

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШВАЧКО ДЕНИС ГРИГОРОВИЧ

УДК 66.01: 66.011

ДИСЕРТАЦІЯ

**ТЕПЛОВА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУТЕРІВКИ ОБЕРТОВИХ
ПЕЧЕЙ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БУДМАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д. Г. Швачко

Науковий керівник Щербина Валерій Юрійович, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Швачко Д.Г. Теплова ефективність футерівки обертових печей для виробництва будматеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів економії палива й збільшення продуктивності обертових печей промисловості будівельних матеріалів шляхов встановлення додаткової теплової ізоляції. У роботі викладені результати теоретичних й експериментальних досліджень стосовно збільшення ефективності роботи обертових печей і методи визначення температурних і механічних напружень, що виникають у вогнетривах футерівки високотемпературної зони. Використання додаткової ізоляції в футеровці є більш ефективним способом економії енергії, ніж економія палива. Ці дані можна використовувати для оптимізації роботи теплових агрегатів.

Обертові теплові агрегати барабанного типу – обертові печі, знайшли широке застосування в багатьох областях промисловості, де вони використовуються як основні пристрої в процесі обробки сировинного матеріалу. Багато печей є унікальними не тільки за розмірами, але й по складності конструкції. Крім того, багато з цих пристроїв працюють в умовах високих температур, високого тиску, агресивних середовищ і високої запиленості, що вимагає спеціальних заходів для підвищення надійності, безпеки і довговічності. Ефективність їхнього застосування в значній мірі залежить від використання ефективних і раціональних конструктивних елементів, які повинні забезпечити довгострокову й надійну роботу пічного агрегату.

В першому розділі сучасний стан проблеми, зроблено критичний огляд відомих конструктивних рішень та освітлені питання про можливі варіанти

підвищення теплової ефективності обертових печей для випалу будматеріалів за рахунок збільшення теплового опору футерівки (ТОФ) високотемпературної зони печі.

Для дослідження можливостей збільшення ТОФ необхідно використовувати теоретичну модель, що імітує протікання теплових процесів в обертових печах. Аналіз робіт, присвячених цій проблемі показав, що у моделях не враховується вплив на тепловий режим печі зміну ТОФ у процесі зношування вогнетриву.

Аналіз стану теорії й практики роботи обертових печей дозволили зробити висновок про можливість збільшення ТОФ печі шляхом зміни конфігурації вогнетриву з метою укладання в одержувані в такий спосіб комірки, між вогнетривом і корпусом печі, додаткового матеріалу з високими теплоізоляційними властивостями. Для вибору оптимальної конструкції вогнетриву необхідно мати дані про його напружено - деформований стан (НДС), що виникає при роботі печі. Аналізуючи роботи з цього питання, встановлено, що методики розрахунку, які застосовуються, є недостатньо повними.

В другому розділі дослідженні ефективності використання печі було встановлено, що додаткової теплоізоляції в зоні випалювання дає 4% економії тепла в навколишнє середовище через корпус. При цьому збільшується продуктивність печі, а економія палива при колишній продуктивності складає до 4 тис. тонн умовного палива в рік (для печі 5x185м), тобто 4% економії тепла по корпусу збільшує ефективність використання печі на 9.2%

Приріст тепла, що відбувається в печі, пояснюється більш повним використанням палива у високотемпературних зонах, чим досягається зменшення його ентальпії в підготовчих зонах. За рахунок цього температура димових газів, що відходять із печі, зменшується, а коефіцієнт використання палива збільшується.

Таким чином, проведений числовий аналіз дає можливість визначити вплив додаткової теплоізоляції на тепловий процес печі. У зв'язку з цим актуальним є питання вибору такої конструкції футерівки, що при збереженні таких властивостей як товщина, вага на погонний метр печі, хімічний склад вогнетриву

мала б більш високий термоопір.

В третьому розділі досліджувалося розподіл температур в футерівці, розглядався перетин печі. Досліджувались циклічність температурних полів у футерівці. На основі рівняння теплопровідності в нестационарній постановці враховувались швидкості обертання; підвід тепла від газового потоку; відвід тепла через корпус печі; обертання футерівки. Передача тепла до матеріалу здійснювалася: від газового потоку та прогрітої футерівки. Крім цього, матеріал постійно переміщується по внутрішній поверхні футерівки.

Для моделювання роботи печі використовується нелінійне нестационарне рівняння теплопровідності в циліндричній системі координат.

