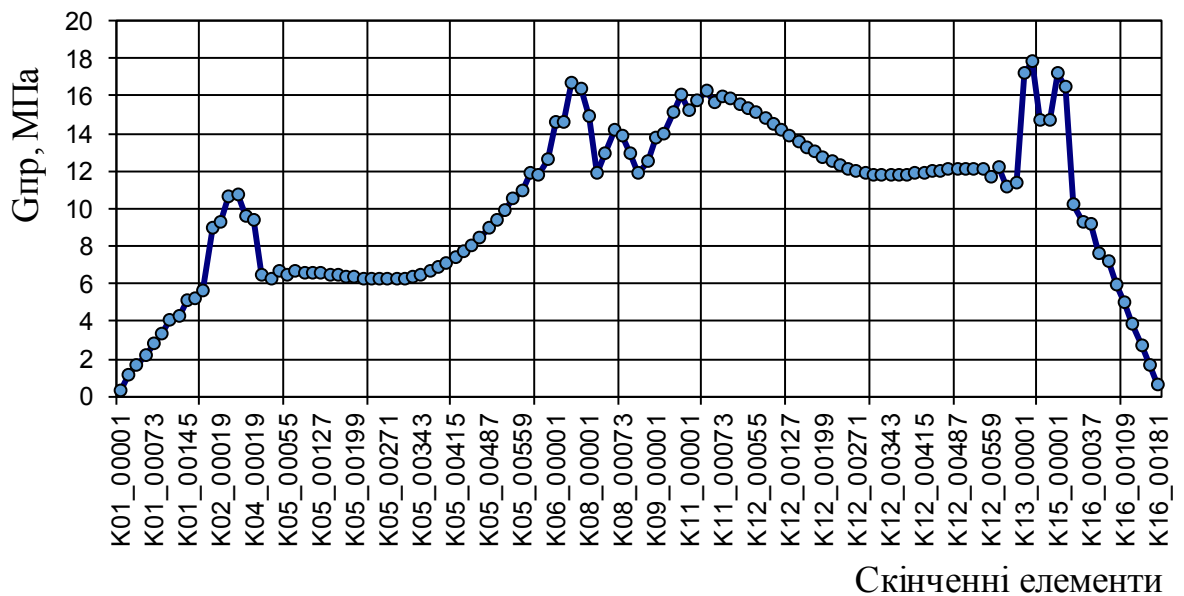


Рисунок 3.18 – Еквівалентні напруження в корпусі печі прожарювання

На базі розробленої моделі була створена аналогічна чисельна модель барабану-охолоджувача. За допомогою якої було визначено розподіл температури матеріалу в середині барабану-охолоджувача. Отримана в результаті корекції чисельної моделі температура матеріалу по довжині барабану-охолоджувача зображена на Рисунок 3.19.

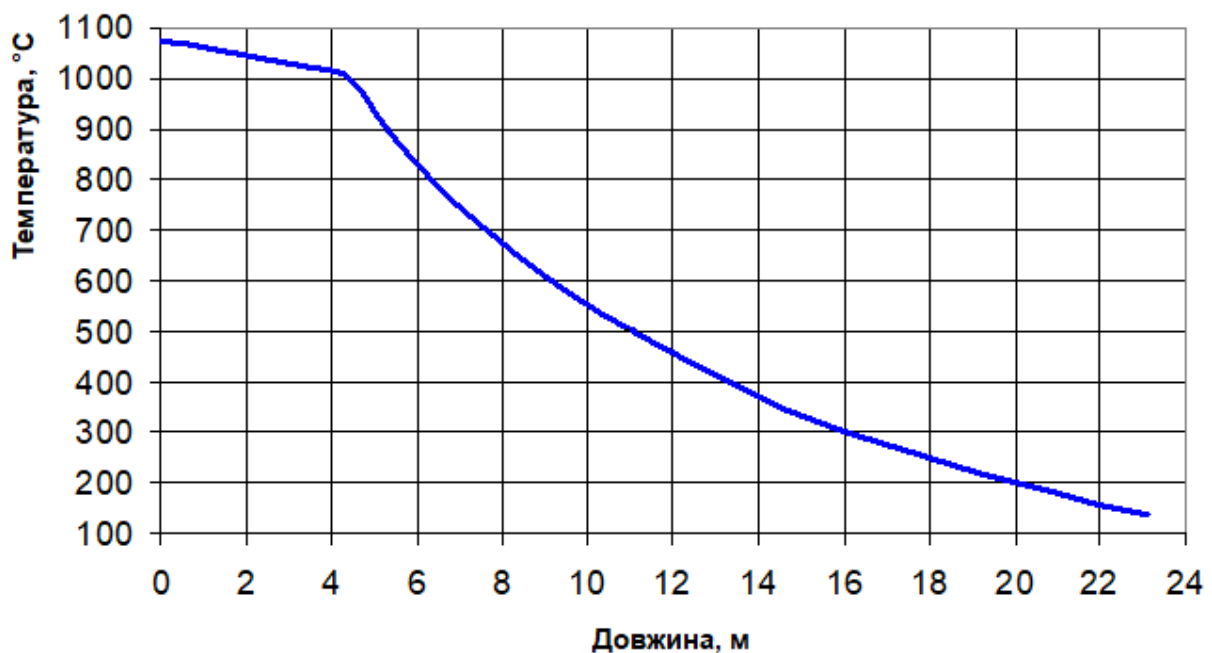


Рисунок 3.19 – Температура матеріалу по довжині барабану-охолоджувача

3.5 Висновки до розділу 3

Проведено натурні дослідження за відповідним планом. Процес прожарювання вуглецевого матеріалу характеризувався:

- продуктивністю за загрузкою – 7300 кг/год, за вигрузкою – 5300 кг/год;
- угаром вуглецю в процесі прожарювання – 12,4%;
- температурою вхідного матеріалу – 21 °С; температурою прожареного матеріалу на виході з печі – 1065-1104 °С; температурою прожареного матеріалу на виході з барабана охолоджувача – 127 °С; максимальна зафіксована температура матеріалу – 1250 °С;
- коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні корпусу печі 13-19 Вт/(м²К);
- середня температура газового середовища в завантажувальній головці становить 586 °С; в пальниковій головці – 574 °С;
- температура внутрішньої поверхні футеровки біля завантажувальної головки – 520-540 °С; біля пальникової головки – 930-980 °С;
- визначена довжина зони охолодження в печі прожарювання.

На підставі наведеного матеріального і теплового балансів печі прожарювання можна виділити наступне:

- угар матеріалу становить 12,4 %;
- в печі існує 2 джерела теплоти – від згорання природного газу (20%) і від згорання матеріалу (78%), що практично в 4 рази вище, ніж від згорання природного газу.

Виділена в печі теплота втрачається: з димовими газами – 46%, в барабані-охолоджувачі – 28% (25% + 3%), в навколишнє середовище від поверхні печі – 23%. Що вочевидь підтверджує проблему рекуперації теплоти обертових печей та актуальність роботи.

Розроблена чисельна модель тепломеханічного стану печі прожарювання.

Наведено розрахунковий графік розподілу температури корпусу печі. Результати розрахункових полів температур по поверхні корпусу печі добре узгоджується з експериментальними даними (похибка не перевищує 5%).

4 ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

Наведений тепловий баланс обертової печі при прожарюванні вуглецевмісного матеріалу (Рисунок 1.3) показує, що найбільші втрати теплоти спостерігаються з газами, що відходять, з поверхні кожуха печі та з вихідним матеріалом.

З огляду на потребу виробництва в високій температурі газів, що відходять (для подальшого використання в котлах утилізаторах), для підвищення енергетичної ефективності печі слід розглядати тільки зменшення теплових втрат з поверхні кожуха печі і з вихідним матеріалом.

З проведеного літературного огляду очевидно, що найбільш ефективно зменшити теплові втрати:

- з вихідного матеріалу за рахунок рекуперації теплоти шляхом підігріву повітря, що подається на згорання природного газу та матеріалу, який прожарюється, або шляхом утворення синтетичного газу, який затягнеться в піч на згорання;
- з поверхні печі можна або за рахунок збільшення термічного опір футерування печі, або за рахунок рекуперації теплоти.

4.1 Рекуперація теплоти відхідного матеріалу

4.1.1 Підігрів вторинного повітря в барабані-охолоджувачі

Для цього вторинне повітря необхідно пропустити через барабан-охолоджувач. З огляду на той факт, що матеріал в барабан-охолоджувач потрапляє з температурою 1000 °С і охолоджується до 100 °С, нагрів і відбір повітря необхідно проводити в зоні де температура матеріалу нижче 500 °С, що

виключить горіння і окислення матеріалу. З цією метою пропонується модернізувати барабан-охолоджувач згідно – Рисунок 4.1.

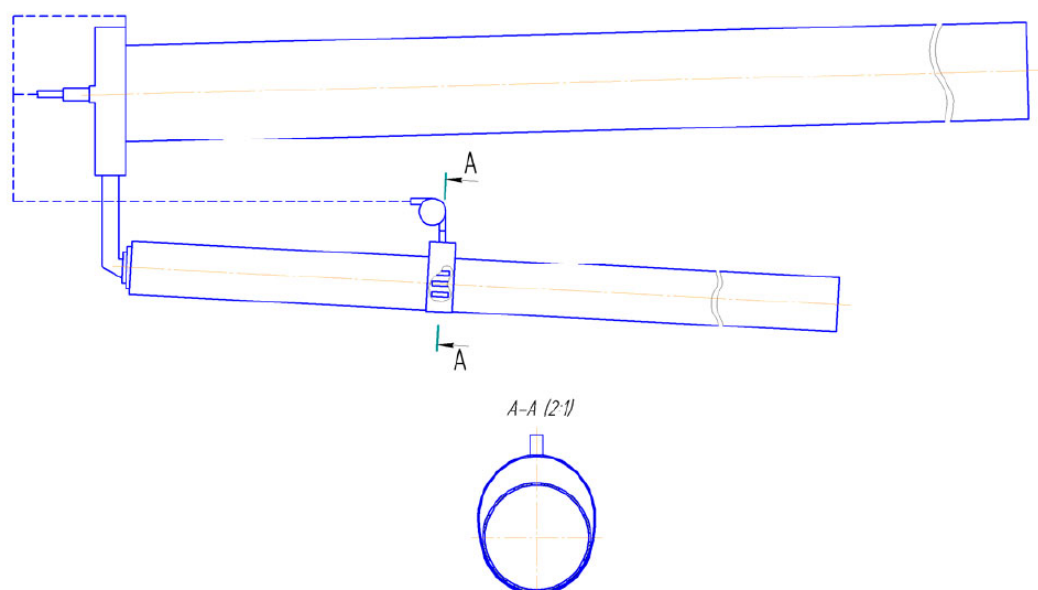


Рисунок 4.1 – Схема підігріву вторинного повітря для горіння

На кожусі барабана-охолоджувача, в зоні, де температура матеріалу не перевищує температуру його окислення (500 °С) виконати вирізи для відбору гарячого повітря, які перекрити еліпсоподібним повітрязбірним дзвоном. Далі повітря компресором подається в гарячу головку печі та витрачається на згорання матеріалу.

Для того, щоб дізнатися скільки теплоти можливо забрати від прожареного матеріалу продувом повітрям над цим матеріалом, був проведений відповідний розрахунок в системі комп'ютерної алгебри – MathCad, який наведено в Додатку А, методика розрахунку запропонована в [16]. Результати роботи цієї програми приведені нижче.

Кількість теплоти яку можна відібрати від матеріалу, що прожарюється визначається за формулою.

$$Q = \alpha \Delta T S = 125 \text{ кВт}, \quad (4.1)$$

де Q – тепловий потік, кВт, α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);
 ΔT – різниця температур, К; S – площа бічної поверхні барабана, м².

Коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою (4.2):

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{D_g} = 8,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (4.2)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² · К); Nu – число Нусельта;

λ – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м · К);

D_g

– еквівалентний діаметр, м.

Число Нусельта для повітря (або двохатомних газів) при турбулентному режимі розраховується за формулою (4.3):

$$Nu = 0,032 Re^{0,8}, \quad (4.3)$$

де Re – число Рейнольдса, що базується на відношенні інертності руху течії флюїду до його в'язкості, розраховується за формулою (4.4):

$Re = \frac{V D_g}{\nu}$

(4.4)

де V – сумарна швидкість повітря та матеріалу в барабані-охолоджувачі, м/с; D_g – еквівалентний (гідралічний) діаметр, м; ν – кінематична в'язкість для повітря, м²/с.

Швидкість лінійного переміщення матеріалу в барабані-охолоджувачі визначається за формулою (4.5):

(4.5)

v

де v – швидкість лінійного переміщення матеріалу в барабані-охолоджувачі, м/с; L – довжина в барабані-охолоджувачі, де температура матеріалу менша ніж 500 °С, м; t – час, за який матеріал проходить відстань L , с; визначається за формулою (4.6):

(4.6)

де β – кут природного укосу; φ – кут нахилу барабана-охолоджувача; n –

D

число обертів барабана-охолоджувача, об/с; D – діаметр барабану, м.

Швидкість повітря в барабані-охолоджувачі розраховується відношенням витрати повітря, що подається в піч, та площі поперечного перерізу барабана без матеріалу, за формулою (4.7):

(4.7)

Q

де $v_{\text{воз}}$ – швидкість повітря в барабані-охолоджувачі, м/с; Q – витрати

S

повітря, яке необхідно подати в піч, м³/с; S – площа поперечного перерізу барабана без урахування матеріалу, м², визначається за формулою (4.8):

(4.8)

де $S_{bar} = \frac{\pi D_{bar}}{2}$ – площа поперечного перерізу барабана, м²; S_{mat} – площа поперечного перерізу матеріалу, м².

Площа поперечного перерізу матеріалу визначається за формулою (4.9):

$$S_{mat} = \frac{Q_{mat}}{V_{mat} \cdot \rho_{nas}}, \quad (4.9)$$

Де Q_{mat} – продуктивність печі на виході, кг/с; V_{mat} – швидкість лінійного переміщення матеріалу в барабані-охолоджувачі, м/с; ρ_{mat} – насипна густина прожареного матеріалу, кг/м³.

4.1.2 Утворення синтез-газу

4.1.2.1 Зони газифікації

На підставі проведеного аналізу літературних джерел, геометрії і принципів роботи обертових печей прожарювання вуглецевого матеріалу були визначені можливі зони газифікації вуглецевого матеріалу, який прожарюється (Рисунок 4.2).

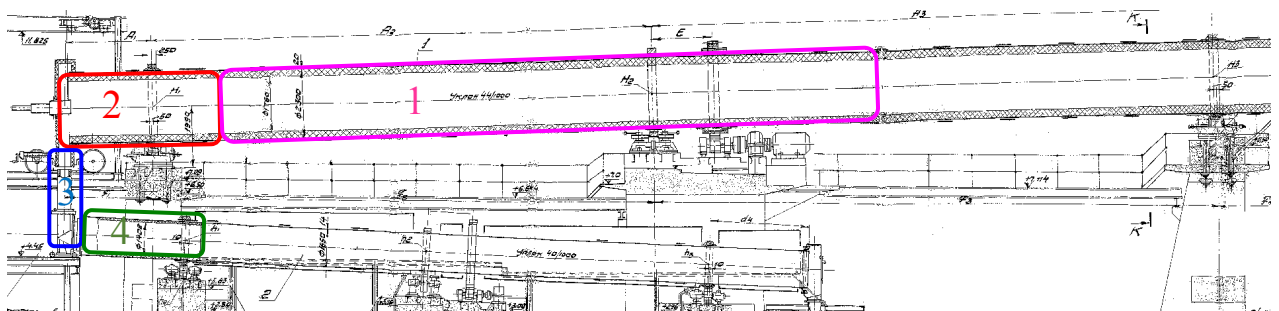


Рисунок 4.2 – Можливі зони газифікації

Зона 1 – зона всередині обертової печі прожарювання в області нагріву і витримки матеріалу, який прожарюється, температура якого перевищує 680 °С. Так як газифікація водяною парою відбувається з природнім відбором теплоти, в зоні 1 можлива газифікація тільки шляхом кисневого або повітряного дуття, за рахунок неповного згорання вуглецю. Отримані продукти газифікації можуть відбиратися на холодному торці печі і транспортуватися в зону горіння, або допалюють з виділенням теплоти в котлах-утилізаторах.

Зона 2 – зона всередині печі прожарювання в області охолодження прожареного матеріалу з температурою понад 1250 °С. Так як в зоні 2 прожарений матеріал повинен охолоджуватися, то більш раціональним методом його газифікації є парове дуття, при цьому пара повинна подаватися проти ходу матеріалу. Отримані продукти газифікації самоходом будуть затягуватися всередину печі в зону витримки і нагріву матеріалу, який прожарюється, де будуть догорати з виділенням теплоти, що призведе до зниження витрат природного газу на увесь процес прожарювання.

Зона 3 – зона переходу прожареного матеріалу ($T = 1150$ °С) з печі прожарювання в барабан-охолоджувач. Так як в зоні 3 прожарений матеріал повинен охолоджуватися, тому доцільним методом газифікації буде парове дуття, при цьому пара повинна подаватися проти ходу матеріалу. Отримані продукти газифікації будуть відбиратися на виході з патрубку, який з'єднує піч та барабан-охолоджувач, і за допомогою пальника подаватися на горіння всередину печі.

Зона 4 – зона всередині барабана-охолоджувача в області охолодження прожареного матеріалу з температурою понад 680 °С. Враховуючи, що в зоні 4 прожарений матеріал повинен охолоджуватися, раціональним методом газифікації є парове дуття, при цьому пара повинна подаватися проти ходу матеріалу. Отримані продукти газифікації будуть відбиратися на вході в тічку і за допомогою пальника подаватися на горіння всередину печі.

Газифікація в зоні 1 нераціональна, с точки зору рекуперації теплоти вихідного матеріалу, тому початкові розрахунки характеристик процесу газифікації проводяться для зон 2,3 та 4.

4.1.2.2 Розрахунки характеристик процесу газифікації

Розрахунки характеристик процесу газифікації в зазначених зонах були проведені в системі комп'ютерної алгебри – MathCad та наведені в Додатку Б. Результати роботи цієї програми приведені нижче.

Час перебування матеріалу в зоні газифікації 2 в печі прожарювання (4.10):

$$t_2 = \frac{1,77L_2\sqrt{\beta}}{\varphi n D_p}, \quad (4.10)$$

де L_2 – довжина зони газифікації в печі прожарювання, м; β – кут природного укосу матеріалу; φ – кут нахилу печі прожарювання; n – число обертів печі прожарювання, об/с; D_p – діаметр футерованої частини печі, м.

Час падіння матеріалу з обертової печі до верху зони газифікації (4.11):

$$t_{31} = \sqrt{\frac{2L_1}{g}} = 0,6 \text{ с}, \quad (4.11)$$

де L_1 – відстань від низу печі до верху зони газифікації, м; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Швидкість матеріалу на момент входу в зону реакції 3 (4.12):

$$V_1 = V_0 + gt_{31} = 5,47 \text{ м/с}, \quad (4.12)$$

де V_0 – початкова швидкість (приймаємо $V_0 = 0$ м/с).

Час падіння матеріалу від верху зони реакції до низу вертикальної частини зони реакції (4.13):

$$L_1 + L_2 = V_0(t_{31} + t_{32}) + \frac{g(t_{31} + t_{32})^2}{2}, \quad (4.13)$$

З формули (4.13) знаходимо $t_{32} = 0,248$ с.

де L_2 – середня висота вертикальної частини зони газифікації, м.

Швидкість матеріалу на момент виходу з вертикальної частини зони реакції (4.14):

$$V_2 = V_1 + gt_{32} = 7,9 \text{ м/с}, \quad (4.14)$$

Час ковзання матеріалу по перехідному носку до падіння в барабан-охолоджувач (4.15):

$$L_3 = V_2 \sin(\alpha)t_{33} + \frac{g \sin(\alpha)t_{33}^2}{2} \quad (4.15)$$

З формули (4.15) знаходимо $t_{33} = 0,148$ с.

Загальний час перебування в зоні газифікації 3:

$$t_3 = t_{31} + t_{32} + t_{33} \quad (4.16)$$

Час перебування матеріалу в зоні реакції 4 в барабані-охолоджувачі (4.17):

$$t_4 = \frac{1,77L_4\sqrt{\beta}}{\varphi n D_b}, \quad (4.17)$$

де L_4 – довжина зони газифікації в барабані-охолоджувачі, довжина футерованої частини, барабана-охолоджувача; β – кут природного укосу матеріалу; φ – кут нахилу барабана-охолоджувача; n – число обертів барабана-охолоджувача, об/с; D_b – діаметр футерованої частини барабана-охолоджувача, м.

Загальний час перебування матеріалу в 2,3 та 4 зонах реакції (4.18):

$$t_z = t_2 + t_3 + t_4 \quad (4.18)$$

Швидкість лінійного переміщення матеріалу в зоні газифікації 2 (в печі прожарювання) та зоні газифікації 4 (в барабані-охолоджувачі):

$$V_2 = \frac{L_2}{t_2} \quad (4.19)$$

$$V_4 = \frac{L_4}{t_4} \quad (4.20)$$

Площа поперечного перерізу потоку матеріалу в зоні газифікації 2 (в печі прожарювання) та зоні газифікації 4 (в барабані-охолоджувачі):

$$S_2 = \frac{Q}{V_2 \cdot \rho_{nas}} \quad (4.21)$$

$$S_4 = \frac{Q}{V_4 \cdot \rho_{nas}} \quad (4.22)$$

Кут сегмента потоку матеріалу в барабані-охолоджувачі та в печі прожарювання:

$$S_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 (\varphi_b - \sin(\varphi_b)) \quad (4.23)$$

$$S_4 = \frac{1}{2} \left(\frac{D_b}{2} \right)^2 (\varphi_b - \sin(\varphi_b)) \quad (4.24)$$

Довжина хорд в потоці матеріалу в барабані-охолоджувачі та печі прожарювання:

$$b_b = 2 \sin\left(\frac{\varphi_b}{2}\right) D_b \quad (4.25)$$

$$b_p = 2 \sin\left(\frac{\varphi_p}{2}\right) D_p \quad (4.26)$$

Маса поверхневого шару матеріалу в зонах газифікації 2 та 4 та загальну масу матеріалу, при товщині шару 10 мм:

$$m_2 = 0,01 b_h L_2 \rho_n \quad (4.27)$$

$$m_4 = 0,01 b_h L_4 \rho_n \quad (4.28)$$

$$m_s = m_2 + m_4 \quad (4.29)$$

Визначаємо загальну масу матеріалу в зоні реакції:

$$m_z = Q t_z \quad (4.30)$$

де Q – продуктивність печі за відхідним матеріалом, кг/с; t_z – загальний час перебування матеріалу в зонах газифікації, с.

Маса матеріалу, який віддає тепло на реакцію:

$$m_{tp} = m_z \quad (4.31)$$

Маса вуглецю, який вступить в реакцію для утворення синтез-газу:

$$m_C = \min \left\{ \begin{array}{l} k \int_{T_e}^{T_f} e^{\frac{-E}{Rt}} dt \frac{m_r}{T_f - T_e} t_z, \\ 0,6667 m_{H_2O} \end{array} \right. \quad (4.32)$$

де m_C – маса вуглецю, кг; k – передекспотенціальний множник константи швидкості реакції утворення синтез-газу для вугілля, с^{-1} ; R – універсальна газова стала, Дж/моль; E – енергія активації утворення синтез-газу, Дж/моль; T_f – початкова температура матеріалу в зоні газифікації, К; T_e – кінцева температура матеріалу в зоні газифікації, К; m_z – маса матеріалу, яка взаємодіє в зоні газифікації з паром, м; t_z – загальний час перебування матеріалу в зоні реакції, с.

Визначимо масу пару H_2O (4.33), необхідного для утворення синтез-газу та маси CO (4.34) та H_2 (4.35), отриманих в результаті реакції. Розрахунок проводиться виходячи з співвідношення молярних мас речовин:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_C} m_C \quad (4.33)$$

$$m_{\text{CO}} = \frac{M_{\text{CO}}}{M_C} m_C \quad (4.34)$$

$$m_{\text{H}_2} = \frac{M_{\text{H}_2}}{M_C} m_C \quad (4.35)$$

де $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – молярна маса води; M_{CO} – молярна маса газу CO ; M_{H_2} – молярна маса водню; M_C – молярна маса вуглецю.

Масові витрати речовин, які беруть участь в реакції газифікації – C , H_2O , CO , H_2 :

$$W_C = \frac{m_C}{t_z} \quad (4.36)$$

$$W_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{t_z} \quad (4.37)$$

$$W_{\text{CO}} = \frac{m_{\text{CO}}}{t_z} \quad (4.38)$$

$$W_{\text{H}_2} = \frac{m_{\text{H}_2}}{t_z} \quad (4.39)$$

Теплотворна здатність згорання синтез-газу (4.40):

$$Q_t^{SG} = Q_t^{CO} + Q_t^{H_2} \quad (4.40)$$

де Q_t^{SG} – теплотворна здатність згорання синтез-газу, Вт; Q_t^{CO} – теплотворна здатність згорання чадного газу, продукту утворення синтез-газу, яка визначається за формулою (4.41); $Q_t^{H_2}$ – теплотворна здатність згорання водню, продукту утворення синтез-газу, яка визначається за формулою (4.42).

$$Q_t^{CO} = W_{CO} \frac{Q_1^{CO}}{\rho_{CO}} \quad (4.41)$$

$$Q_t^{H_2} = W_{H_2} \frac{Q_1^{H_2}}{\rho_{H_2}} \quad (4.42)$$

де Q_1^{CO} – нижча теплота згорання оксиду вуглецю, Дж/м³; ρ_{CO} – густина оксиду вуглецю при н.у., кг/м³; $Q_1^{H_2}$ – нижча теплота згорання водню, Дж/м³; ρ_{H_2} – густина водню при н.у., кг/м³;

Теплота, яка витрачається на нагрів пари до температури реакції газифікації:

$$Q^{H_2O} = c_{H_2O} m_{H_2O} (T_m - T_{H_2O}) \quad (4.43)$$

де c_{H_2O} – теплоємність водяного пару, Дж/кг·К; m_{H_2O} – маса пари, необхідної для утворення синтез газу (4.33), кг; T_{H_2O} – температура водяного пару на вході в зону газифікації, К; T_m – середня температура матеріалу в зоні газифікації, яка визначається за формулою (4.44):

$$T_m = \frac{T_f + T_e}{2} \quad (4.44)$$

Обсяг метану за теплотворною здатністю:

$$Q_t^{CH_4} = \frac{Q_t^{SG} \cdot \rho_{CH_4}}{Q_1^{CH_4}} \quad (4.45)$$

де Q_t^{SG} – теплотворна здатність згорання синтез-газу (4.40), Дж/с; ρ_{CH_4} – густина метану при н.у., кг/м³; $Q_1^{CH_4}$ – нижча теплота згорання метану, Дж/м³.

Економія природного газу за рахунок теплоти згорання синтез-газу:

$$\frac{Q_t^{CH_4}}{Q_v^{CH_4}} \cdot 100, \quad (4.46)$$

де $Q_v^{CH_4}$ – витрата природного газу в піч прожарювання, кг/м³.

Теплота, яка витрачається на реакцію газифікації:

$$Q^{SG} = \frac{-(m_{H_2O} + m_C)}{T_f - T_e} \int_{T_e}^{T_f} (-7165100 - 718,25t + 0,1162t^2 + 0,00008t^3) dt = \quad (4.47)$$

$$= 9,8 \cdot 10^7 \text{ Дж}$$

Загальна теплота на нагрів пари і реакції газифікації:

$$Q^{H_2O+SG} = Q^{H_2O} + Q^{SG} = 1,084 \cdot 10^8 \text{ Дж}, \quad (4.48)$$

де Q^{H_2O} – теплота на нагрів пари (4.43), Дж; Q^{SG} – теплотворна здатність згорання синтез-газу (4.40), Дж.

З формули (4.48) визначаємо на скільки зміниться температура матеріалу, який прожарюється, під час реакції газифікації за формулою (4.49):

$$T_{end} = \frac{c_{ist}m_{tp}T_f - Q^{H_2O+SG}}{(m_{tp} - m_C)c_{ist}} \quad (4.49)$$

де c_{ist} – теплоємність прожареного матеріалу, Дж/м³; m_{tp} – маса матеріалу, який віддає тепло на реакцію (4.31), кг; m_C – масу вуглецю, який вступить в реакцію для утворення синтез-газу (4.32), кг.

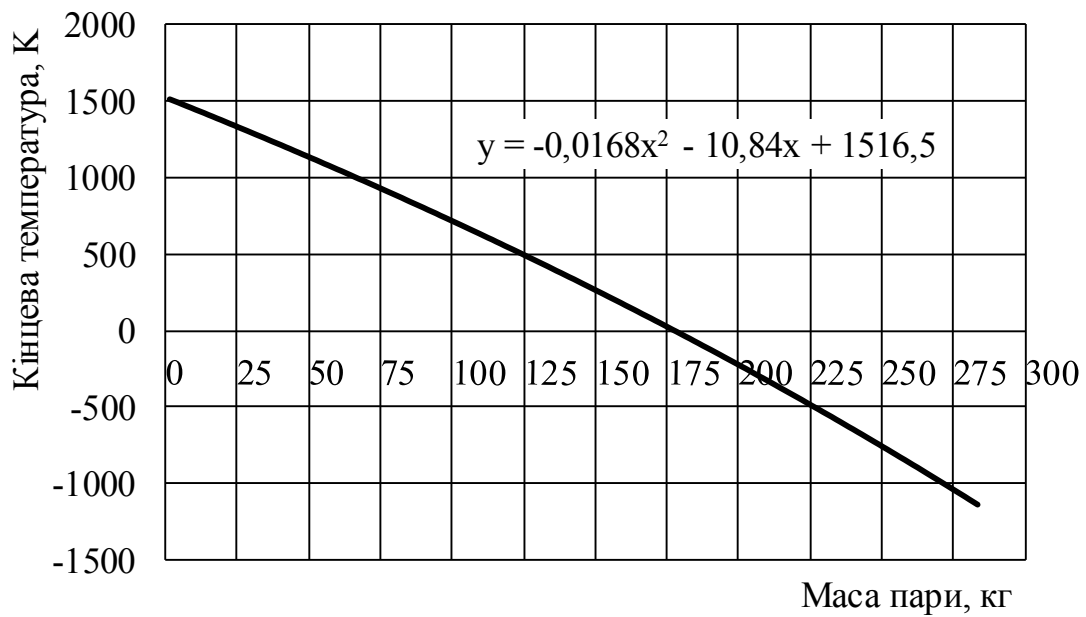


Рисунок 4.3 – Кінцева температура матеріалу від маси пари, який вступить в реакцію для генерації синтез газу

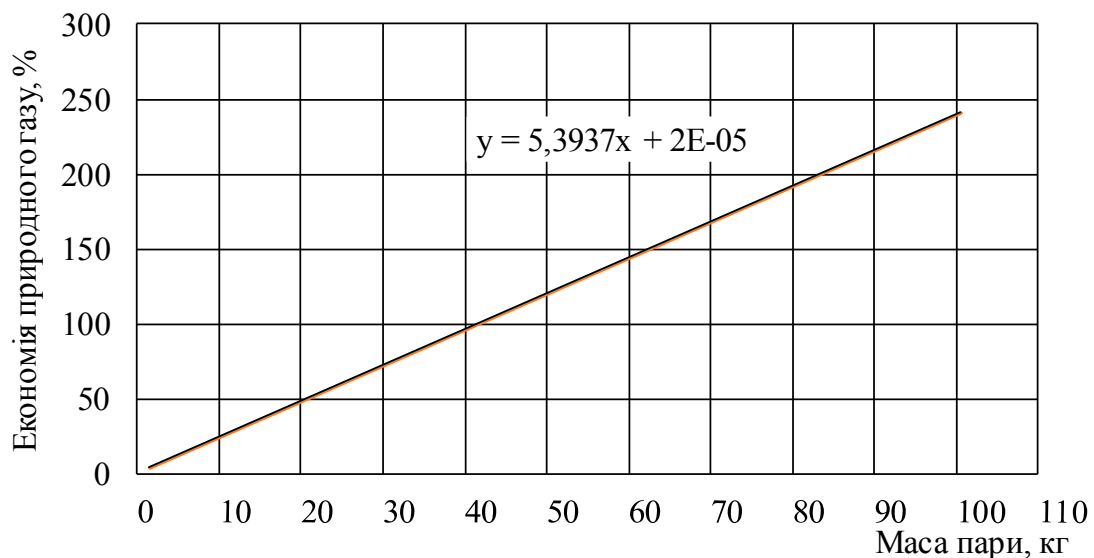


Рисунок 4.4 – Економія природного газу від маси пари, який вступить в реакцію для утворення синтез газу

Виконуючи корекцію за температурою, приймаємо $m_C = 48$ кг, так як кінцева температура прийнята $T_e = 955$ К. При такій кількості задіяного вуглецевого матеріалу, згенерується така кількість синтез газу, яка за своєю теплотворною здатністю замінить 173 % природного газу. У такому випадку, коли кількість теплоти, яку можна отримати за рахунок спалювання синтез газу більша за кількість теплоти, яка вноситься в піч при згоранні природного газу, вочевидь існує можливість зменшити масу вуглецю, який вигорає в печі на ту кількість енергії, яку можливо занести в піч, крім енергії теплоти природного газу. Розрахунки показали, що існує можливість зменшення кількості матеріалу в печі, що вигорає на 0,055 кг/с, при цьому на генерацію синтез газу буде витрачено – 0,076 кг/с.

Дані по розрахунках занесені в Таблиця 4.1.

Таблиця 4.1 – Витрати матеріалу на генерацію синтез газу за різних умов

	Витрата матеріалу на генерацію синтез-газу, кг/с	Угар	
		кг/с	%
Початкові умови	-	0,239	13,94
Тільки 100 % заміна природного газу	0,044	0,282	16,49
Використання всього тепла прожареного матеріалу	0,076	0,259	15,14

Аналіз розрахункових даних показує, що при протіканні процесу газифікації:

– ефективніше генерувати синтез-газ в повному об'ємі, теплова енергія якого знаходиться в відхідному матеріалі (витрата вуглецевого матеріалу – 272,7 кг/год);

– теплотворна здатність згорання синтез-газу

4.2 Рекуперация теплоти з поверхні кожуха обертової печі

4.2.1 Теплообмін між корпусом печі та навколишнім середовищем

Між металевим корпусом печі і навколишнім середовищем відбувається теплообмін двох видів: випромінювання та конвекція. Теплообмін випромінюванням описується відомими формулами [13, 16]. Процес конвективного теплообміну є досить складним, так як умови оточування корпусу печі повітрям змінюються залежно від швидкості обертання печі та/або метеорологічних умов. Величина теплових втрат розраховується з використанням ефективного коефіцієнта тепловіддачі зовнішньої поверхні печі шляхом інтегрування за формулою (4.50):

$$Q = \int_S \alpha_\phi (T_K - T_{HC}) dS, \quad (4.50)$$

де Q – загальні теплові втрати через корпус печі; α_ϕ – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, що враховує, як конвективну так і складову випромінювання; T_{HC} – температура навколишнього середовища; T_K – температура зовнішньої поверхні печі.

Питання теплообміну між корпусом та навколишнім середовищем розглянуті у роботах [5, 6, 11, 13, 28].

Так у [13] коефіцієнт тепловіддачі для теплового випромінювання та конвективного теплообміну визначається за залежністю (4.51):

$$\alpha_\phi = 7 + 0,045T_K, \quad (4.51)$$

де T_K – температура зовнішньої поверхні печі.

У [11] коефіцієнт тепловіддачі для конвективного теплообміну між стінкою і повітрям пропонується розраховувати за формулою (4.52):

$$\alpha_{\phi} = 5,6 + 5V_{\epsilon}, \quad (4.52)$$

де V_{ϵ} – швидкість потоку повітря при штучному охолодженні корпусу печі.

У статті [5] ефективний (конвекція і випромінювання) коефіцієнт тепловіддачі розраховується за формулою :

$$\alpha_{\phi} = a + bT_K + cT_K^2 + dV_{\epsilon}^{0,8}, \quad (4.53)$$

де a, b, c, d – емпіричні константи; T_K – температура зовнішньої поверхні печі; V_{ϵ} – швидкість потоку повітря.

У [28] розкрито найбільш повне визначення коефіцієнту тепловіддачі, який складається з конвектиної складової та випромінювання:

$$\alpha_{\phi} = a_k + a_{\epsilon} = 6,72 \cdot 10^{-3} \frac{\lambda_{\epsilon}}{D} \left(\frac{V_{\epsilon} D}{\nu} \right)^{0,905} + \frac{\epsilon_K \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (T_K^4 - T_{\epsilon}^4)}{t_k - t_{\epsilon}}, \quad (4.54)$$

При спрощених розрахунках, якщо обертова піч встановлена в закритому приміщенні, є сенс використовувати залежність запропоновану в [6]:

$$\alpha_{\phi} = 3,5 + 0,062T_K, \quad (4.55)$$

Результати порівняння коефіцієнтів тепловіддачі, отримані за залежностями (4.51) та (4.55) приведені на Рисунок 4.5.

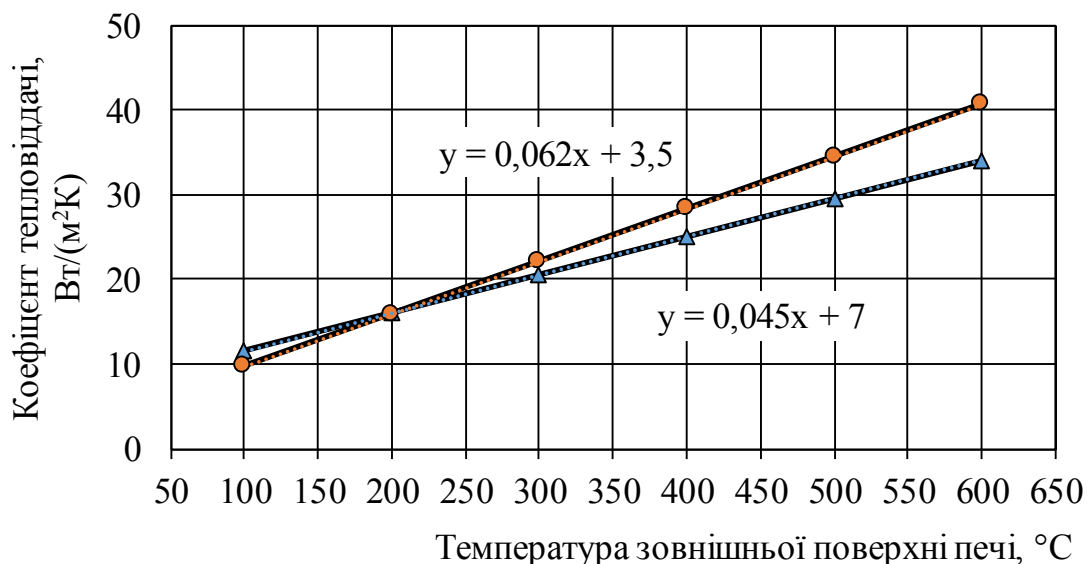


Рисунок 4.5 – Коефіцієнти тепловіддачі

Необхідно відмітити, що приведені коефіцієнти тепловіддачі являються ефективними, які враховують як втрати теплоти конвекцією так і втрати теплоти випромінюванням.

4.2.2 Рекуперації теплоти з корпусу обертової печі прожарювання

Відповідно до літературного пошуку, найбільш доцільне рішення щодо рекуперації теплоти з поверхні кожуха обертової печі є [2]. Але дане технічне рішення вимагає встановлення додаткового енергоспоживаючого обладнання – вентилятора, та рекуператора, який характеризується низькою інтенсивністю тепловіддачі. Окрім того впровадження запропонованого технічного рішення ускладнюється вузлом подачі повітря в піч, адже при подачі повітря необхідного на горіння летких та матеріалу (7550 м³/год) через типове сопло діаметром 200 мм швидкість витікання повітря становитиме близько 240 км/год, що негативно вплине на процес прожарювання.

Більш раціональним виконанням даного технічного рішення є встановлення навколо кожуха печі циліндричного каркасу в області високих температур (приблизно 15 м від гарячої головки печі) (Рисунок 4.6) при цьому простір між циліндричним каркасом та кожухом печі, який гідравлічно пов'язаний з

простором в гарячій головці печі таким чином, щоб тяга в просторі забезпечувалася завдяки тяговому режиму роботи самої печі. В свою чергу, тяговий режим самої печі забезпечується роботою димової труби.