Сформульована компромісна задача, яка повинна бути розв'язана при розробленні нової конструкції футерівки. А саме: для того, щоб підвищити тепловий опір футерівки у вогнетриві необхідно збільшити розміри комірки з теплоізоляційним матеріалом. При цьому в даній комірці, особливо по мірі зносу вогнетриву, температура підвищується і може перевищити діапазон температур при використанні реального теплоізоляційного матеріалу. Тому потрібно визначити теплоізоляційний матеріал який можливо використовувати, та геометричні розміри комірки, які в достатній мірі збільшують тепловий опір і водночас є прийнятними по температурному режиму для конкретного теплоізоляційного матеріалу.

Процес моделювання термонапружень конструкцій виконується в два етапи. На першому вирішується завдання теплопровідності, а другий етап полягає у формуванні матриці жорсткості та вектора еквівалентних вузлових термосилових навантажень з урахуванням отриманого температурного поля. Після розв'язання задачі на основі отриманих значень вузлових переміщень розраховуються деформації та напруження в елементах скінченноелементної моделі.

Для вирішення завдання з розрахунку температурних полів і термомеханічних напружень в корпусі обертового теплового апарату використовувалася інтегрована система VESNA, розроблена на кафедрі хімічного,

полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Зазначена система призначена для моделювання гідродинамічних, теплових процесів та виконання розрахунків на міцність з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Система враховує лінійні та нелінійні деформаційні процеси просторово зв'язаних систем, що складаються з ізотропних та анізотропних матеріалів.

Створення прогресивних технологій з мінімальними витратами матеріальних і енергетичних ресурсів - одна з найважливіших задач усіх галузей народного господарства, у тому числі і будівельній індустрії, до якої відноситься і виробництво будівельних матеріалів і виробів.

При виборі конфігурації вогнетриву враховується, як ефективність одержуваної теплоізоляції, що зі збільшенням розміру комірок підвищується, так і конструктивна надійність вогнетриву, обумовлена величиною виникаючих у ньому термомеханічних навантажень.

Створення математичної моделі напруженого стану вогнетриву дозволить визначити величини компонентів термомеханічних навантажень, що виникають у ньому при роботі печі. За числовим значенням напружень можна прогнозувати загальний стан печі, визначати ступінь «наробітку» вогнетривів у різних зонах, що сприятиме підвищенню експлуатаційної надійності теплового агрегату. В окремому випадку, спираючись на знання напружено-деформованого стану, є можливість розробки конструкції футерівки, яка є надійною в роботі, і ефективною з погляду зменшення тепловтрат у навколишнє середовище.

В четвертому розділі представлено експериментальне дослідження пов'язана з необхідністю отримати температурні поля і оцінити правильності математичної моделі й методики розрахунку температурних полів у тілі вогнетриву. Випробування проводилося в електричній нагрівальній печі. Під час випробувань піч працювала в автономному режимі. Контроль температури здійснювався за допомогою встановленої в піч термопари. Також про

В висновках по роботі становлено що, є актуальним дослідженням установки футерівки з фасонним вогнетривом для збільшення теплового опору футерівки й зменшення втрат тепла в навколишнє середовище. При цьому пропонується метод розрахунку корпусу, футерівки, бандажів і інших конструктивних елементів обертової печі з визначенням напружено-деформованого стану конструкції при комплексному врахуванні термосилових і інших факторів навантаження, що дозволяє окремо проаналізувати їх вплив і визначити оптимальні умови роботи.

Таким чином, систематизований підхід до виявлення основних чинників впливу на енергоємність виробленої продукції та зменшення витрат природного газу на піч є актуальною задачею енергозбереження у виробництві в'язучих матеріалів, пористих заповнювачів та ін.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні наукових методик розробки і вдосконалення обертових печей, що забезпечує підвищення продуктивності та зменшення теплових затрат, можливість вибору раціональних параметрів та режимів їх роботи.

Науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри , ХПСМ КПП імені Ігоря Сікорського.

Ключові слова: обертова піч, піч, вогнетрив, вогнетривка футерівка, теплоізоляція, температура, числове моделювання, димові гази, тепловий потік, аналітичний метод розрахунку, температурний режим, деформація, амплітуда, напружено-деформований стан, напруження, деформація, числові розрахунки.

ABSTRACT

Shvachko D.G. Thermal efficiency of the lining of rotary kilns for the production of building materials. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 133 "Industrial Mechanical Engineering". - National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2023.

The dissertation is dedicated to the development of methods of saving fuel and increasing the productivity of rotary kilns of the building materials industry by installing additional heat insulation. The work presents the results of theoretical and experimental research concerning increasing the efficiency of rotary kilns and methods of determining temperature and mechanical tensions, arising in refractory linings of the high-temperature zone. The use of additional insulation in the lining is a more effective way of saving energy than saving fuel. These data can be used to optimize the operation of thermal units.

Drum-type rotary heat units - rotary furnaces - are widely used in many areas of industry, where they are used as the main devices in the raw material processing process. Many stoves are not only unique by size, but also by the complexity of the design. In addition, many of these devices work in conditions of high temperatures, high pressure, aggressive environments and high dustiness, which requires special measures to increase reliability, safety and durability. The effectiveness of their application largely depends on the use of effective and rational structural elements that should ensure long-term and reliable operation of the furnace unit.

In the first chapter the current state of the problem, a critical review of known constructive solutions and illuminated questions about possible options for increasing the thermal efficiency of rotary kilns for firing building materials at the expense of magnification of thermal resistance of the lining (TOF) of the high-temperature zone of the furnace.

To study the possibilities of increasing the TOF, it is necessary to use a theoretical model that simulates the flow of thermal processes in rotary kilns. Analysis

of works devoted to this problem showed, which is not taken into account in the models influence on the heat mode of the oven change TOF in the process of wearing out the refractory.

Analysis of the state of the theory and practice of operation of rotary kilns allowed us to draw a conclusion about the possibility of increasing the TOF of the kiln by changing the configuration of the refractory in order to place additional material with high heat-insulating properties in the cells obtained in this way, between the refractory and the furnace body. In order to choose the optimal design of the refractory, it is necessary to have data on its stress-strain state (STS), which occurs during the operation of the furnace. Analyzing works on this issue, it was established that calculation methods, which apply, are not complete enough.

In the second chapter a study of the effectiveness of the use of the furnace found that additional thermal insulation in the firing zone gives 4% savings of heat to the environment through the case. At the same time, the productivity of the furnace increases, and the fuel saving at the previous productivity is up to 4 thousand tons of conventional fuel per year (for a 5x185m furnace), i.e. 4% heat savings on the case increases the efficiency of using the stove by 9.2%

The increase in heat occurring in the furnace is due to the more complete use of fuel in high-temperature zones, which results in a decrease in its enthalpy in the preparation zones. Due to this, the temperature of flue gases leaving the furnace decreases, and the fuel utilization rate increases.

Thus, the conducted numerical analysis makes it possible to determine the effect of additional thermal insulation on the thermal process of the furnace. In this regard, the question of choosing such a design of the lining is relevant, so that while preserving such properties as thickness, weight per linear meter of the furnace, the chemical composition of the refractory would have a higher thermal resistance.

In the third chapter the temperature distribution in the lining was studied, the section of the furnace was considered. The cyclicity of temperature fields in the lining was studied. On the basis of the heat conduction equation in the non-stationary setting,

the rotational speeds were taken into account; supply of heat from gas flow; heat removal through the furnace body; rotation of the lining. Heat was transferred to the material: from the gas flow and the heated lining. In addition, the material constantly moves along the inner surface of the lining.

A non-linear non-stationary heat conduction equation in a cylindrical coordinate system is used to model the operation of the furnace.

A compromise problem is formulated, which must be solved when developing a new design of the lining. Namely: in order to increase the thermal resistance of the lining in the refractory, it is necessary to increase the size of the cell with heat-insulating material. At the same time, in this cell, especially as the refractory wears, the temperature rises and may exceed the temperature range when using real heat-insulating material. Therefore, it is necessary to determine the heat-insulating material that can be used, and the geometric dimensions of the cell, which sufficiently increase the thermal resistance and at the same time are acceptable according to the temperature regime for a specific heat-insulating material.

The process of modeling thermal stresses of structures is performed in two stages. The first stage solves the problem of thermal conductivity, and the second stage consists in the formation of the stiffness matrix and the vector of equivalent nodal thermoforce loads taking into account the obtained temperature field. After solving the problem, based on the obtained values of nodal displacements, the deformations and stresses in elements of the finite element model.

To solve the problem of calculating temperature fields and thermomechanical stresses in the body of a rotating thermal apparatus, the integrated system VESNA, developed at the Department of Chemical, Polymer and Silicate Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" was used. This system is designed for modeling hydrodynamic and thermal processes and performing strength calculations using the finite element method (FEM). The system takes into account linear and non-linear deformation

processes of spatially connected systems consisting of isotropic and anisotropic materials.