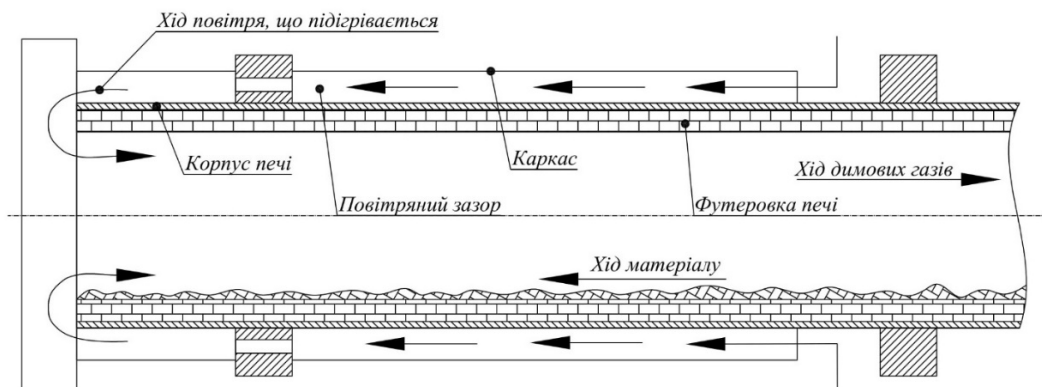


Рисунок 4.6 – Ескізне технічне рішення, щодо рекуперації теплоти поверхні корпусу печі

Вихідні дані для розрахунку:

- довжина ділянки – 15,5 м
- температура повітря на вході – 20 °С
- теоретична витрата повітря, яке необхідне для згорання летючих та угару антрациту – 7550 м³/год

Розрахунок раціональних характеристик був проведений за допомогою мови програмування С++ та наведені в Додатку В. Результати роботи цієї програми приведені нижче.

В основу пошуку раціональних характеристик технічного рішення покладено те, що теплові втрати з корпусу печі мають залишитися незмінними, а відповідно має залишитися незмінним встановлений технологічний режим роботи печі.

Описане вище можна записати в наступному вигляді:

$$q - q_{nn1} - q_{nn2} - q_{nc} = 0, \quad (4.56)$$

де q – теплові втрати від корпусу печі, Вт/м; q_{nn1} – теплові втрати на підігрів потоку повітря від корпусу печі, Вт/м; q_{nn2} – теплові втрати на підігрів

поток повітря від циліндричного каркасу, Вт/м; q_{nc} – теплові втрати в навколише середовище від циліндричного каркасу, Вт/м.

$$q = \pi d_{cm} \alpha_n (T_{cm} - T_{nc}), \quad (4.57)$$

$$q_{nn1} = \pi d_{cm} \alpha_{nn1} (T_{cm} - T_{nn}), \quad (4.58)$$

$$q_{nn2} = \pi d_o \alpha_{nn2} (T_o - T_{nn}), \quad (4.59)$$

$$q_{nc} = \pi d_o \alpha_n (T_o - T_{nc}), \quad (4.60)$$

де α_n – коефіцієнт тепловіддачі від корпусу печі в повітря, Вт/(м² · К);

α_{nn1} – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² · К);

α_{nn2} – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² · К);

T_{cm} – температура стінки корпусу, °С;

T_{nc} – температура навколишнього середовища, °С;

d_{cm} – діаметр корпусу печі, м; d_o – діаметр циліндричного каркасу, м.

Температура циліндричного каркасу з урахуванням випромінювання:

$$T_o = 100 \left(\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \frac{(q - q_{nn1}) \left(\frac{1}{\varepsilon} + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \frac{F_{cm}}{F_o} \right)}{\pi d_{cm} C_o} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (4.61)$$

де ε – ступінь чорноти для сталі; F_{cm} – площа бічної поверхні корпусу печі, м²; F_o – площа бічної поверхні циліндричного каркасу, м²; C_o – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт(м² · К⁴).

Залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури зовнішньої поверхні корпусу печі (на основі натурних досліджень див. розділ 3.1).

Коефіцієнт тепловіддачі від корпусу печі в потік повітря:

$$\alpha_{nn1} = \frac{Nu\lambda_n}{D_g} = \frac{0,032\lambda_n \left(\frac{VD_g}{\nu}\right)^{0,8}}{D_g}, \quad (4.62)$$

де Nu – число Нусельта; V – швидкість повітряного потоку, м/с;

λ_n – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К);

D_g – гідравлічний діаметр, м; ν – кінематична в'язкість для повітря, м²/с.

За допомогою приведених вище залежностей було визначено діаметр зовнішнього циліндричного каркасу, який дозволить сформувати повітряний потік в зазорі з таким коефіцієнтом тепловіддачі, щоб втрати теплоти з кожуха печі залишилися незмінними, як і було сформульовано раніше. Виявилось, що забезпечити еквівалентні втрати теплоти можна лише за допомогою циліндричного каркасу змінного діаметру при цьому повітряний потік можна підігріти з 20 °С до 150 °С (див. Рисунок 4.7)

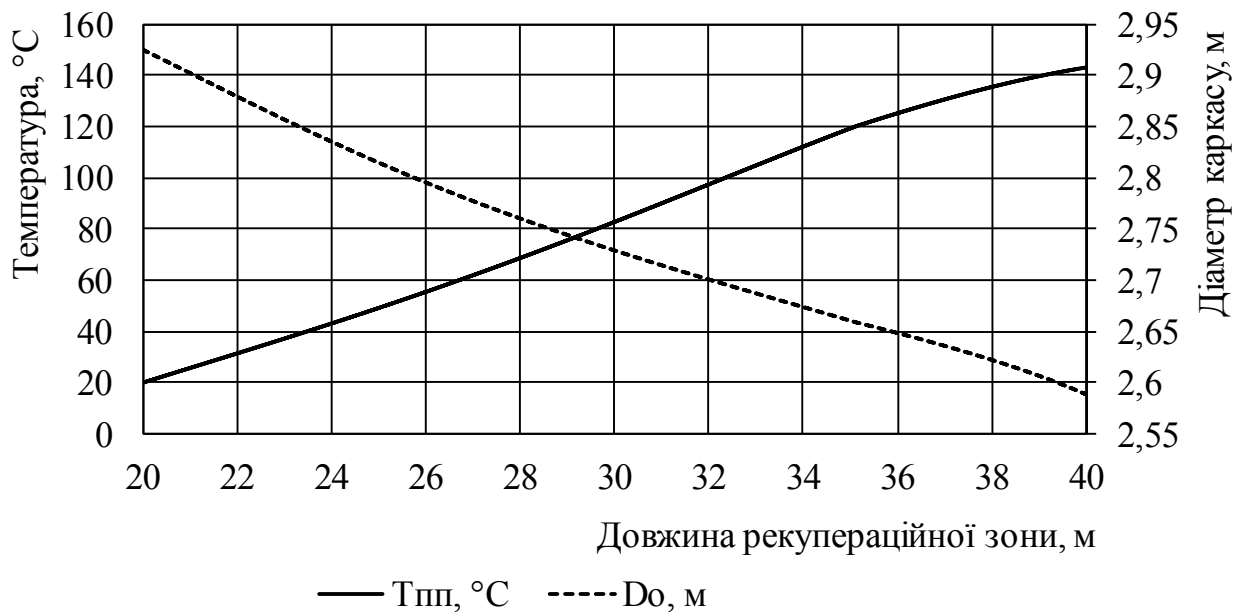


Рисунок 4.7 – Залежність температури повітряного потоку та діаметру циліндричного каркасу від довжини рекупераційної зони

На жаль, виготовити такий каркас досить складної форми та використовувати його на діючому підприємстві, враховуючи дуже маленький розмір зазору вкінці зони рекуперації ($z < 10$ мм), не є можливим. Тому було

прийнято рішення використати каркас постійного діаметру, причому цей діаметр прирівняти як середній діаметр для розрахованого вище каркасу в діапазоні рекупераційної зони з 20 по 34 м. Це рішення було прийняте на основі того, що при технічному рішенні щодо рекуперації теплоти з відхідним матеріалом, як було зазначено раніше, в зону охолодження печі, останні 6 м, буде надходити синтез-газ. І тому температура в цій зоні в більшій мірі залежить від генерації синтез газу, ніж від рекуперації теплоти з поверхні кожуха печі.

Середній зазор циліндричного каркасу становить 100 мм. При таких розмірах оболонки вдасться нагріти повітряний потік з 20 °С до 141 °С.

Необхідно також відмітити, що температура поверхні кожуха печі зміниться, відповідно зміниться температура всередині печі, при цьому коефіцієнт тепловіддачі від корпусу печі складе від 26 до 14 Вт/(м²К) (див. Рисунок 4.8).

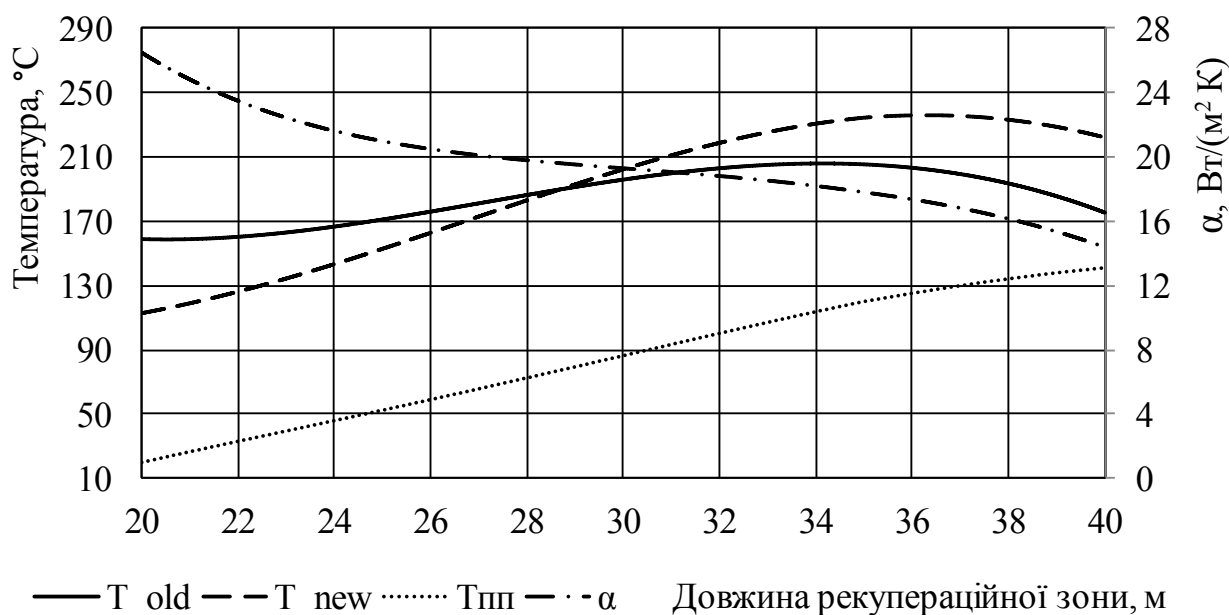


Рисунок 4.8 – Залежність температури повітряного потоку при зазорі $d = 100$ мм та коефіцієнт тепловіддачі поверхні корпусу печі від довжини рекупераційної зони

Перед провадженням даного технічного рішення треба провести розрахунки, які підтвердять працездатність печі прожарювання при змінених умовах взаємодії з навколишнім середовищем.

4.3 Комплексне технічне рішення

Розгляд технічних рішень, описаних в розділах 4.1.1, 4.1.2, 4.2.2, підштовхує нас до того що раціональним є впровадження комплексу із цих трьох технічних рішень, адже вони не перешкоджають, а доповнюють один одного. Саме тому комплексне технічне рішення рекомендується діючим підприємствам для впровадження. Ескіз цього технічного рішення приведена на Рисунок 4.10.

У зв'язку з тим, що в зону рекуперації теплоти з поверхні кожуха печі буде подаватися повітря попередньо підігріте в барабані-охолоджувачі до температури 70 °С попередні розрахунки потребують корегування.

Середній зазор циліндричного каркасу становить 60 мм. При таких розмірах оболонки можливо нагріти повітряний потік з 70 °С до 165 °С (див. Рисунок 4.9).

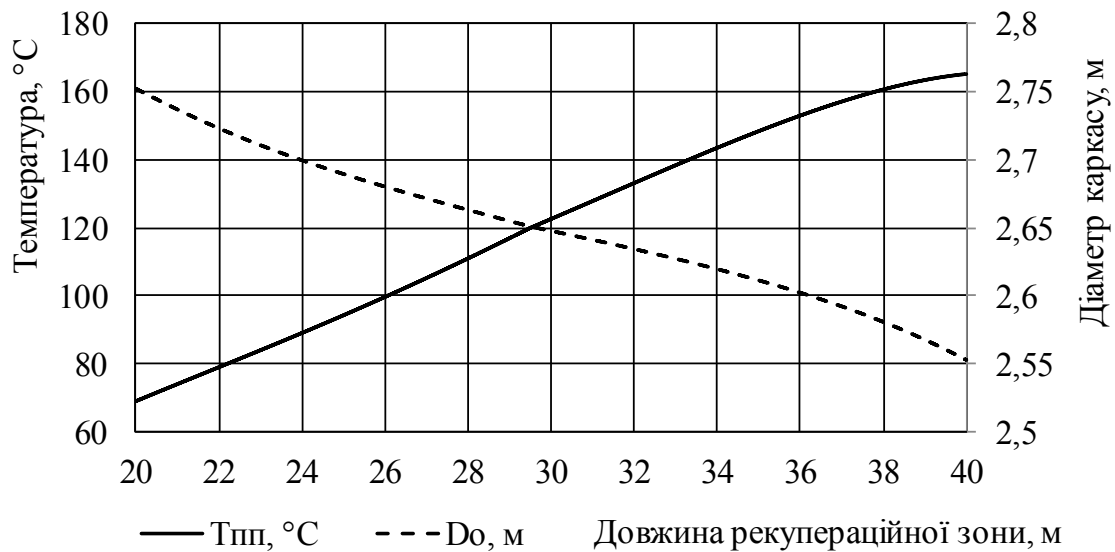


Рисунок 4.9 – Залежність температури повітряного потоку та діаметру каркасу від довжини рекупераційної зони для комплексного рішення

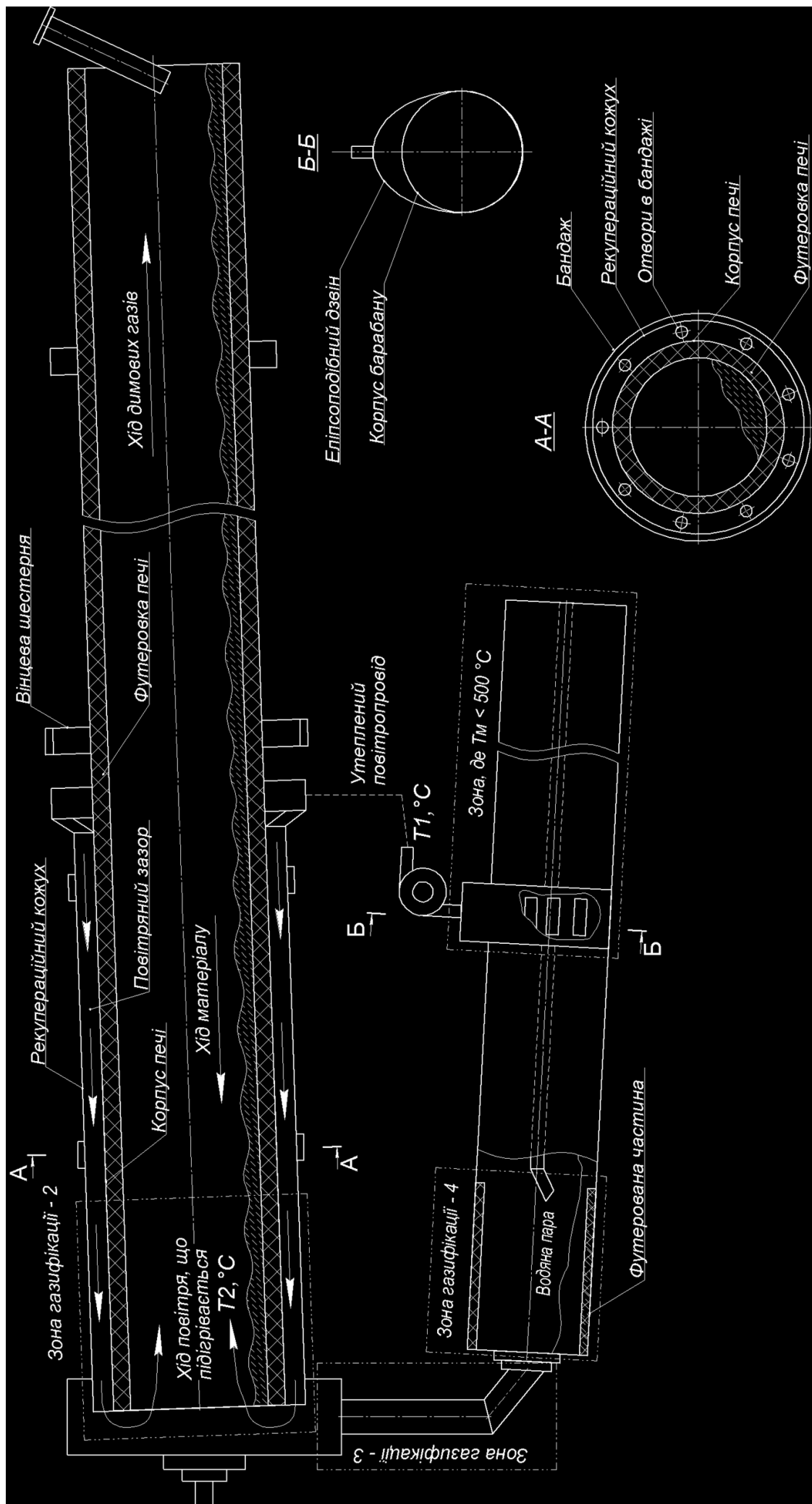


Рисунок 4.10 – Ескіз технічних рішень

Температура поверхні кожуха печі зміниться, відповідно зміниться температура всередині печі, при цьому коефіцієнт тепловіддачі від корпусу печі складе від 22 до 15 Вт/(м²К) (див. Рисунок 4.11).

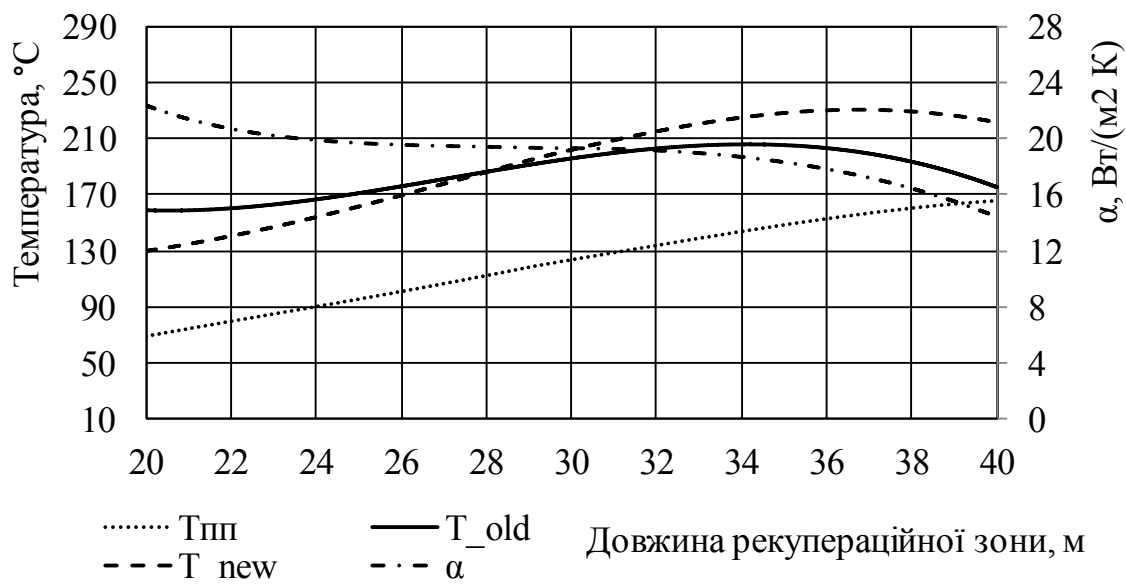


Рисунок 4.11 – Температура повітряного потоку при зазорі $d = 60$ мм та коефіцієнт тепловіддачі від поверхні корпусу печі

Впровадження запропонованих технічних рішень дозволить досягти наступного економічного ефекту:

- нагрів повітря до температури 165 °C при витратах повітря 7550 м³/год дасть економію в 365 кВт;
- генерація синтез-газу дасть економію в 3,9 МВт, при цьому угар матеріалу збільшиться на 0,259 кг/с.

У комплексі використання даних технічних рішень дозволять повністю відмовитись від використання природного газу під час встановленого режиму роботи печі та при цьому збільшити угар матеріалу лише на 1-1,5% від початкового значення.

4.4 Висновки до розділу 4

Рекуперация теплоти поверхні кожуха печі можлива шляхом підігріву вторинного повітря, що подається на згорання природного газу та матеріалу, який прожарюється.

Рекуперация теплоти вихідного матеріалу можлива шляхом продування повітря над прожареним матеріалом в барабані охолоджувачі та утворення синтетичного газу, який затягнеться в піч на згорання.

Існує можливість об'єднати в комплекс дані технічні рішення для забезпечення рекуператії теплоти обертової печі прожарювання.

Теплова енергії, яку можна рекуперувати шляхом продуву вторинного повітря в барабані-охолоджувачі склала $Q = 125$ кВт.

Загальна теплова енергія, яку можна рекуперувати склала $Q = 365$ кВт.

Розрахунок утворення синтез-газу показав, що теплотворна здатність згорання синтез-газу складе , що повністю виключить використання природного газу в печі прожарювання, при цьому витрата вуглецевого матеріалу складе 272,7 кг/год, але надлишкова теплова енергія замінить угар матеріалу в печі на 198 кг/год, що загалом збільшить угар матеріалу з 13,94 % на 15,14 %.

Визначено, що основним чинником, який впливає на енергоефективність роботи обертових печей прожарювання вуглецевих матеріалів є використання синтетичного газу, що генерується за рахунок теплоти прожареного матеріалу.

5 ТЕРМОМЕХАНІЧНИЙ СТАН ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ

Як було відмічено в розділі 4, технічне рішення з рекуперації теплоти кожуха печі прожарювання та генерації синтез газу в зоні охолодження матеріалу в печі, змінюватимуть температуру футеровки печі. Тому потрібно провести розрахунки, які будуть підтверджувати збереження цілісності конструкції печі при змінених умовах теплообміну. Коефіцієнт тепловіддачі корпусу печі в навколишнє середовище в зоні рекуперації теплоти приведений на Рисунок 4.11. Вплив відбору теплоти на процес генерації синтез-газу в зоні газифікації, яка знаходиться в печі прожарювання, було змодельовано завдяки зниженню температури газового потоку всередині печі прожарювання. Балансні розрахунки показали, що для врахування теплоти, що буде відібрана на процес газифікації необхідно температури газового потоку на виході з печі знизити до 900 °С.. Температура газового потоку всередині печі з урахуванням процесу газифікації приведена на Рисунок 5.1.

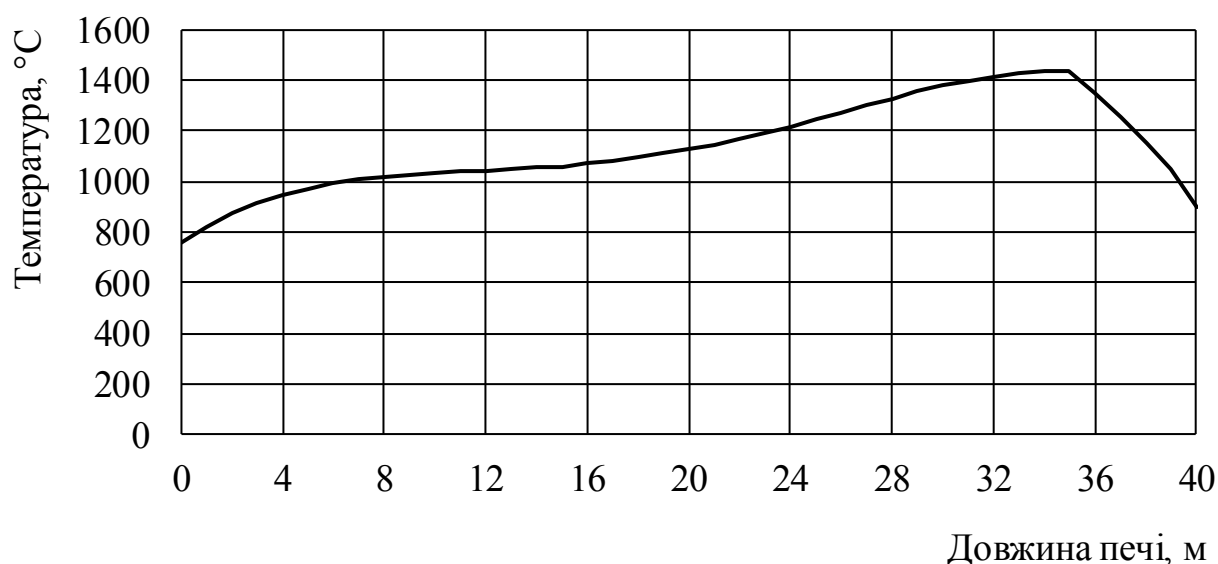


Рисунок 5.1 – Температура газового потоку всередині печі

5.1 Тепловий стан модернізованої печі прожарювання

Розподіл температури по металевому корпусу печі прожарювання наведено на Рисунок 5.2.

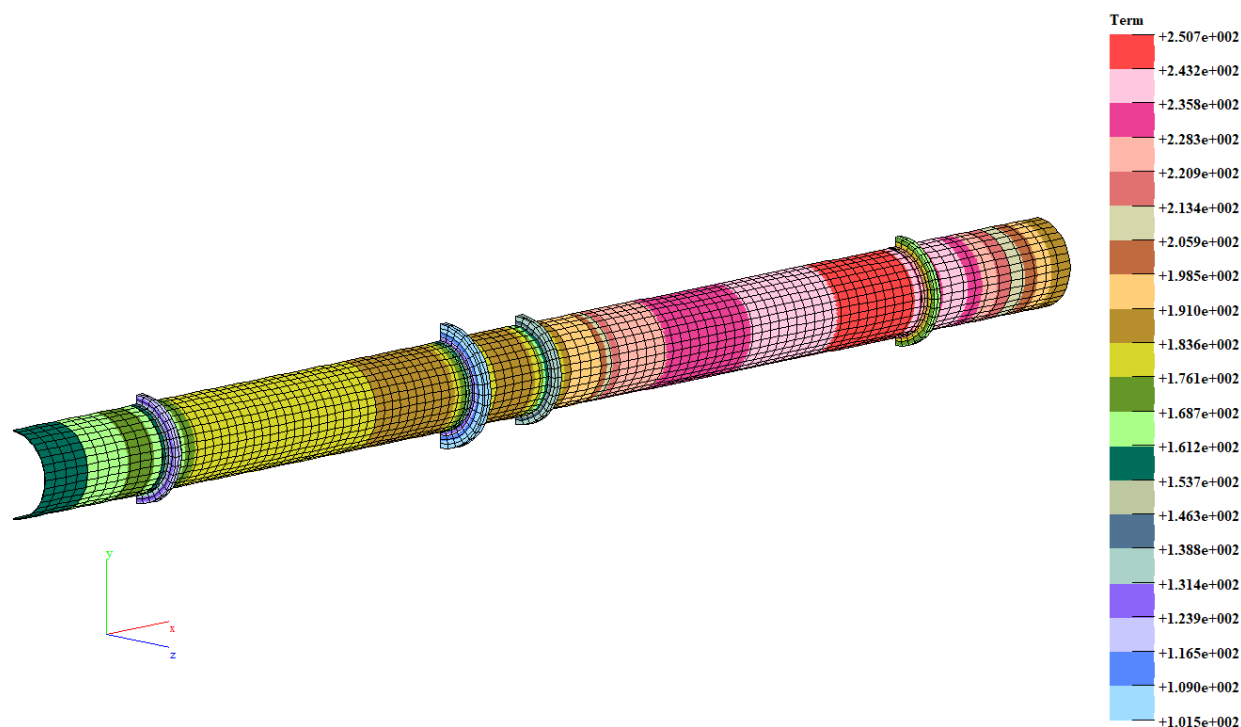


Рисунок 5.2 – Температура корпусу модернізованої печі прожарювання

Графік зміни температури поверхні корпусу печі прожарювання приведено на Рисунок 5.3.

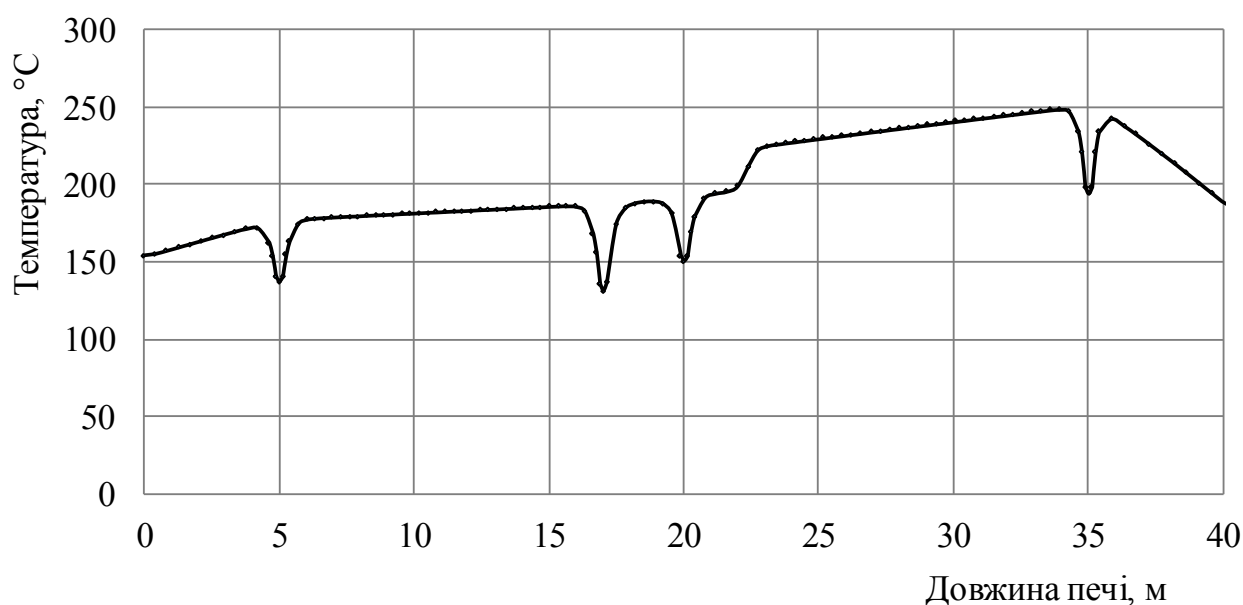


Рисунок 5.3 – Графік зміни температури корпусу модернізованої печі

Аналізуючи графік, видно, що в місцях розміщення бандажів та вінцевої шестерні спостерігається локальне зменшення температури, що викликано наявністю підбандажних обичайок в цих місцях. Найбільша температура корпусу з 22 по 40 м, це пояснюється як більш високою температурою газового потоку на цій ділянці печі, так і різним термічним опором вогнетривкої футеровки в цих зонах (до 22 м – шамотна, з 22 м по 40 м – суміш периклазо-хромітової та шамотної).

Розподіл температури в центрі футеровки печі приведено на Рисунок 5.4.

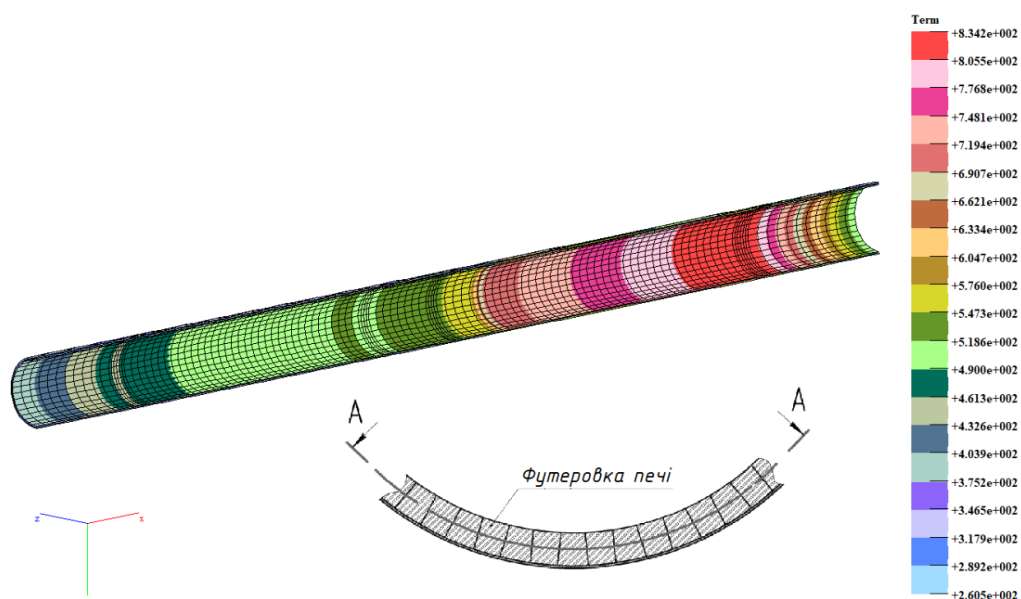


Рисунок 5.4 – Температура в центрі футеровки печі (по перерізу А-А)

Графік зміни температури в центрі футеровки печі прожарювання приведений на Рисунок 5.5.

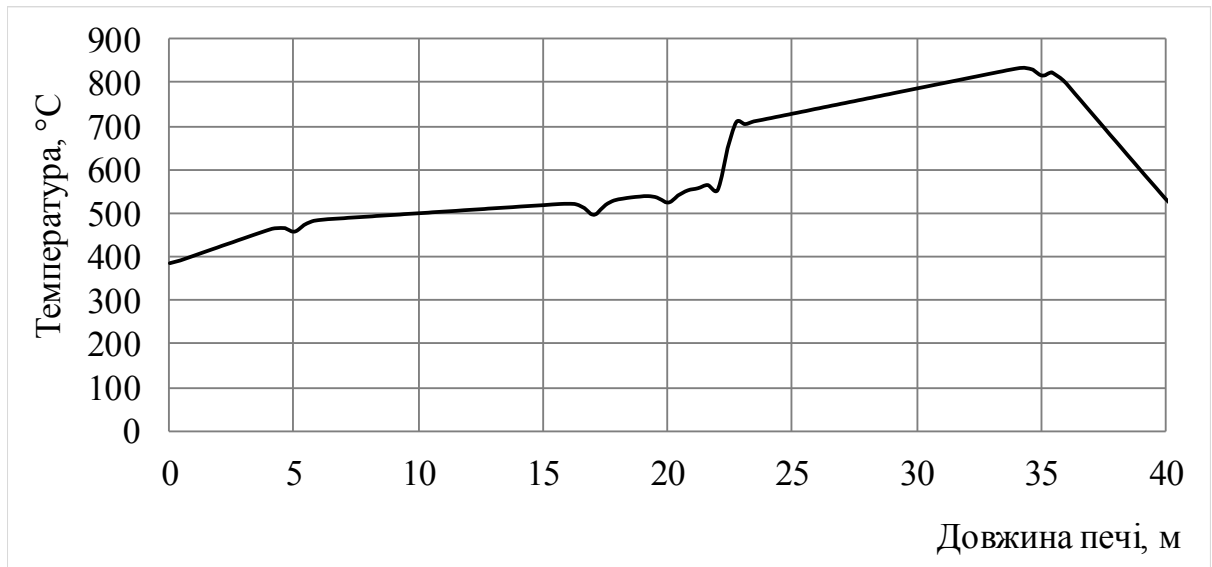


Рисунок 5.5 – Графік зміни температури в центрі футеровки модернізованої печі прожарювання (по перерізу А-А)

Підвищення температури, яке можна спостерігати на 22 м печі пов'язаний з тим, що футеровка до 22 м виконана тільки з шамотної цегли, а після 22 м виконана з шамотної (зовнішній) та периклазо-хромітової (внутрішній) цегли, теплопровідність якого вища ніж у шамотного.

Температура на внутрішній поверхні футеровки печі – на Рисунок 5.6.



Рисунок 5.6 – Температура на внутрішній поверхні футеровки печі

Графік зміни температури на внутрішній поверхні футеровки печі приведено на Рисунок 5.7.

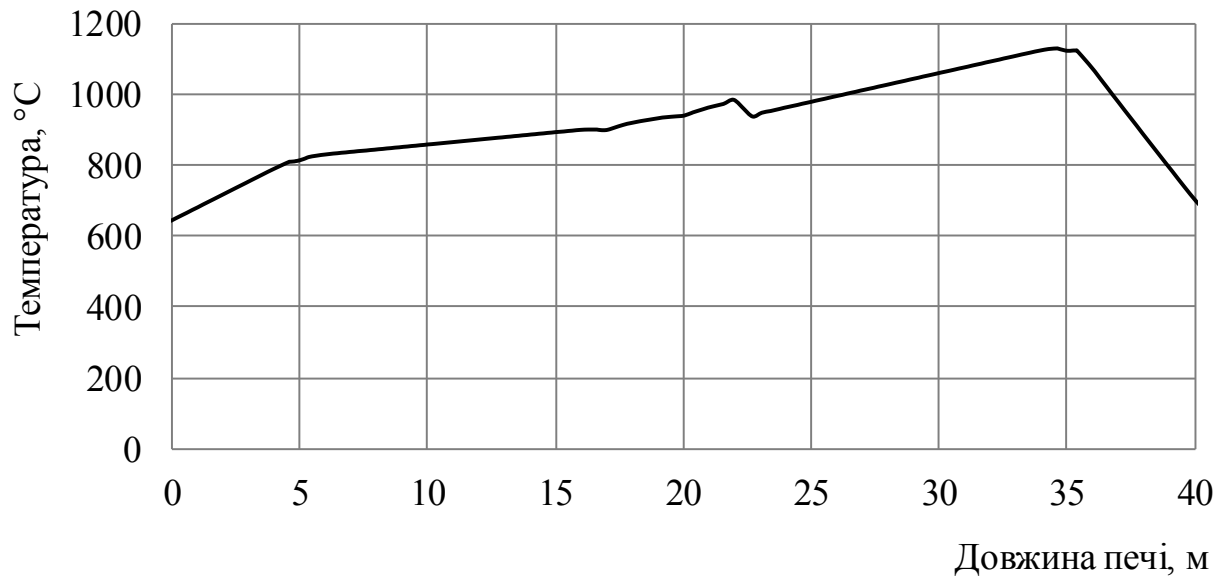


Рисунок 5.7 – Графік зміни температури на внутрішній поверхні футеровки печі

Різде пониження температури за 5 м до кінця печі, пояснюється, по-перше, зоною охолодження печі, по-друге, зоною генерації синтез-газу з відбором тепла.

5.2 Напружено-деформований стан модернізованої печі прожарювання

Переміщення металевого корпусу печі, з коефіцієнтом масштабування $K=500$, приведено на Рисунок 5.8.