The creation of progressive technologies with minimal expenditure of material and energy resources is one of the most important tasks of all branches of the national economy, including the construction industry, which includes the production of building materials and products.

When choosing the configuration of the refractory, both the efficiency of the resulting thermal insulation, which increases with the increase in the size of the cells, and the structural reliability of the refractory, due to the magnitude of the thermomechanical loads arising in it, are taken into account.

The creation of a mathematical model of the stressed state of the refractory will allow to determine the values of the components of thermomechanical loads that arise in it during the operation of the furnace. Based on the numerical value of the stresses, it is possible to predict the general condition of the furnace, to determine the degree of "working up" of refractories in different zones, which will contribute to increasing the operational reliability of the thermal unit. In a separate case, based on the knowledge of the stress-strain state, it is possible to develop a lining design that is reliable in operation and effective in terms of reducing heat loss to the environment.

The fourth chapter presents experimental research is related to the need to obtain temperature fields and assess the correctness of the mathematical model and method of calculating temperature fields in the refractory body. The test was conducted in an electric heating furnace. During the tests, the furnace worked in autonomous mode. The temperature was controlled using a thermocouple installed in the oven. Also about

In the conclusions of the work it was determined that it is a relevant study of the installation of a lining with a shaped fireproof to increase the thermal resistance of the lining and reduce heat loss to the environment. At the same time, a method of calculating the body, lining, bandages and other structural elements of a rotary kiln is proposed with the determination of the stress-strain state of the structure with the

comprehensive consideration of thermodynamic and other load factors, which allows to separately analyze their influence and determine the optimal operating conditions.

Thus, a systematic approach to identifying the main factors influencing the energy intensity of manufactured products and reducing the consumption of natural gas per furnace is an urgent task of energy saving in the production of binding materials, porous aggregates, etc.

The scientific novelty of the obtained results lies in the creation of scientific methods for the development and improvement of rotary furnaces, which ensures an increase in productivity and a decrease in heat consumption, the possibility of choosing rational parameters and modes of their operation.

The scientific and technical results of the dissertation work are implemented in the educational process of the department, KhPSM KPI named after Ihor Sikorskyi.

Keywords: rotary kiln, furnace, refractory, refractory lining, thermal insulation, temperature, numerical modeling, flue gases, heat flow, analytical calculation method, temperature regime, strain, amplitude, stress-strain state, stress, strain, numerical calculations.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях

1. Панов, Е. Н., Карвацкий, А. Я., Лелека, С. В., Лазарев, Т. В., Педченко, А. Ю., Швачко, Д. Г. Method for determining the bulk temperature of the acheson graphitization furnace core//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, PC Technology Center, 2015, Том 3, № 5, С.41-46.

2. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г., Ефименко Е.А. Дослідження напружено–деформованого стану обертового теплового агрегату // Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Серія Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. №1(17), 2018, С. 65-71.

3. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г. Підвищення енергоефективності обортових теплових агрегатів // Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки, Том 29 (68), № 4, Ч.2, 2018, С. 68-72.

4. Швачко Д.Г., Щербина В.Ю. Методика оперативного розрахунку теплового режиму в фасонному вогнетриві // Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. №1(18), 2019, С. 102-109.

5. Shcherbina V., Shvachko D., Borshchik S. Heat exchange simulation in energy zones of a rotarykiln with change of heat resistance of the body // Technology audit and production reserves №6/1(50), 2019, P. 36-41.

6. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г. Моделювання процесу нестационарного теплообміну в футерівці обортових агрегатів // Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. №2(19), 2020, С. 20-31.

7. Щербина В. Ю. Швачко Д.Г. Вплив теплоізоляції футерівки на теплообмін обортових апаратів // Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. №2(21), 2022, С. 20-31.

8. Щербина В. Ю. Швачко Д.Г. Підвищення енергоефективності обортових печей за використання вогнетривів з теплоізоляцією // Журнал «Вісник Вінницького політехнічного інституту». №5, 2022, С.52-57.

Статі у інших виданнях

9. Shvachko D.G., Shcherbina V. Yu., Borshchik S. A Thermal protection insulation in the lining of the rotary kilns // Modern engineering and innovative technologies. Karlsruhe, Germany.2021, №16-01, P.18-23.

10. Shvachko D.G., Shcherbina V. Yu., Li Dao,Borshchik S. A. About increasing the life of the supporting units of the drum furnaces// Modern engineering and innovative technologies, Germany. 2021, №17-01, P.16-24.

Апробація матеріалів дисертації на конференціях

11. Щербина В. Ю., Швачко Д. Г. Теплозащитная изоляция в футеровке вращающейся печи // Збірник доповідей V Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві». – Суми: СДУ, 2018, С. 70-71.

12. Щербина В. Ю.Швачко Д. Г.,Борщик С.О. Розділення гетерогенних систем в запічних теплообмінниках обертових печей // Матеріали XXIV МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ”ГІДРОАЕРОМЕХАНІКА В ІНЖЕНЕРНІЙ ПРАКТИЦІ“.– К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 96-99.

13. Shcherbina V., Shvachko D. Formation of chips in the refractories of the lining of the rotary kiln // The 4th International scientific and practical conference “Dynamics of the development of world science” (December 18-20, 2019) Perfect Publishing, Canada. 2019. P.586-594.

14. Швачко Д.Г., Щербина В.Ю., Борщик О.С. Дослідження температурних полів в фрагменті футерівки печі з додатковою теплоізоляцією // The 7th International scientific and practical conference “Actual trends of modern scientific research” (February 14-16, 2021) MDPC Publishing, Munich, Germany. 2021. P.253-261.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ	17
ВСТУП.....	21
1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУТЕРІВКИ ОБЕРТОВИХ ПЕЧЕЙ	27
1.1 Роль і місце обпалювальних печей в промисловості будівельних матеріалів	27
1.1.1.Печі для мокрого способу випалу	29
1.1.2. Печі для «сухого» способу випалу	30
1.2.Проблеми пічних агрегатів.....	32
1.3.Методи підвищення ефективності роботи теплових агрегатів	36
1.4 Постановка задачі і програма досліджень	42
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ОБЕРТОВИХ ПЕЧАХ	47
2.1. Моделювання теплових процесів в обертівій печі з футерівкою підвищеного термоопору.....	48
2.1.1 Тепловий баланс пічної установки.....	50
2.1.2 Визначення витрат палива, температури газів, що відходять, і втрат теплоти в навколишнє середовище	54
2.2 Теплообмін в корпусі печі	56
2.2.1 Методика оперативного розрахунку термо опору у футерівці з фасонним вогнетривом	57
2.2.2 Порівняння числового та аналітичного рішень.....	60
2.3 Опис математичної моделі та алгоритму розрахунку	65
2.3.1 Алгоритм розрахунку печі з додатковою теплоізоляцією корпусу.....	66
2.3.1 Алгоритм розрахунку печі з додатковою теплоізоляцією корпусу.....	69
2.4 Дослідження теплових режимів обертних печей	71
2.4.1 Рішення контрольно–тестових задач	71
2.4.2 Дослідження ефективності теплового агрегату при наявності футерівки з теплоізоляцією	74

2.4.3 Вплив теплоізоляції ,встановленої в різних енергетичних зонах.....	92
2.5 Висновки до розділу 2	96
3 ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ РОБОТИ ФУТЕРІВКИ ПЕЧЕЙ	98
3.1 Вплив теплової ізоляції футеровки на теплообмін у високотемпературній зоні оберткової печі	98
3.1.1 Математична модель дослідження теплообміну в футерівці	98
3.1.2 Моделювання процесу заповнення печі матеріалом	107
3.1.3 Теплообмін та процес регенерації теплоти з врахуванням стирання	111
3.2 Теплова ефективність футерівки з фасонним вогнетривом.....	121
3.2.1 Постановка задачі	121
3.2.2 Розрахунок комірки трикутної форми.	123
3.2.3 Розрахунок комірки прямокутної форми	130
3.3 Визначення форми теплоізоляційної комірки з врахуванням термосилових навантажень	134
3.3.1 Постановка задачі при розрахунку на міцність	134
3.3.2 Алгоритм рішення завдання	138
3.3.3 Визначення НДС фасонного вогнетрива	139
3.4 Висновки до розділу 3	145
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ В ФУТЕРІВЦІ З ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЄЮ	147
4.1 Постановка задачі дослідження	147
4.2 Опис експериментальної установки.....	147
4.3 Висновки за розділом 4	153
ВИСНОВКИ	154
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	157
ДОДАТОК	170