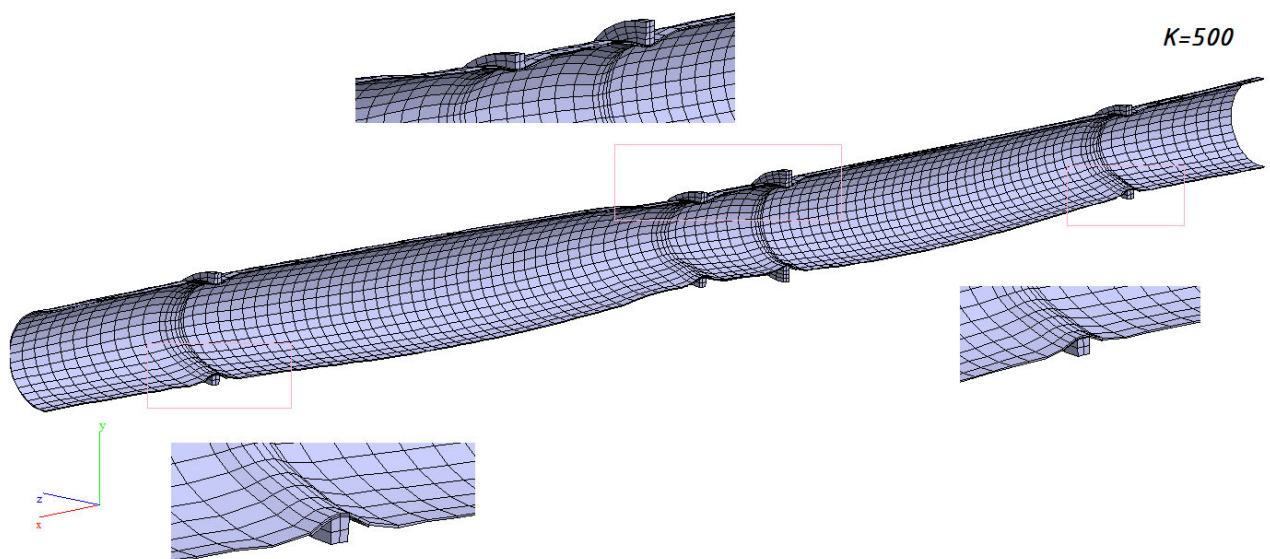
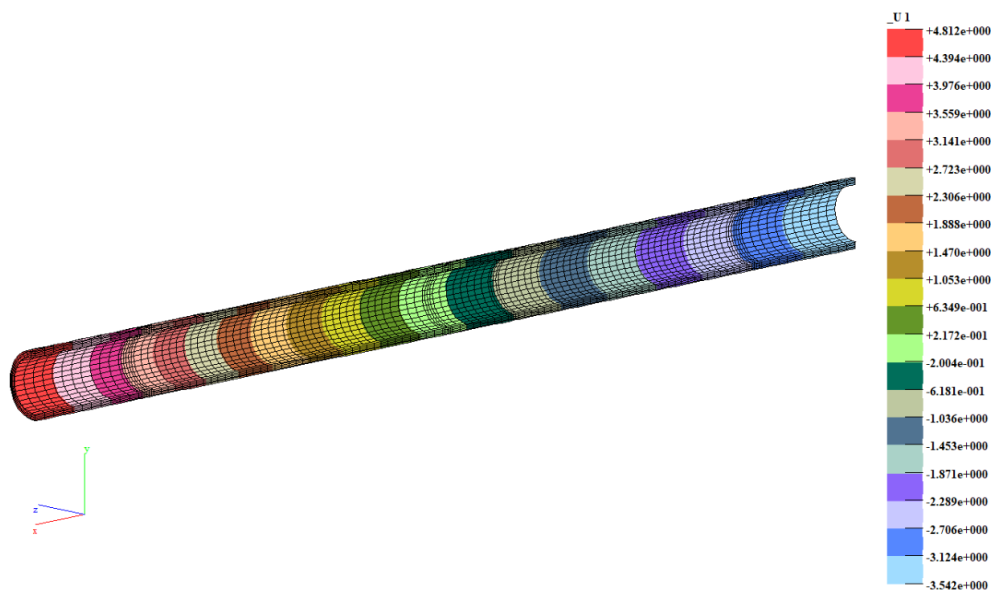
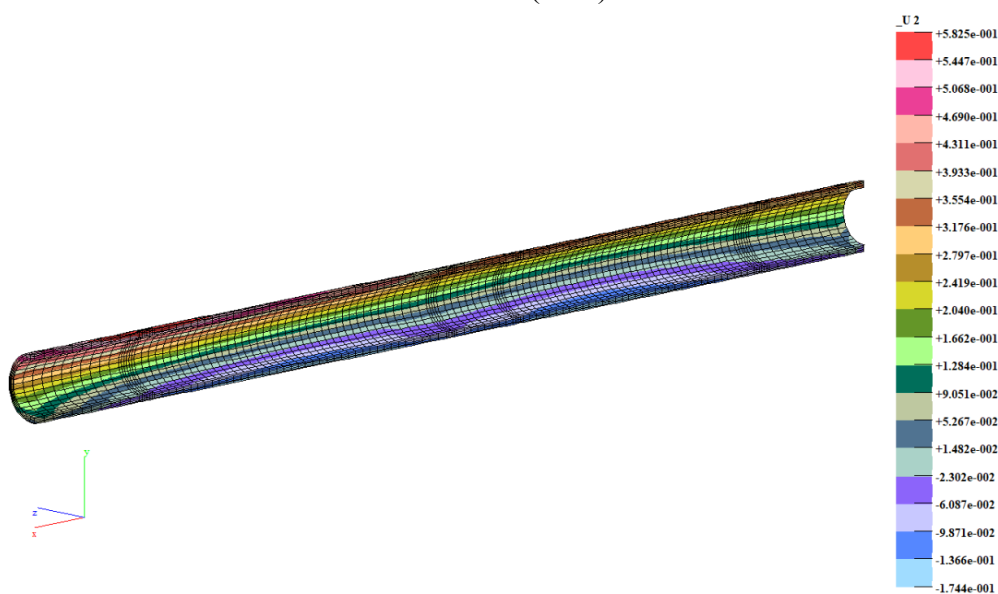


Рисунок 5.8 – Деформація корпусу печі прожарювання ($K=500$)

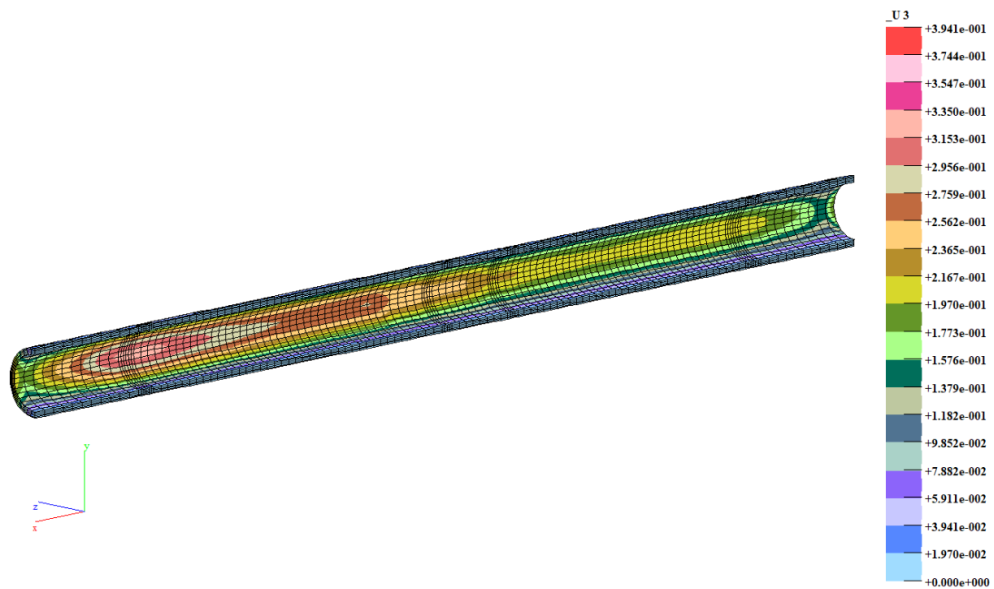
Деформація футеровки печі прожарювання по координатних осях приведена на Рисунок 5.9.



по осі X (в см)



по осі Y (в см)



по осі Z (в см)

Рисунок 5.9 – Деформація футеровки печі по координатних осях
 Головні напруження в корпусі обертової печі приведені на Рисунок 5.10.

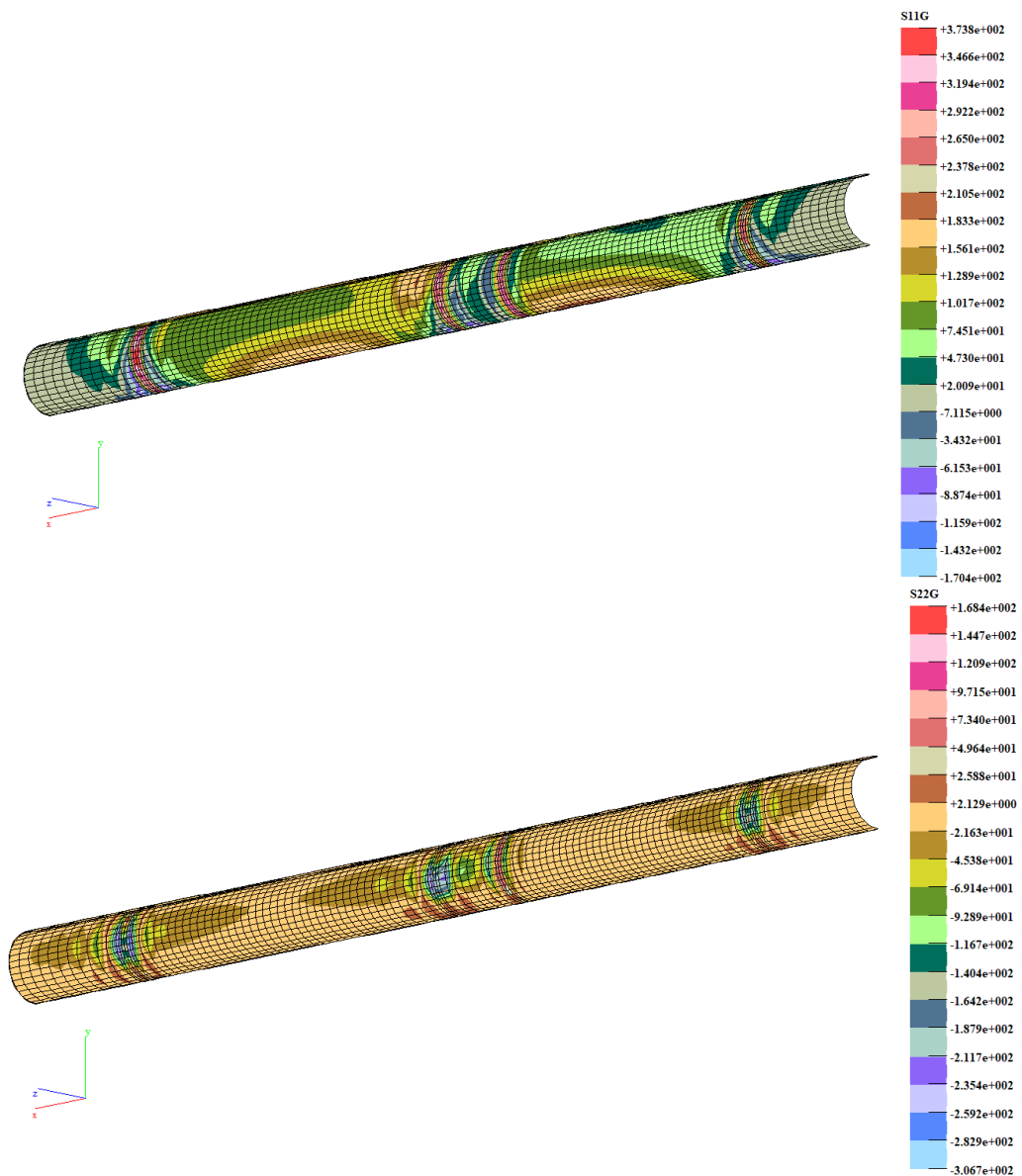




Рисунок 5.10 – Головні напруження в корпусі печі прожарювання
Видно, що основні зони напружень виникають в місцях установки бандажів та вінцевої шестерні, особливо в місці контакту бандажів з опорними роликами.

Результати обробки кінцевих елементів приведені на Рисунок 5.11.

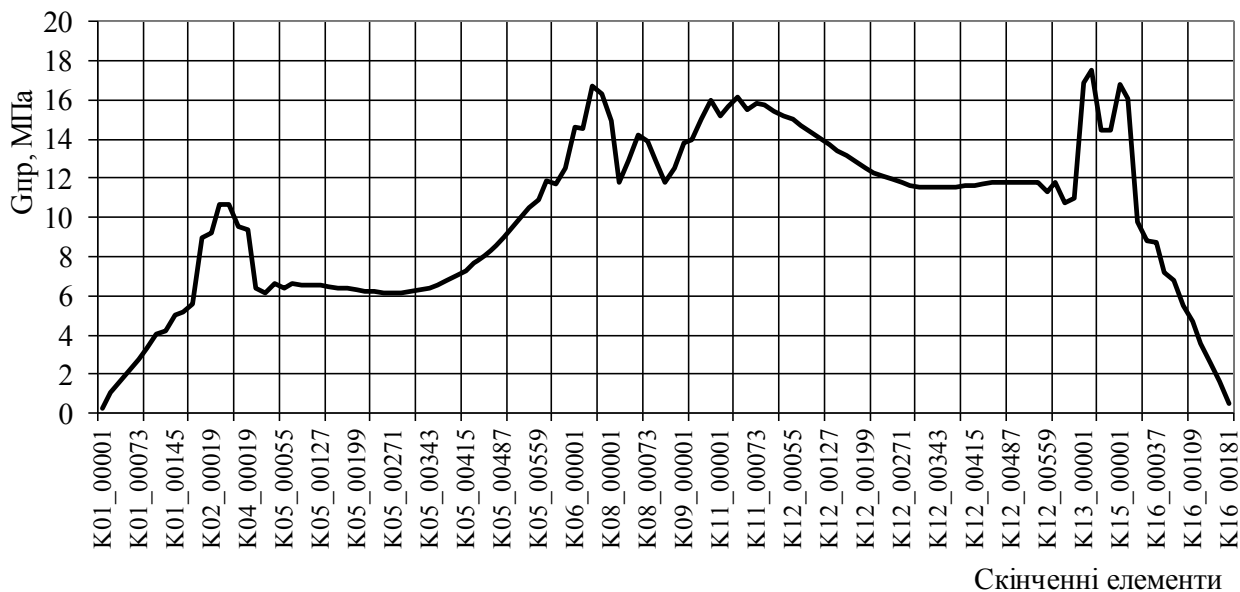


Рисунок 5.11 – Еквівалентні напруження в корпусі печі прожарювання

Для аналізу працездатності конструкції печі прожарювання визначаємо еквівалентні напруження, які порівнюємо з допустимими напруженнями для даного матеріалу. Враховуючи, що корпус печі виконаний зі сталі еквівалентні напруження необхідно визначати за енергетичною теорією міцності (за Мізесом) для пластичних матеріалів (5.1):

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}, \quad (5.1)$$

Допустимі напруження отримують з виразу (5.2):

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{-1}}{n} = \frac{0,435\sigma_{BP}}{n}, \quad (5.2)$$

де n – запас міцності обертових печей, який враховує специфіку її експлуатації, наявність зварних швів та температуру, зазвичай дорівнює $n = 3$.

Так як матеріалом корпусу печі є сталь ВСТ-3 і М16С з межею міцності для листа товщиною (33-60) мм, $\sigma_{BP} = 370-460$ МПа, то підставивши це значення в наведену формулу (5.2) отримаємо:

$$[\sigma] = \frac{0,435 \cdot 415}{3} = 60,175 \quad (5.3)$$

Таким чином отримані напруження в корпусі печі не перевищують допустимі, що означає відсутність пластичних деформацій, які є незворотними.

Для аналізу працездатності футеровки печі визначаються приведені напруження, які порівнюють з допустимими для даного матеріалу. Міцність крихких матеріалів, як і будь-якого іншого твердого тіла, оцінюється трьома основними показниками: межа міцності на одновісний стиск, межа міцності на одноосьовий розтяг і межа міцності на зсув. В теоріях міцності зазвичай застосовують межу міцності на одновісний стиск і відношення, як показник крихкості матеріалу.

Для аналізу крихких тіл зазвичай застосовують теорію П.П. Баландина, яка приводить складний напружений стан до простого одновісного:

$$[\sigma] = \frac{0,435 \cdot 415}{3} = 60,175 \quad (5.4)$$

Допустимі напруження за теорією П.П. Баландина являються менше 1.

Графік оброблених даних приведений на Рисунок 5.12 – для шамотної цегли, Рисунок 5.13 – для периклазо-хромітової цегли. З графіків видно, що максимальні напруження не перевищують допустимі.

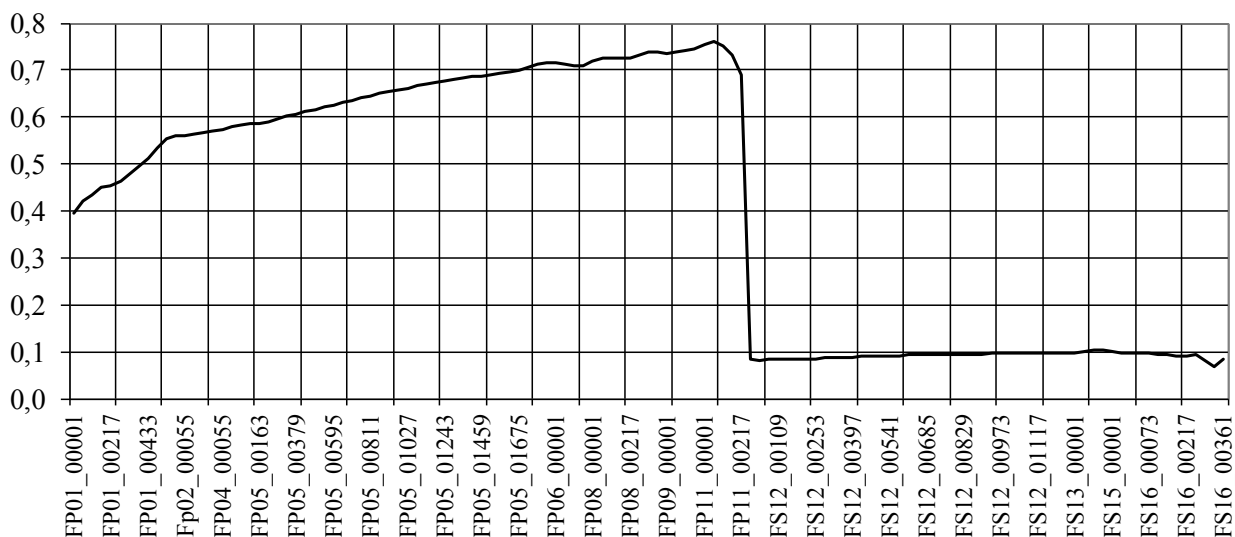


Рисунок 5.12 – Напруження для шамотної цегли

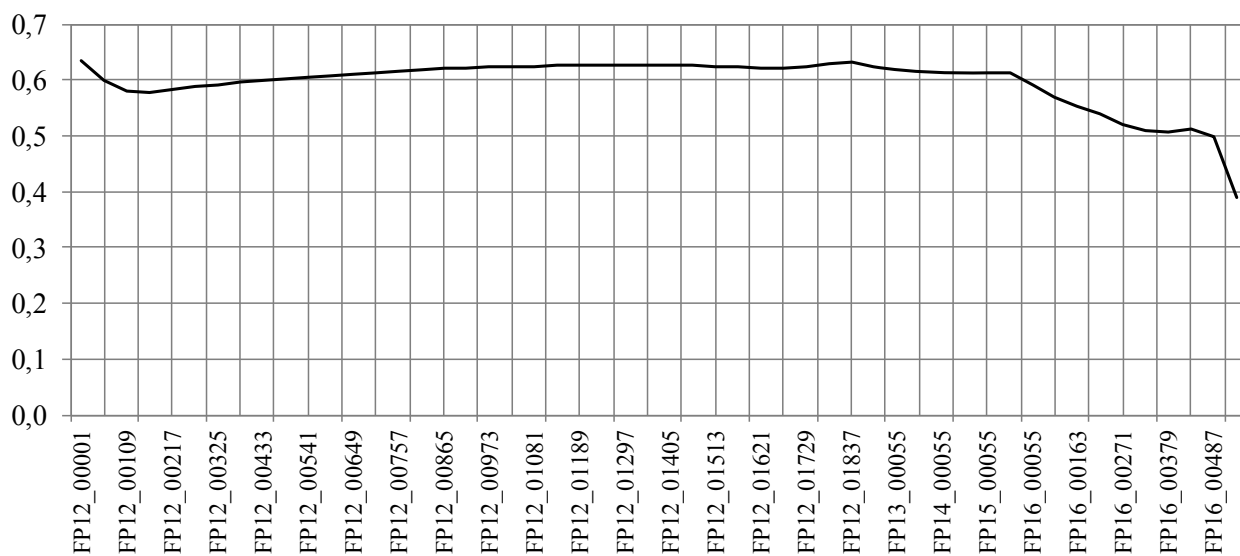


Рисунок 5.13 – Напруження для периклазо-хромітової цегли

5.3 Висновки до розділу 5

Оцінено вплив запропонованих технічних рішень на термомеханічній стан існуючої печі прожарювання. Отримано епюру розподілу температури по металевому корпусу печі. Побудовано графік зміни температури поверхні корпусу печі прожарювання, графік показує, що в місцях бандажів та вінцевої шестерні існує локальне зменшення температури, що викликано наявністю підбандажних обичайок в цих місцях. Найвища температура корпусу спостерігається з 22 по 40 м, це пояснюється як більш високою температурою газового потоку на цій ділянці печі, так і різним термічним опором вогнетривкої футеровки в цих зонах. Різке зменшення температури з 35 по 40 м печі, пояснюється як іншим коефіцієнтом тепловіддачі корпусу печі в навколишнє середовище за рахунок рекуперативного кожуха печі, так і впливом відбору теплоти на процес генерації синтез-газу в цій зоні.

Отримано епюри температур в центрі та на поверхні футеровки печі. Побудовані відповідні графіки. Різке зниження температури на 35-40 м печі, пояснюється, по-перше, зоною охолодження печі, по-друге, зоною генерації синтез-газу з відбором теплоти.

Отримано епюри деформації футеровки печі по координатних осях – переміщення металевому корпусу печі, зміщення печі по осях в напрямку X (уздовж печі) 4,8 см для холодного торця, для гарячого – 3,4 см, в напрямку осей Y та Z не перевищують 6 мм.

Отримані епюри напружень в корпусу печі та побудовано графік еквівалентних напружень в корпусі печі. Напруження, які виникають у корпусі печі прожарювання мають різну інтенсивність. Екстремуми напружень спостерігаються в місцях встановлення вінцевої шестерні та бандажів. Значення досягають 16-18 МПа. Напруження в місцях вінцевої шестерні відносно менші та становлять 10-12 МПа, що зумовлене методикою кріплення шестерні за допомогою пружних пластин. Отримані напруження в корпусі печі не перевищують допустимі, що означає відсутність пластичних деформацій, які є незворотними.

Проаналізовано працездатність футеровки за теорією П.П. Баландина. Побудовані графіки напружень для шамотної та периклазо-хромітової

вогнетривкої цегли, з яких видно, що максимальні напруження не перевищують допустимі.

Отже, технічні рішення з рекуперації теплоти кожуха печі прожарювання та генерація синтез-газу в зоні охолодження матеріалу в печі, не в значній мірі змінюють температуру футеровки печі. Проведені розрахунки, підтверджують збереження цілісності конструкції корпусу печі та її футеровки при змінених умовах теплообміну.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Закон України «Про охорону праці» – Закон України, що визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя та здоров'я у процесі трудової діяльності на безпечні та належні умови праці, регулює відносини між роботодавцем та працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища за участю відповідних органів державної влади та встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні. Прийнятий 14 жовтня 1992 р., тобто першої редакції закону, а нині діє редакція – від 2018 р. [38].

Базою для створення безпечних умов праці є знання небезпечних та шкідливих чинників, пов'язаних з відповідним виробництвом, їх впливу на органи людини, вимог нормативних документів щодо обмеження цього впливу і методів захисту працюючих.

Згідно до теми магістерської дисертації «Підвищення теплової енергоефективності обертової печі під час прожарювання вуглецевих матеріалів» освітлені заходи для забезпечення безпечних умов експлуатації обладнання та механізмів. Встановлення параметрів технологічного процесу та контроль роботи обертової печі виконує оператор. Робоче місце оператора знаходиться в цеху на відстані 5 м від печі, площа цеху $S = 800 \text{ м}^2$, об'єм $V = 6000 \text{ м}^3$.

Виробничі фактори, які несуть небезпеку, загрозу та шкоду людині:

- повітря робочої зони;
- виробничий шум та вібрації;

- обертові частини обладнання;
- електронбезпека;
- пожежна небезпека;

6.1 Повітря робочої зони

У приміщенні піч прожарює вуглецевий матеріал, який попередньо подрібнюють, тому утворюється пил. Пил — це дрібні тверді частинки в повітрі, які осідають під дією власної ваги, але деякий час можуть перебувати в повітрі у зваженому стані. Концентрацію пилу вимірюють у міліграмах на 1 м^3 повітря. Найбільш небезпечним для здоров'я людини є дрібний пил з розмірами часток до 10 мкм , так як він не затримується у верхніх дихальних шляхах, а проникає та викликає захворювання легенів. Крупніший пил затримується на слизуватих оболонках верхніх дихальних шляхів і робить подразливу дію, викликаючи хронічні захворювання. Крім того, від тривалого перебування в таких зонах у людини виникають захворювання очей, шкіри. Незначний вміст пилу в повітрі не викликає шкідливих наслідків. Захист від пилу здійснюють його видаленням з робочої зони, герметизацією зон, застосуванням місцевої вентиляції, а також використанням загальної вентиляції. За допомогою водяних форсунок пил зволожують, як наслідок, припиняючи поширення пилу в повітрі.

Гранично допустима концентрація (ГДК) пилу в повітрі дорівнює 10 мг/м^3 .

Для організації загального повітрообміну та вловлювання в робочій зоні пилу застосовується вентиляційні установки. З використанням такого обладнання фактична концентрація досягне 5 мг/м^3 , що відповідає нормам ДСН 3.3.6.042-99 [39].

6.2 Виробничий шум та вібрації

Основними джерелами шуму при роботі обертової печі є електродвигуни, редуктори, обертові частини механізму, вентилятори, котли-утилізатори, системи охолодження. Тривалий, потужний та глибокий шум дуже негативно впливає на стан здоров'я людини та на відповідні органи зокрема. Окрім загального виснаження організму, тривали шум є причиною запаморечення, захворювання нервової системи, виникнення глухоти.

Загальний рівень шуму становить близько $L = 95-99$ дБА.

Захист робітників від шуму може здійснюватися як індивідуальними засобами, так і колективними, відповідно нормативним актам.

Для пониження виробничого шуму передбачається проведення наступних заходів: встановлення спеціальних екранів ($\Delta L = 15$ дБА); своєчасний ремонт всіх механічних вузлів за відповідним регламентом ($\Delta L = 7$ дБА); змащування поверхонь, що піддаються тертю ($\Delta L = 6$ дБА);

Фактичні показники шуму становлять 70 дБА, що відповідає ДСН 3.36.037-99 [39].

Оператор, який обслуговує агрегат, повинен забезпечуватися індивідуальними засобами захисту – м'які прогумовані вкладиші, які знижують рівень шуму на 18-20 дБА.

Джерелом вібрації зазвичай являються електродвигуни та обертові частини агрегату. Вібрації виникають внаслідок неточності установки обертових частин (дисбаланс) та/або нещільного з'єднання опори обертових частин до фундаменту.

Рівень технологічної вібрації у приміщенні не перевищує 90 дБ при частоті 4 Гц, що відповідає ДСН 3.36.039 – 99 [39].

6.3 Обертові частини обладнання

Обертові механізми в лінії – корпус печі, барабан, муфти, вали, деталі приводів, опори, вінцева шестерня та інші. Відповідно до вимог усі органи повинні бути обладнані захисним огороженням (екранами), які надійно захищають людину від вильоту з небезпечної зони стружки металу, агресивних рідин, крапель розплавленого металу або різного роду випромінювання. Огороження виготовляють із спеціального листового металу або металевої сітки, пластмаси, а в деяких випадках – із спеціальних матеріалів (наприклад, для захисту від радіоактивного випромінювання). Для аварійної зупинки машини передбаченні аварійні кнопки та важелі відключення.

6.4 Електронебезпека

Складове обладнання обертової печі знаходиться в сухому приміщенні з нормальною температурою та вологістю повітря. Підлога приміщення залізобетонна. Електричне устаткування на агрегатах живиться від трьохфазної провідної електричної мережі перемінного струму з заземленою нульовою точкою (нейтраль) напругою 220/380 В та частотою 50 Гц.

Головні причини ураження електричним струмом наступні:

- виникнення крокової напруги – напруга, яка виникає при обриві і падінні проводу на землю діючої лінії електропередачі;
- поява напруги на металевих частинах електроустаткування – корпусі або кожусі у результаті пошкодження ізоляції струмоведучих частин;
- дотик до струмоведучих частин, що знаходиться під напругою.

Основними технічними заходами щодо запобігання електротравм при замиканнях на корпус є захисне заземлення, занулення або захисне відключення. Заземлення – це навмисне з'єднання елементів установки, які не знаходяться під напругою з глухо заземленою нульовою лінією генератора чи трансформатора в мережах трьохфазного струму, з глухо заземленим вводом джерела однофазного струму, з глухо заземленою середньою точкою джерела в мережах постійного струму. Заземлення установки виконується відповідно до ГОСТ 12.1. 030-81.

Опір ізоляції повинен бути не менше 0,5 мОм.

Електрична апаратура, встановлена всередині робітничих приміщень, повинна мати ступінь захисту IP = 51 (ГОСТ 14254-80).

Основні заходи і засоби від ураження електричним струмом:

- розділення електромережі за допомогою спеціальних трансформаторів;
- в аварійному режимі застосовувати захисне занулення;
- важелі ввімкнення та вимкнення замкнені в спеціальних шафах;

Спеціальні засоби для електрозахисту зберігаються у приміщеннях у відведених місцях, які повинні бути в умовах, що виключають можливість їх механічного ушкодження, агресивного середовища, дії вологи тощо.

6.5 Пожежна безпека

При виробництві може горіти: електроізоляція, дерев'яні матеріали, вугілля, природний газ, горючі речовини. Категорія пожежної безпеки виробництва – В, ступінь вогнестійкості II, клас зони пожежної безпеки II-IIIa. Основними причинами виникнення пожеж при виробництві є:

- несправність електричного устаткування;
- розряд статичної та атмосферної електрики;
- самозаймання устаткування.

Заходи щодо пожежної безпеки розділяють на:

- організаційні (протипожежний інструктаж робітників, правильна експлуатація устаткування, правильний зміст приміщення);
- технічні (дотримання правил, норм та протипожежної безпеки при проектуванні будинку, при встановленні електричного устаткування, освітлення, вентиляції);
- експлуатаційні (своєчасний ремонт технологічних ліній).

Для гасіння пожежі застосовуються вогнегасники вуглекислотні ВВК-2 (ОУ-3). Такі вогнегасники застосовуються для гасіння легкозаймистих та горючих рідин, твердих горючих речовин та матеріалів, електропроводок, що знаходяться під напругою до 1000 В. Діючою речовиною є вуглекислота. При випаровуванні 1 л вугільної кислоти – H_2CO_3 , утворюється 509 л CO_2 – вуглекислого газу.

При виникненні пожежі передбачена сигналізація – теплові пристрої типу ДТП для оповіщення.

Сам виробничий цех – це приміщення, яке розташоване на першому поверсі. Шляхи евакуації (проходи, коридори) повинні мати рівні вертикальні огорожувальні конструкції мінімальна ширина яких має становити не менше 1 м, а висота – 2 м. Двері при евакуації повинні відчинятися, як правило, у напрямку виходу з будівлі.

6.6 Висновки до розділу 6

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Основна мета охорони праці – це створення безпечних умов праці.

Головний об'єкт охорони праці – це людина в процесі праці, виробниче середовище, організація праці на виробництві.

Законодавство про охорону праці складається з Закону України «Про охорону праці» та інших нормативних актів. Основними причинами травматизму на виробництві є недотримання працівниками інструкцій та правил техніки безпеки, не використання захисних пристроїв, несправність обладнання, інструменту, технічних засобів, недостатня механізація процесу виробництва.

7 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Стартап як форма ризикового підприємництва протягом останнього десятиліття набув широкого поширення у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (із появою Інтернету як засобу комунікацій та збуту стало легше знаходити споживачів та/або інвесторів, займатись пошуком ресурсів, розтинати кордони між ринками різних країн). Стартап вважається однією із найістотніших складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна кількість інноваційних ідей зростає [34].

7.1 Опис та технологічний аудит ідеї проекту

У Таблиця 7.1 та 7.2 наведено зміст ідеї, напрямки застосування, основні вимоги користувача.

Таблиця 7.1 – Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Створення професійної підтримки в області машинобудування/інженерії. Надання послуг конструкторів, проектувальників, дослідників (інженерний аутсорсинг)	1. Розробляти проекти, проводити дослідження за вимогою замовника	Економія часу та ресурсів.
	2. Проводити розрахунки та/або дослідження в економічних напрямках	Сучасні дослідження, які принесуть економічну користь та доцільність

Таблиця 7.2 – Визначення характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W*	N*	S*
		Мій проект	Конструкторські бюро	Дослідницькі центри			
1	Вартість	+	–	+–			+
2	Якість	+–	–	–+		+	
3	Асортимент послуг	+	–	–+		+	
4	Підтримка	+	+–	+		+	
5	Лояльні програми	+–	–	–			+

*W – слабка сторона, N – нейтральна, S – сильна.

Аналізуючи попередні таблиці, можна сказати, що ідея є достатньо конкурентоспроможною, адже вона має невисоку вартість, тобто вимагатиме невеликих коштів для замовлення послуг, на відміну від утримання цілого конструкторського або дослідницького центру.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (Таблиця 7.3):

- за якою технологією буде надана послуга згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/додати?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 7.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Дослідницький центр	Підбір найкращих методів для проведення дослідів	Певні методи існують, а деякі необхідно розробляти	Доступні
2	Розрахунковий центр	Застосування сучасних обчислюваних систем	Певні методи існують, а деякі необхідно розробляти	Доступні
3	Конструкторський центр	Застосування сучасних CAD-CAM-CAE систем	Всі технології наявні	Доступні

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: метод та технологія обирається окремо під кожне замовлення.

7.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз попиту: обсяг, динаміка розвитку ринку, наявність попиту зведено в Таблиця 7.4.

Таблиця 7.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартапу

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
2	Наявність обмежень для входу	нестійка економіка
3	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	авторське право
4	Середня норма рентабельності в галузі, %	200

Виходячи із огляду ринку, є великий сенс заходити на нього з проектом, що дасть змогу замовникам розробляти та досліджувати важливі показники для економії ресурсів та часу.

Визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до послуг для кожної групи (Таблиця 7.5).

Таблиця 7.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до послуг
1	Економія ресурсів	Підприємства виробництв будівельних та полімерних матеріалів та виробів	Замовлення суттєво різних досліджень	Технічна підтримка, невисока вартість.
2	Досконале дослідження		Замовлення дуже складних досліджень	Висока якість, швидкість виконання

Таблиця 7.6 – Аналіз ринкового середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Інтелектуальний ресурс	Винаходити нові способи розрахунку (макроси, програми для автоматичної побудови)	Перехід до інших компаній	Створити кращі умови для інтел. ресурсів

Програмне забезпечення	Використання застарілих програм	Можливі проблеми з ліцензією програмного забезпечення	Використання сучасних програм з місячною підпискою (дешевше)
Ресурси фінансові	Бути незалежним від інших ресурсів	Не достатньо коштів для реалізації	Знайти інвестора, отримати кредит в банку, запозичити у знайомих
Індивідуальна приватна форма власності	Право на об'єкт належить одній людині (чи сім'ї)	Тяжкість управління	У перспективі перехід на колективну
Демократичний стиль керівництва	Розподілення відповідальності та навантаження, дружній колектив	Не весь колектив згодний	Поєднання авторитарного, демократичного, ліберального стилів керівництва
Політична ситуація в країні	Зменшення конкуренції	Перешкода праці з іноземними країнами	Оформлення філіалу/іншу компанію в іншій країні
Закони і нормативні акти	Полегшення роботи бізнесу	Перешкода для бізнесу	Дотримання законів і нормативів
Закон про авторські права	Патентування, захист своїх винаходів, розробок	Інші компанії будуть використовувати матеріал	Продавати запатентовані розробки

Аналіз пропозиції: визначаємо загальні риси конкуренції на ринку (Таблиця 7.7).

Таблиця 7.7 – Степеновий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції: - монополістична	1) Товар кожної фірми є недосконалим замінником товару, який реалізують інші фірми. 2) На ринку існує відносно велике число продавців, кожний із яких задовольняє невелику частку ринкового попиту на товар. 3) Легко заснувати нову фірму або залишити ринок.	Покращення якості надання послуг; Цілодобова технічна підтримка; Зменшення вартості; Створення більш привабливого сайту, соц. сторінок; Введення систем бонусів;
2. За галузевою ознакою: - міжнародна	Сприяє зниженню інтернаціональних затрат, збалансованому розвитку світового ринку, переливанню капіталу не тільки	Більш високий

	між галузями виробництва, але й між державами світової співдружності.	рівень обслуговування; Встановлення тривалих термінів гарантійного періоду;
3. Конкуренція за видами товарів: - між бажаннями	Фірми вступають в протиборство за пріоритетне задоволення різних потреб.	
4. За характером конкурентних переваг - цінова	Зниження ціни за рахунок зменшення частки прибутку може привести до зростання обсягу продажів	
5. За інтенсивністю - марочна	Ситуація на ринку, де компанія розглядає як своїх конкурентів компанії, що пропонують подібний продукт і послуги тим же цільовим покупцям по близьким цінами.	

Проводимо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю п'яти сил М. Портера).

Таблиця 7.8 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	КБ Інжинірингові компанії Інженерні компанії-аутсорсери	Проектні відділи	Можуть підвищити ціну на продукцію, що поставляється, здійснити постачання неякісної продукції, несвоєчасно чи некомплектно.	Спроможні торгуватися з постачальниками, що може привести до зниження ціни	Приваблива ціна

На основі попередніх таблиць визначили, що основним конкурентом є інженерні аутсорсингові компанії. Основним їх недоліком є відносно велика вартість замовлення послуг. Це дає нам змогу вийти на ринок, так як основною перевагою наших послуг є низька вартість.

Таблиця 7.9 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Асортимент послуг	Широкий спектр пропонованих послуг
2	Виконання зобов'язань за угодами відносно строків виконання проекту	Надання бонусів у разі невиконання
3	Невисока вартість надання послуг	Впливовий фактор для використання наших послуг
4	Якість	Незважаючи на невисоку ціну, якість послуг не відрізняється від існуючих
5	Технічна підтримка	Можливість підтримки та консультації
6	Тимчасові знижки	Надання послуг зі знижками в відповідний період

За визначеними факторами конкурентоспроможності (Таблиця 7.9) проводимо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (Таблиця 7.10).

Таблиця 7.10 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-10	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Асортимент послуг	7					+		
2	Виконання зобов'язань	7			+				
3	Достовірність результатів	8				+			
4	Вартість	8		+					
5	Швидкість виконання	6					+		
6	Кваліфікація робітників	5					+		
7	Презентація результатів	9				+			
8	Спектр пропонованих послуг	9				+			
9	Якість	9			+				
10	Система знижок	8		+					

На основі ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін, проводимо фінальний етап ринкового аналізу можливостей впровадження проекту – SWOT-аналіз (матриця аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, можливостей (Opportunities) та загроз (Troubles) (Таблиця 7.11).

Таблиця 7.11 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Strength: – ціна – вибір послуг – система знижок – технічна підтримка проекту	Weak: – маленька цільова аудиторія – реклама – нестійке фінансове положення
Opportunities: – підприємства зацікавлені у скороченні конструкторського штату – вихід на іноземний ринок	Troubles: – ТМ конкурентів більш відома – якість послуг, які надають конкуренти, вища

На основі SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (Таблиця 7.12).

Таблиця 7.12 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Орієнтація на іноземні підприємства	Низька	3 місяці
2	Орієнтація на підприємства інших галузей	Середня	3 місяці

Виходячи з ймовірності отримання певних ресурсів та строків реалізації, за умови, що впровадження послуг на території України буде невдалим, буде змінена орієнтація на іноземні підприємства, де підприємці більш схильні до інвестування у дослідження, розробки, нововведення та модернізації.

7.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 7.13 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність сприйняти послугу	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Інженерні компанії у галузі хімічного, силікатного та полімерного машинобудування	Висока	Високий	Незначна кількість	Легко
2	Інженерні іноземні компанії у галузі ХПСМ	Середня	Середній	Достатня кількість	Важко
3	Індивідуальні підприємці	Висока	Високий	Низька конкуренція	Легко, але за допомогою реклами
<u>Які цільові групи обрано:</u> іноземні та українські компанії, індивідуальні підприємці, що працюють у галузі ХПСМ.					

Компанія працює із всім ринком, пропонуючи стандартизовану програму, використовуючи масовий маркетинг.

Для роботи в обраних сегментах ринку формуємо базову стратегію розвитку (Таблиця 7.14).

Таблиця 7.14 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Охоплення іноземних та українських компаній	Дослідження досить швидко окупляться	Низька вартість, широкий спектр послуг	Стратегія спеціалізації

Наступним кроком – вибір стратегії конкурентної поведінки (Таблиця 7.15).

Таблиця 7.15 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Подібні проекти існують, але в невеликій кількості	Компанія буде співпрацювати із молодими, новими компаніями	Частково буде копіювати, але позиціонувати себе, як дослідницький центр	Оборонна (знижені ризики бути атакованим)

На основі вимоги споживачів з обраних сегментів до стартап-компанії, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розроблено стратегію позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект (Таблиця 7.16).

Таблиця 7.16 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
– Невисока ціна – Підтримка – Якість	Стратегія спеціалізації	Низька собівартість послуг	Низька ціна, підтримка проекту, допомога у впровадженні дослідів

7.4 Розроблення маркетингової програми стартап проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримує споживач. Для цього підсумовуємо результати попереднього конкурентоспроможності товару (Таблиця 7.17).

Таблиця 7.17 – Визначення ключових переваг концепції потенційних послуг

№	Потреба	Користь, яку	Ключові переваги перед
---	---------	--------------	------------------------

		пропонує послуга	конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Якість розрахунків/креслень	Заощадження фін. ресурсів	З використанням даних послуг зменшується витрати ресурсів, підвищується якість продукції
2	Невисока ціна	Низька вартість послуг	Низька вартість, порівняно з утриманням цілого проектувального відділу
3	Технічна підтримка	Допомога при виникненні проблем з отриманих послуг	Можливість безкоштовного консультування з виконавцем.

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюються ідеї продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (Таблиця 7.18).

Таблиця 7.18 – Опис трьох рівнів моделі послуг

Рівні послуг	Сутність та складові
I. Послуга/товар за задумом (потреба, заради задоволення якої він створюється і купується)	Штаб проектувальників/конструкторів які виконують розрахунки, потрібні для замовники та надають консультацію. Розробка 2D/3D креслень.
II. Послуга/товар у реальному виконанні (певні властивості товару або послуги)	Властивості/характеристики: 1. Невисока ціна (в порівнянні з утриманням штабу проектувальників) 2. Технічна підтримка 3. Знижки (бонусна система)
	Висока якість розрахунків, креслень
	Сайт 24/7
III. Послуга/товар із підкріпленням (це товар, доставлений за адресою, ефективно запропонований в магазині, інструкції з урахуванням всіх обставин, гарантії ремонту, тобто надання додаткових послуг споживачеві)	До продажу: широкий спектр конструкцій для розрахунку/креслення
	Після продажу: гарантія, після продажне обслуговування, кредит.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: результати досліджень захищені авторськими правами(патентами)	

Наступним кроком визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційні послуги (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає

аналіз ціни на послуги-аналоги або послуги субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів. Аналіз проведено експертним методом.

Таблиця 7.19 – Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Регулюються заробітною платою	В залежності від складності креслення/розрахунку та витраченого на цього часу	Приблизно 400 тис грн/рік	<i>Розрахунок:</i> 20\$-200\$ <i>Креслення:</i> 10\$-100\$

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (Таблиця 7.20)

Таблиця 7.20– Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Замовлення одиночних креслень/розрахунків; Замовлення цілого проекту для впровадження в виробництво	Постачальник товару – офіційний сайт, на якому можна зробити відповідне замовлення	Канал нульового рівня	Сайт, соц.мережі

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (Таблиця 7.21).

Таблиця 7.21 – Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікації	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Якісно Швидко	- інтернет - телефон	Публікації у технічних та наукових журналах	Привернути увагу, заохотити вибрати саме цю компанію	Акцентувати увагу на ціну, та показати результати минулих досліджень

7.5 Висновки до розділу 7

Проведений комплексний аналіз впровадження стартап-проекту, в ході якого були визначені його технологічні особливості, переваги та недоліки, його конкурентоспроможність. Виходячи з проведеного аналізу, можна з впевненістю сказати, що існує привід впроваджувати проект такого типу. Адже креслення, розрахунки, дослідження мають високу ефективність, швидко окупність та при цьому мають гарне співвідношення «ціна-якість». Шляхом дослідження конкурентів було визначено, що ринок ненасичений таким родом послуг. Послуги є дешевими, що робить є їх основною перевагою перед зазначеними конкурентами.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У результаті виконання даної магістерської дисертації на тему «Підвищення теплової енергоефективності обертової печі під час прожарювання вуглецевих матеріалів» вирішена актуальна проблема вдосконалення технологій, розробки науково-обґрунтованих технічних рішень щодо рекуперації теплоти обертової печі, визначення раціональних характеристик цих технічних рішень, забезпечення надійної роботи комплексу високотемпературного пічного обладнання.

1 Літературний огляд підтвердив актуальність теми роботи, показав наявність проблеми теплових втрат обертових печей прожарювання.

2 На підставі математичної моделі розроблено числову модель тепломеханічного стану обертової печі під час прожарювання з використанням програмного забезпечення VESNA.

3 Проведена верифікація розробленої числової моделі тепломеханічного стану печі за даними експериментальних досліджень, різниця між розрахунковими даними та експериментальними значеннями температур корпусу не перевищують 5 %, що дає змогу застосовувати розроблену модель для оцінки придатності розроблюваних технічних рішень.

4 Обґрунтовано вибір найбільш раціональних технічних рішень рекуперації теплоти обертової печі прожарювання.

5 Запропоновано методики та розрахунки для визначення ефективності і оцінки доцільності застосування технічних рішень з точки зору енергоефективності та ресурсозбереження.

6 Удосконалено методику визначення напружено-деформованого стану за допомогою обчислення інтегрованого теплового потоку, який містить в собі усі складові теплообміну в просторі печі.

7 Запропоновано методику для визначення теплової енергії утворення синтез-газу за допомогою середовища Mathcad.

8 Розроблено розрахункову методику визначення оптимального зазору каркасу, щодо рекуперації теплоти з відхідним матеріалом.

9 Створено числову модель, що забезпечує дослідження стану обертових печей в процесі їх проектування та модернізації, та визначення доцільних технологічних параметрів експлуатації.

10 Робота виконана відповідно з планом науково-дослідних робіт: в рамках держбюджетної НДР «Розробка енергоефективних технічних рішень з модернізації обертових печей електродного виробництва із частковою заміною природного газу на синтез-газ», № ДР 0119U100163; в рамках господарчого договору №804/1880272/04 «Автоматизація ротаційної печі прожарювання №5» від 01.03.2018; автор – співвиконавець тем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ANSYS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ansys.com/>
2. Pat. № PCT/US2010/0201, USA, IPC F27B 7/24 (2006.01). Apparatus and method for heat recovery from rotary kilns / Jeffrey J., Hugh E.. Filing Date: 5 Jan 2009, Priority Data: 10 Nov 2009.
3. А.Я. Карвацький, Є.М. Панов, С.В. Кутузов, І.Л. Шилович, Г.М. Васильченко, С.В. Лелека. Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів – М: Монографія, 2012. – 350с.
4. Богданов Н.Н. Полукоксование и газификация кокса / Н. Н. Богданов — М.:Госэнергоиздат, 1947. – 268 с.
5. Гнедина М.А. Расчет температурных параметров зоны спекания вращающихся печей / М.А. Гнедина, Г.А. Соколинская // Цемент. –1979. - № 1.- С. 14-18.
6. Дешко Ю.И. Наладка и теплотехнические испытания вращающихся печей на цементных заводах / Дешко Ю.И. - 2-е изд., доп. и перераб. - Москва : Стройиздат, 1966. – 247 с.
7. Исследование обжига заготовок в многокамерных печах / М. А. Степаненко, Е. М. Солдатенко, Н. И. Матусьяк [и др.] // Кокс и химия. – 1958. – № 2. – С. 22 – 27.
8. Красюков А. Ф. Нефтяной кокс (Производство, свойства) [изд. 2-е, доп. и перераб.] А. Ф. Красюков – М. Химия, 1966. – 277 с.
9. Креховецький О.М., Дулеба В.П. Аналіз ефективності теплової роботи обертової печі
10. Круць Т.М., Федунь Б.В., Саницький М.А. Теплотехнічний розрахунок цементної обертової печі з використанням альтернативного палива.
11. Кухлинг Х. Справочник по физике / Кухлинг Х.; Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. - М : Мир, 1982. - 519 с.

12. Липович, В.Г. Химия и переработка угля / В.Г. Липович [и др.]. – М.: Химия, 1988. – 336 с.
13. Лисиенко В. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: в 2-х кн. / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев; под ред. В. Г. Лисиенко. – Справ. изд. - М.: Теплотехник, 2004 (ППП Тип. Наука). – Кн.2. – 592 с.
14. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 1 / Под редакцией В.Г. Лисиенко. – М.:Теплотехник, 2004. – 688с.
15. Методика экспериментальных исследований тепловых режимов и построения энергобалансов печей графитации / Е. Н. Панов, И. Л. Шилович, С. В. Кутузов [и др.] // «Электротермия – 2004» : научно-техн. конф., (Санкт–Петербург, 1—4 июня 2004 г.) : докл. – СПб. 2004.
16. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: Энергия, 1977. – 345с.
17. Панов Е. Н. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов / Е. Н. Панов, С. В. Лелека, М. В. Коржик // ПиКАД. – 2005. – № 2. – С. 28 – 30.
18. Пат. № 119759 Україна, МПК F27D 9/00. Пристрій для регулювання температури корпусу обертової печі / Щербина В.Ю., Васильченко Г.М., Лелека С.В., Лобко С.С. – № и 2017 03050; заявл. 31.01.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл №19.
19. Пат. № 1638512 СССР, МПК F27D 9/00. Пристрій для утилізації теплоти корпусу обертової печі / Рязанцев В.Я., Самойленко В.А., Янкелевич С.В. – №4630320/23-33; заявл. 02.01.1989; опубл. 30.03.1991, Бюл №12.
20. Пат. № 2093802 РФ, МПК G01K 13/08. Способ измерения температуры вращающихся объектов термопарой / Корндорф С.Ф., Ногачева Т.И., Плахова Е.В.; заявл. 14.02.1995; публ. 20.10.1997
21. Пат. № 25052 Україна, МПК G01K 3/00. Спосіб визначення температури заготовок у високотемпературних печах / Є. М. Панов, С. В. Кутузов, В. В. Деркач, І. Л. Шилович, А. Я. Карвацький; заявник і патентовласник ВАТ

- «Укрграфіт». –№ u200702600 ; заявл. 12.03.2007; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11.
22. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы : учебн. [для вузов] / Виктор Павлович Преображенский. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
23. Санников Л.К., Сомов А.Б. и др. Производство электродной продукции. – М.: Металлургия, 1985.
24. Справочник по производству цемента / Под ред. Холина И.И. – Москва: Промстройиздат, 1963. – 852с.
25. Сюняев З. И. Производство, облагораживание и применение нефтяного кокса / З. И. Сюняев. –М. : Химия, 1973. – 296 с.
26. Український графіт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ukrgrafit.zp.ua/osnapro>
27. Химические вещества из угля. Пер. с нем. / Под ред. И. В. Калечица — М.: Химия, 1980. – 616 с.
28. Ходоров Е.И. Печи цементной промышленности. - 2-е изд., доп. и перераб./ Е.И. Ходоров - Ленинград: Стройиздат. [Ленингр. отд-ние], 1968. - 456 с.
29. Центр ресурсоефективного і чистого виробництва [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.respc.org>
30. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов. Учебное пособие для металлург. и хим.-технолог. спец. вузов – М. Металургия, 1990 – 238с.
31. Щербина В.Ю. Розвиток теорії та удосконалення технологічних процесів при виробництві будівельних матеріалів у високотемпературних агрегатах: диссертация ... доктора технических наук: 05.17.08 / Щербина Валерій Юрійович; - Київ, 2017. -393 с. URL:<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/21630>
32. Сахаров О. С. САПР. Застосування програмного комплексу ВЕСНА в розрахунках процесів і обладнання з врахуванням термосилових навантажень: Навчальний посібник / О. С. Сахаров, В.Ю. Щербина, О. В. Гондляр, В. І. Сівецький – К.: Видавництво “ЕКМО”, 2009. – 180 с

33. Пат. № 2508389 РФ, МПК F28D 11/02. Вращающийся холодильник для охлаждения сыпучих материалов / Ахметов М.М., Теляшев Э.Г. – №2012133642/05; заявл. 06.08.2012; опубл. 27.02.2014, Бюл № 6.
34. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
35. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г., Ефименко Е.А., Дослідження напружено-деформованого стану обертового теплового агрегату // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. - 2018. - № 1. - С. 65-71. DOI: <https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2018.143382>
36. Щербина В.Ю., Дегодя Т. В., Новохатська Ю. М. Підвищення ресурсу роботи бандажів обертових печей // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. - 2016. - № 1. - С. 110-115. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_hier_2016_1_24
37. Щербина В.Ю., Лобко С.С., Васильченко Г.Н., Лелека С.В. О повышении энергоэффективности вращающихся печей // Матеріали для роботи в екстремальних умовах -6: 28 міжнар. конф. — Київ, НТУУ «КПІ», ІФФ, 2016. — С. 374—380. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/20392>
38. Про охорону праці: Закон від 14.10.1992 № 2694 XII // База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення 25.03.2019).
39. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99: Закон від 01.12.1999 № 2694 XII // База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99> (дата звернення 26.03.2019).

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А ПІДГРІВ ВТОРИННОГО ПОВІТРЯ В БАРАБАНІ

$Q_{m_za} := \frac{5304}{3600} = 1.473$	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	продуктивність печі по виграді матеріалу
$Q_{voz} := \frac{7550}{3600} = 2.097$	$\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	витрата повітря, на основі натурних досліджень
$\beta := 40 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.698$	рад	кут природнього укосу матеріалу (вугілля)
$\phi := 2.29 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.04$	рад	кут нахилу барабана охолоджувача
$L_{bar} := 23.1$	м	загальна довжина барабана-охолоджувача
$L_{500} := 10.5$	м	довжина барабана-охолоджувача, де T більша ніж 500
$L_{<500} := L_{bar} - L_{500} = 12.6$	м	довжина барабана-охолоджувача, де T менша ніж 500
$n := 4.25 \cdot \frac{1}{60}$	$\frac{\text{об}}{\text{с}}$	число обертів барабана-охолоджувача
$D_{bar} := 1.402$	м	діаметр барабана-охолоджувача
$r_{bar} := \frac{D_{bar}}{2} = 0.701$	м	радіус барабана-охолоджувача
$\rho_{nas} := 700$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	насіпна густина прожареного матеріалу
$S_{bar} := \pi r_{bar}^2 = 1.544$	м^2	площа поперечного перерізу барабана-охолоджувача
$t_m := \frac{1.77 \cdot L \cdot \sqrt{\beta \cdot \frac{180}{\pi}}}{\phi \cdot \frac{180}{\pi} \cdot D_{bar} \cdot n} = 620.23$	с	час перебування матеріалу в барабані в зоні, де T < 500
$V_{mat} := \frac{L}{t_m} = 0.02$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	швидкість лінійного переміщення матеріалу
$S_{mat} := \frac{Q_{m_za}}{V_{mat} \cdot \rho_{nas}} = 0.104$	м^2	площа поперечного перерізу матеріалу
$\psi := \frac{1}{2} \cdot r_{bar}^2 \cdot (\psi - \sin(\psi)) - S_{mat} \text{ solve, } \psi \rightarrow 1.4085417054819127608$	рад	кут сегмента потоку матеріала

$L1 := r_bar \cdot \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \cdot 2 = 0.908$	м	довжина хорди потоку матеріалу
$L_duga := \frac{\pi r_bar \cdot \left(\psi \cdot \frac{180}{\pi}\right)}{180} = 0.987$	м	довжина дуги сегменту матеріала
$L2 := 2\pi r_bar - L_duga = 3.417$	м	довжина дуги кола без сегмента матеріалу
$Svoz := Sbar - Smat = 1.44$	м ²	площа поперечного перерізу барабана-охолоджувача без матеріалу
$Vvoz := \frac{Qvoz}{Svoz} = 1.456$	$\frac{м}{с}$	швидкість повітря в барабані-охолоджувачі
$Vsum := Vvoz + Vmat = 1.477$	$\frac{м}{с}$	сумарна швидкість повітря та матеріалу (противотік)
$Dg := \frac{4Svoz}{L1 + L2} = 1.332$	м	гідрравлічний діаметр
$\nu := 15.06 \cdot 10^{-6}$	$\frac{м^2}{с}$	кінематична вязкість для повітря при T = 20 С
$Re := \frac{Vsum \cdot Dg}{\nu} = 1.306 \times 10^5$		число Рейнольдса
$Nu := 0.032Re^{0.8} = 396.175$		число Нусельта
$\lambda := 0.0259$	$\frac{Вт}{м \cdot град}$	коєф. теплопровідності повітря при T = 20 С
$\alpha := \frac{Nu \cdot \lambda}{Dg} = 7.703$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot град}$	коєф. тепловіддачі
$\alpha_{cor} := \alpha \cdot 1.1 = 8.474$		поправка на довжину/діаметр (ст90 Михеев)
$T500 := 500$		температура, де повітря не буде згорати 500
$Tout := 127$		температу матеріалу який виходить з барабана-охолоджувача
$\Delta T := Tm - Tmv = 269.5$		різниця температур
$Q := \frac{[\alpha_{cor} \cdot \Delta T \cdot (L1 + L2) \cdot L]}{1000} = 124.45$	кВт	тепловий потік

ДОДАТОК Б РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ГАЗИФІКАЦІЇ

$T_0 := 21 + 273$	К	- нормальна температура
$L2 := 5.5$	м	- довжина зони газифікації в печі прожарювання
$L31 := 1.525$	м	- відстань від низу печі до верху зони газифікації
$L32 := 1.658$	м	- середня висота вертикальної частини зони газифікації
$L33 := 0.886$	м	- довжина похилої ділянки зони газифікації
$L4 := 3.3$	м	- довжина зони газифікації в барабані-охолоджувачі
$Db := 1.402$	м	- діаметр футерованої частини барабана
$Dp := 1.96$	м	- діаметр футерованої частини печі (за кресленням)
$nb := 4.25 \cdot \frac{1}{60} = 0.071$	$\frac{\text{об}}{\text{с}}$	- число обертів барабана-охолоджувача
$np := 2 \cdot \frac{1}{60} = 0.033$	$\frac{\text{об}}{\text{с}}$	- число обертів печі прожарювання
$\beta := 40 \cdot \frac{\pi}{180}$		- кут природного кута укосу матеріала
$\alpha := 44 \cdot \frac{\pi}{180}$		- кут нахилу похилої частини зони газифікації в патрубку
$\varphi_b := 2.29 \cdot \frac{\pi}{180}$		- кут нахилу барабана-охолоджувача
$\varphi_p := 2 \cdot \frac{\pi}{180}$		- кут нахилу печі прожарювання
$Q := \frac{5304.3}{3600} = 1.473$	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	- продуктивність печі за відхідним матеріалом
$\rho_{\text{nas}} := 700$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	- насипна густина прожареного матеріалу
$\rho_{\text{ist}} := 1600$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	- істинна густина прожареного матеріалу
$c_{\text{ist}} := 1800$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	- теплоємність прожареного матеріалу

$\rho_{\text{H}_2} := 0.09$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	- густина водню при н.у.
$Q_{\text{L}_\text{H}_2} := 10.78 \cdot 10^6$	$\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$	- нижча теплота згорання водню
$\rho_{\text{CO}} := 1.25$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	- густина оксиду вуглецю при н.у.
$Q_{\text{L}_\text{CO}} := 12.63 \cdot 10^6$	$\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$	- нижча теплота згорання оксиду вуглецю
$\rho_{\text{CH}_4} := 0.716$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	- густина метану при н.у.
$Q_{\text{L}_\text{C}} := 25.12 \cdot 10^6$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	- нижча теплота згорання антрациту
$Q_{\text{L}_\text{CH}_4} := 35.83 \cdot 10^6$	$\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$	- нижча теплота згорання метану
$Q_{\text{V}_\text{CH}_4} := 192$	$\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$	- витрата природного газу в піч прожарювання
$T_{\text{in}_\text{wH}_2\text{O}} := 200 + 273 = 473$	К	- температура водяного пару на вході в зону газифікації
$c_{\text{in}_\text{wH}_2\text{O}} := 2027$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	- теплоємність водяного пару
$\rho_{\text{in}_\text{wH}_2\text{O}} := 0.880$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	- густина водяного пару при н.у.
$T_{\text{f}} := 1250 + 273 = 1523$	К	- початкова температура матеріалу в зоні газифікації
$T_{\text{e}} := 682 + 273 = 955$	К	- кінцева температура матеріалу в зоні газифікації
$T_{\text{m}} := \frac{T_{\text{f}} + T_{\text{e}}}{2} = 1239$	К	- середня температура матеріалу в зоні газифікації
$T_{\text{atm}} := T_{\text{m}} - 50 = 1189$	К	- середня температура атмосфери в зоні газифікації

$R_{\text{gas}} := 8.3144$	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$	- універсальна газова стала
$E := 133200$	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$	- енергія активації реакції утворення синтез газу
$k := \frac{5 \cdot 10^4}{60} = 833.333$	с^{-1}	- предекспоненціальний множник константи швидкості реакції утворення синтез газу для вугілля
$q_{\text{SGN}} := 118000$	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$	- теплота хімічної реакції утворення синтез газу
$pr_{\text{O2}} := \frac{1.7}{100}$	доли	- вміст кисню в атмосфері зони реакції
$\rho_{\text{O2}} := 1.47$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	- густина кисню при н.у.
$c_{\text{in_CO2}} := 846$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	- теплоємність диоксиду вуглецю
$\rho_{\text{in_CO2}} := 1.980$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	- густина диоксиду вуглецю при н.у.
$ugar_baza := \frac{769.1}{3600} = 0.214$	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	- базовий угар матеріалу в печі
$v_{\text{inos}} := \frac{90}{3600} = 0.025$	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	- винесення пилу в газотранспортну систему
$g := 9.81$		

Визначаємо t_{31} - час падіння матеріалу з обертової печі до верху зони газифікації

$$v_0 := 0 \quad \text{- старт відліку, початкова швидкість}$$

$$REZ1 := v_0 \cdot t_1 + \frac{g \cdot t_1^2}{2} - L_{31} \text{ solve, } t_1 \rightarrow \begin{pmatrix} -0.55759056440433252717 \\ 0.55759056440433252717 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.558 \\ 0.558 \end{pmatrix}$$

$$t_{31} := REZ1_1 = 0.558 \quad \text{с}$$

Визначаємо v_1 - швидкість матеріалу на момент входу в зону реакції

$$v_1 := v_0 + g \cdot t_{31} = 5.47 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Визначаємо t32 - час падіння від верху зони реакції до низу вертикальної частини зони реакції

$$REZ2 := v0 \cdot (t31 + t32) + \frac{g \cdot (t31 + t32)^2}{2} - (L31 + L32) \text{ solve, } t32 \rightarrow \begin{pmatrix} -1.3631522712949733261 \\ 0.24797114248630828607 \end{pmatrix}$$

$$t32 := REZ2_1 = 0.248 \quad \text{с}$$

Визначаємо v2 - швидкість об'єкта на момент виходу з вертикальної частини зони реакції

$$v2 := v1 + g \cdot t32 = 7.903 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Визначаємо t33 - час ковзання матеріалу по перехідному носку до падіння в барабан-охолоджувач

$$REZ3 := v2 \cdot \sin(\alpha) \cdot t33 + \frac{g \cdot \sin(\alpha) \cdot t33^2}{2} - L33 \text{ solve, } t33 \rightarrow \begin{pmatrix} 0.14783204818316907132 \\ -1.7589554619644505596 \end{pmatrix}$$

$$t33 := REZ3_0 = 0.148 \quad \text{с}$$

$$t3 := t31 + t32 + t33 = 0.953 \quad \text{с}$$

Визначаємо час перебування матеріалу в зоні реакції в печі прожарювання

$$t2 := \frac{1.77 \cdot L2 \cdot \sqrt{\beta \cdot \frac{180}{\pi}}}{\varphi_p \cdot \frac{180}{\pi} \cdot D_p \cdot n_p} = 471.196 \quad \text{с}$$

Визначаємо час перебування матеріалу в зоні реакції в барабані-охолоджувачі

$$t4 := \frac{1.77 \cdot L4 \cdot \sqrt{\beta \cdot \frac{180}{\pi}}}{\varphi_b \cdot \frac{180}{\pi} \cdot D_b \cdot n_b} = 162.441 \quad \text{с}$$

Визначаємо загальний час перебування матеріалу в зоні реакції:

$$tz := t2 + t4 = 633.637 \quad \text{с}$$

Визначаємо швидкість лінійного переміщення матеріалу в зоні реакції в барабані-охолоджувачі та в печі прожарювання

$$v2 := \frac{L2}{t2} = 0.012 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v4 := \frac{L4}{t4} = 0.02 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Визначаємо площу поперечного перерізу потоку матеріалу в зоні реакції в барабані-охолоджувачі (зона 4) та в печі прожарювання (зона 2)

$$S2 := \frac{Q}{v2 \cdot \rho_{\text{nas}}} = 0.18 \quad \text{м}^2$$

$$S4 := \frac{Q}{v4 \cdot \rho_{\text{nas}}} = 0.104 \quad \text{м}^2$$

Визначаємо кут сегмента потоку матеріалу в барабані-охолоджувачі (зона 4) та печі прожарювання (зона 2)

$$\phi_b := 0.5 \cdot \left(\frac{D_b}{2} \right)^2 \cdot (\phi - \sin(\phi)) - S4 \text{ solve, } \phi \rightarrow 1.408570150683642671 \quad \text{рад}$$

$$\phi_p := 0.5 \cdot \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 \cdot (\phi - \sin(\phi)) - S4 \text{ solve, } \phi \rightarrow 1.1126358479422144716 \quad \text{рад}$$

Визначаємо довжину хорд в потоці матеріалу в барабані-охолоджувачі (зона 4) та в печі прожарювання (зона 2)

$$bb := \frac{D_b}{2} \cdot \sin\left(\frac{\phi_b}{2}\right) \cdot 2 = 0.908 \quad \text{м}$$

$$bp := \frac{D_p}{2} \cdot \sin\left(\frac{\phi_p}{2}\right) \cdot 2 = 1.035 \quad \text{м}$$

Визначаємо масу поверхневого шару матеріалу в барабані-охолоджувачі (зона 4) та в печі прожарювання (зона 2) при товщині шару 10мм

$$m4 := bb \cdot L4 \cdot 0.01 \cdot \rho_{\text{nas}} = 20.97 \quad \text{кг}$$

$$m_2 := b_p \cdot L_2 \cdot 0.01 \cdot \rho_{nas} = 39.848 \quad \text{кг}$$

$$m_s := m_2 + m_4 = 60.817 \quad \text{кг}$$

Визначаємо масу і об'єм матеріалу в зоні взаємодії з паром

$$m_r := m_s = 60.817 \quad \text{кг}$$

$$v_r := \frac{m_r}{\rho_{ist}} = 0.038 \quad \text{м}^3$$

Визначаємо масу і об'єм матеріалу в зоні реакції

$$m_z := Q \cdot t_z = 933.611 \quad \text{кг}$$

$$v_z := \frac{m_z}{\rho_{ist}} = 0.584 \quad \text{м}^3$$

Визначаємо масу і об'єм матеріалу, який віддає тепло на реакцію, приймаємо:

$$m_{z_tp} := m_z = 933.611 \quad \text{кг}$$

$$v_{z_tp} := \frac{m_{z_tp}}{\rho_{ist}} = 0.584 \quad \text{м}^3$$

$$V_{reak} := \left(\frac{\pi L_4 \cdot D_b^2}{4} + \frac{\pi L_2 \cdot D_p^2}{4} \right) = 21.689 \quad \text{м}^3 \quad - \text{ загальний об'єм зони газифікації}$$

Визначаємо обсяг вільного від матеріалу простору в зоні реакції

$$V_{free} := V_{reak} - v_z = 21.10549 \quad \text{м}^3$$

Визначаємо масу вуглецю, який вступить в реакцію для утворення синтез (водяного) газу

$$m_C := k \cdot \int_{T_e}^{T_f} e^{\frac{-E}{R \cdot t}} dt \cdot \frac{m_r}{T_f - T_e} \cdot tz = 187.813 \quad \text{кг}$$

$$m_{H_2O} := 42 \quad \text{кг} \quad - \text{ для 100\% заміни природного газу}$$

$$m_{H_2O} := 72 \quad \text{кг} \quad - \text{ для генерації всієї можливої енергії синтезу газу}$$

$$m_C := m_{H_2O} \frac{12}{18} = 48 \quad \text{кг}$$

Визначаємо масу CO, отриманого в результаті реакції. Розрахунок проводиться виходячи з співвідношення молярних мас речовин, що беруть участь в реакції - CO (молярна маса 28) і C (молярна маса 12)

$$m_{CO} := \frac{28}{12} m_C = 112 \quad \text{кг}$$

Визначаємо масу H₂, отриманого в результаті реакції. Розрахунок проводиться виходячи з співвідношення молярних мас речовин беруть участь в реакції - H₂ (молярна маса 2) і C (молярна маса 12)

$$m_{H_2} := \frac{2}{12} m_C = 8 \quad \text{кг}$$

Визначаємо масову витрату речовин, які беруть участь в реакції газифікації

$$q_C := \frac{m_C}{tz} = 0.076 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad q_{C_h} := q_C \cdot 3600 = 272.712 \quad \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

$$q_{H_2O} := \frac{m_{H_2O}}{tz} = 0.114 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad q_{H_2O_h} := q_{H_2O} \cdot 3600 = 409.067 \quad \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

$$q_{CO} := \frac{m_{CO}}{tz} = 0.177 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad q_{CO_h} := q_{CO} \cdot 3600 = 636.327 \quad \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

$$q_{H_2} := \frac{m_{H_2}}{tz} = 0.013 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad q_{H_2_h} := q_{H_2} \cdot 3600 = 45.452 \quad \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

Визначаємо теплотворну здатність згорання синтез-газу

$$Q_{t_CO} := q_{CO} \cdot \frac{Q_{1_CO}}{\rho_{CO}} = 1785957.314 \quad \text{Вт}$$

$$Q_{t_H2} := q_{H2} \cdot \frac{Q_{1_H2}}{\rho_{H2}} = 1512258.217 \quad \text{Вт}$$

$$Q_{t_SGN} := Q_{t_CO} + Q_{t_H2} = 3298215.531 \quad \text{Вт}$$

Визначаємо аналогічний розрахунок обсягу метану за теплотворною здатністю

$$Q_{t_analog} := \frac{Q_{t_SGN}}{\frac{Q_{1_CH4}}{\rho_{CH4}}} = 0.066 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$Q_{t_h_analog} := Q_{t_analog} \cdot 3600 = 237.273 \quad \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

$$Q_{vt_h_analog} := \frac{Q_{t_h_analog}}{\rho_{CH4}} = 331.386 \quad \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

Визначаємо економію природного газу за рахунок теплоти згорання синтез газу

$$\frac{Q_{vt_h_analog}}{Q_{V_{CH4}}} \cdot 100 = 172.597 \quad \%$$

Визначаємо теплоту, яка витрачається на нагрів пара до температури реакції газифікації

$$Q_{H2O} := (T_m - T_{in_wH2O}) \cdot c_{in_wH2O} \cdot m_{H2O} = 111793104 \quad \text{Дж}$$

Визначаємо теплоту, яка витрачається на реакцію газифікації

$$Q_{SGN} := \frac{-(m_{H2O} + m_C)}{T_f - T_e} \cdot \int_{T_e}^{T_f} (-7165100 - 718.25 \cdot t + 0.1162 \cdot t^2 + 0.00007903 \cdot t^3) dt = 925835122 \quad \text{Дж}$$

Загальна теплота на нагрів пари і реакції газифікації

$$Q_{H_2O_SGN} := Q_{H_2O} + Q_{SGN} = 1037628226.452 \quad \text{Дж}$$

що аналогічно охолодження матеріалу, який прожарюється, до температури:

$$T_{end} := \frac{m_{z_tp} \cdot c_{ist} \cdot T_f - Q_{H_2O_SGN}}{(m_{z_tp} - m_C) \cdot c_{ist}} = 954.628 \quad \text{К} \quad T_{end} - 273 = 681.6 \quad \text{С}$$

- корекція по температурі реакції не потрібно так як прийнята $T_e = 955 \quad \text{К}$

Загальний час перебування матеріалу в печі

$$t := \frac{1.77 \cdot 41 \cdot \sqrt{\beta \cdot \frac{180}{\pi}}}{\varphi_p \cdot \frac{180}{\pi} \cdot D_p \cdot n_p} = 3512.548 \quad \text{с}$$

Теплота від згорання природного газу:

$$q := \frac{Q_{V_{CH_4}}}{3600} \cdot Q_{I_{CH_4}} = 1910933.333 \quad \text{Вт}$$

Залишок теплоти від згорання синтез газу після компенсації теплоти згорання природного газу

$$dq := Q_{t_SGN} - q = 1387282.198 \quad \text{Вт}$$

що еквівалентно згоранню антрациту масою

$$m_a := \frac{dq}{Q_{I_C}} = 0.055 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Загальний угар матеріалу з вихідних даних:

$$\left[\frac{\text{ugar_baza} + \text{vinos}}{Q + (\text{ugar_baza} + \text{vinos})} \right] \cdot 100 = 13.939 \quad \% \quad \text{ugar_baza} + \text{vinos} = 0.239$$

Угар, за рахунок використання надлишкової енергії згорання синтез газу, зменшиться на

$$U := \text{ugar_baza} - m_a = 0.158 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Угар матеріалу, витраченого на утворення синтез-газу

$$\frac{m_C}{t_z} = 0.076 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad \frac{m_C \cdot 3600}{t_z} = 272.712 \quad \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

Результуючі втрати матеріалу складуть

$$U_s := \text{ugar_baza} + \text{vinos} + \frac{m_C}{t_z} - m_a = 0.259 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$\left[\frac{U_s}{Q + (\text{ugar_baza} + \text{vinos})} \right] \cdot 100 = 15.138 \quad \%$$

ДОДАТОК В РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛОТИ З КОРПУСУ ПЕЧІ

Код програми:

```
#include <iostream>  
#include <cmath>  
using namespace std;  
const double pi = 3.1415;  
//температура навколишнього середовища  
const double Tns = 293.0;  
//зовнішній діаметр кожуха печі  
const double Ds = 2.54;  
//зовнішній діаметр азбестового шару  
const double Da = 2.5;  
//зовнішній діаметр вогнетривкого шару  
const double Dsh =2.486;  
//внутрішній діаметр печі  
const double Dgaz =2.206;  
//теплопровідність вогнетривкого шару  
const double Lsh = 1.16;  
//теплопровідність азбесту  
const double La = 0.116;  
//теплопровідність сталі  
const double Ls = 45;  
//швидкість обертання печі, об/с  
const double Nr = 0.033333;  
//температура повітря на вході в рекупераційний кожух  
const double Tr_b = 293.0;  
//витрати повітря м3/с  
const double Q = 2.097;  
//густина повітря кг/м3  
const double ro_p = 1.2754;  
//ступінь чорноти кожуха та оболонки  
const double eps = 0.9;  
//температура газового середовища в середині печі  
double Tgaz(double x)  
{  
double k = (1.46798E-03*x*x*x*x - 4.28147E-01*x*x*x + 2.83933E+01*x*x -  
6.74383E+02*x + 6.42936E+03)+273;  
return k;  
}  
//температура зовнішньої поверхні барабану  
double Ts(double x)  
{
```

```

double k = (2.53122E-4*x*x*x*x - 6.51456E-2*x*x*x + 4.18352*x*x - 9.81561E+1*x
+ 9.29279E+2)+273;
return k;
}
//коєфф. тепловіддачі від зовнішньої поверхні в навколишнє середовище
double Asp(double _T)
{
    double T = _T-273;
    double k = 0.0623*T+7.7914;
    return k;
}
//визначаємо коєфф. тепловіддачі від газу до внутрішньої поверхні печі
double Agaz(double x)
{
    double q;
    q = Asp(Ts(x))*pi*Ds*(Ts(x)-Tns);
    double m;
    m =
q*(log(Dsh/Dgaz)/(2*Lsh)+log(Da/Dsh)/(2*La)+log(Ds/Da)/(2*Ls)+1/(Asp(Ts(x))*Ds));
    double k = q/(Dgaz*(pi*(Tgaz(x)-Tns)-m));
    return k;
}
//визначаємо відносну швидкість повітряного потоку в зазорі між кожухом печі та
оболонкою
double Vpp(double Do)
{
    double k = Q/(pi/4*(Do*Do-Ds*Ds));
    return k;
}
//визначаємо гідравлічний діаметр
double Dgid(double Do)
{
    double k = (Do-Ds)/2;
    return k;
}
//визначаємо кінематичний коєфіцієнт в'язкості, м/с2
double Nupp(double _T)
{
    double T = _T-273;
    double k = (5.63884E-05*T*T + 9.73608E-02*T + 1.30031E+01)/1000000.0;
    return k;
}
//визначаємо теплопровідність повітряного потоку, Вт/(м*К)
double Lpp (double _T)
{
    double T = _T-273;

```



```

    double k = -2.01397E-08*T*T + 7.84499E-05*T + 2.43658E-02;
    return k;
}

//визначаємо теплоємність повітряного потоку, Дж/(кг*К)
double Cpp(double _T)
{
    double T = _T-273;
    if (T <= 60) return 1005;
    if (T <= 120) return 1009;
    double k = 1.85727*T + 9.61485E+02;
    return k;
}

//визначаємо коеф. тепловіддачі від кожуха печі в повітряний потік, Вт/(м2*К)
double App1(double T, double Do)
{
    double v = Vpp(Do);
    v = sqrt(Np*Np*pi*pi*Ds*Ds+v*v);
    double k = 0.032*pow(v*Dgid(Do)/Nupp(T),0.8)*Lpp(T)/Dgid(Do);
    return k;
}

//визначаємо коеф. тепловіддачі від оболонки в повітряний потік, Вт/(м2*К)
double App2(double T, double Do)
{
    double v = Vpp(Do);
    double k = 0.032*pow(v*Dgid(Do)/Nupp(T),0.8)*Lpp(T)/Dgid(Do);
    return k;
}

//визначаємо температуру оболонки
double To(double _Ts, double q, double qpp1, double Do)
{
    double k = 100.0*pow(_Ts*_Ts*_Ts*_Ts/100000000-(q-qpp1)*(1/eps+(1/eps-1)*Ds/Do))/(pi*Ds*5.6687),1.0/4.0);
    return k;
}

//баланс теплових потоків
double Ballans(double x, double Tpp, double Do, double &qpp1, double &qpp2, int &error)
{
    error = 1;
    double q;
    q = pi*Ds*Asp(Ts(x))*(Ts(x)-Tns);
    qpp1 = pi*Ds*App1(Tpp,Do)*(Ts(x)-Tpp);
    if (q < qpp1) return 0;
    double _To = To(Ts(x),q,qpp1,Do);
    qpp2 = pi*Do*App2(Tpp,Do)*(_To-Tpp);
}

```

```

    if (q < qpp1+qpp2) return 0;
    double qns;
    qns = pi*Ds*Asp(_To)*(_To-Tns);
    double k = q - qpp1 - qpp2 - qns;
    error = 0;
    return k;
}
//рішення рівняння за методом Ньютона
double NewtonMethod(double x, double Tpp, double Do_start, double _eps, double
&qpp1, double &qpp2)
{
    double Do,Do_prev,Do_prev_prev;
    double f,f_prev,f_prev_prev;
    Do_prev = Do_start-0.001;
    double _qpp1,_qpp2;
    long i = 0;
    int error = 0;
do {
    Do_prev += 0.001;
    f_prev = Ballans(x,Tpp,Do_prev,_qpp1,_qpp2,error);
    i++;
} while ((error == 1) && i < 10000);
Do = Do_prev+0.001;
f = Ballans(x,Tpp,Do,_qpp1,_qpp2,error);
i = 0;
do {
    Do_prev_prev = Do_prev;
    Do_prev = Do;
    f_prev_prev = f_prev;
    f_prev = f;
    Do = Do_prev - f_prev*(Do_prev-Do_prev_prev)/(f_prev-f_prev_prev);
    f = Ballans(x,Tpp,Do,_qpp1,_qpp2,error);
    i++;
} while ((fabs(Do - Do_prev) > _eps) && (i < 10000));
qpp1 = _qpp1;
qpp2 = _qpp2;
return Do;
}
//приріст температури повітряного потоку
double DT(double T, double Qpp, double m) {
    double k = (Qpp/(Cp(T)*m));
    return k; }
int main()
{
    //початок зони рекуперації
    double x_b = 20.0;

```

```

//кінець зони рекуперації
double x_e = 40.0;
//крок
double step = 0.001;
double x_curr = x_b;
double Tpp = Tp_b;
//початкове значення зовнішнього діаметру оболонки печі
double Do = Ds+0.02;
cout << "X,m; Tpp,C; Do,m; Ts, C; Alfa, Vt/(kg*K)" << endl;
do {
    double qpp1;
    double qpp2;
    Do = Ds+0.01;
    Do = NewtonMethod(x_curr+step/2, Tpp, Do, 0.0001, qpp1, qpp2);
    double v = Vpp(Do);
    double _dT = DT(Tpp,qpp1*step+qpp2*step,pi/4*(Do*Do-Ds*Ds)*ro_p*v);
    Do = NewtonMethod(x_curr+step/2, Tpp+_dT/2, Do, 0.0001, qpp1, qpp2);
    v = Vpp(Do);
    _dT = DT(Tpp+_dT/2,qpp1*step+qpp2*step,pi/4*(Do*Do-Ds*Ds)*ro_p*v);
    cout << x_curr << ";" << Tpp+_dT/2-273 << ";" << Do << ";" << Ts(x_curr)-
273 << ";" << App1(Tpp+_dT/2,Do) << endl;
    Tpp = Tpp+_dT;
    x_curr += step;
}

while (x_curr <= x_e);
return 0;

}

```