ДОДАТОК А БЛОК-СХЕМА ТА ОПИС ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА FORTRAN РОЗРАХУНКУ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ Й ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ В НІЙ ДОДАТКОВОЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ	171
ДОДАТОК Б ПРОГРАМА ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПРОДУКТИВНОСТІ ПЕЧІ ПРИ ПІДВИЩЕНОМУ ТЕПЛОВОМУ ОПОРІ ФУТЕРІВКИ	175
ДОДАТОК В ТЕКСТ ПРОГРАМИ МОДУЛЯ «FUTEROVKA.CPP»	186
ДОДАТОК Г ОЦІНКА ПОХИБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.	191
ДОДАТОК Д ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ	195

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

a – температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$;

c – теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

D_n – діаметр печі, м ;

d – діаметр частинки, м ;

E – модуль пружності, Па ;

Fo – критерії Фур'є;

F_m' – ступінь заповнення печі матеріалом, %;

Fr – критерій Фруда;

F – вектор масових сил, діючих на одиницю маси речовини, н ; площа поверхні, м^2 ;

G_i^n – кількість пилу, що виноситься з i -ї зони, $\text{кг}/\text{кг}$;

G_i^m – витрата енергії на нагрів та перетворення в матеріалі відносно зони, $\text{Дж}/\text{кг}$;

G_m^c – практична витрата сухої сировини, $\text{кг}/\text{кг}$;

k_σ – зведений коефіцієнт;

$[K]$ – матриця, пружні властивостей матеріалу;

K_{BL} – критерій руйнування В.П. Баландіна;

l – довжина, м ;

n_i – компоненти одиничного вектора зовнішньої нормалі до поверхні тіла;

$n_{\text{п}}$ – швидкість обертання печі, $\text{об}/\text{с}$;

Nu – число Нуссельта;

p – тиск, Па ;

P_1 – теплові втрати через корпус відносно зони, $\text{Дж}/\text{кг}$;

$\{P\}$ – вектор еквівалентних вузлових термосилових навантажень, н ;

Pr – критерій Прандтля;

q – густина теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

Q – тепловий потік, Вт ; кількість теплоти, Дж ;

$\{Q\}$ – вектор внутрішніх і граничних теплових джерел, Дж ;

Q_1 – теплота клинкероутворення, Дж;

Q_2 – теплота випаровування води з сировини, Дж;

$Q_3(t_{omx}^{\Gamma})$ – втрати теплоти з газами, що відходять, Дж;

Q_4 – втрати теплоти з клінкером, Дж;

Q_5 – втрати з повітрям, яке відходить з холодильника, Дж;

$Q_6(t_{omx}^{\Gamma})$ – втрати теплоти з пилом виносу, Дж;

Q_7 – втрати теплоти через корпус в зовнішнє середовище, Дж;

Q_V – джерело теплової енергії, Дж;

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – нижча теплота згоряння робочого палива, Дж/кг;

Q_{Γ} – загальна кількість тепла, що виділяється газовим потоком, Вт;

$Q_{c-m}^{\prime l}, Q_{c-m}^{\prime \prime l}$ – кількість тепла, що отримує матеріал з суміжних зон, Вт.

$Q_{c-\phi}^{\prime l}, Q_{c-\phi}^{\prime \prime l}$ – кількість тепла, що отримує футерівка з суміжних зон, Вт;

Q_M – загальна кількість тепла, яку отримує матеріал, Вт;

Q_H – кількість тепла, що віддає поверхня печі навколишньому середовищу, Вт;

$Q_{\phi M}^{\tau}$ – кількість тепла, що віддається закритій матеріалом поверхні футерівки закритою поверхнею матеріалу, Вт;

$Q_{\phi M}^{\prime l}$ – кількість тепла, що віддається випромінюванням відкритою поверхнею футерівки відкритій поверхні матеріалу, Вт;

$Q_{\Gamma M}^{\prime l}, Q_{\Gamma M}^K$ – кількість тепла, що віддається газовим потоком випромінюванням та конвекцією відкритій поверхні матеріалу, Вт;

$Q_{\Gamma \phi}^{\prime l}, Q_{\Gamma \phi}^K$ – кількість тепла, що віддається газовим потоком випромінюванням та конвекцією відкритій поверхні футерівки, Вт;

Rs – витрата палива, $\text{нм}^3/\text{год}$; число Рейнольдса;

t_{omx}^{Γ} – температура газів, що відходять з печі; $^{\circ}\text{C}$;

t_0^{T} – температура палива, яке надходить в піч, $^{\circ}\text{C}$

t_i^{T} – температура палива на межі i - ї зони, $^{\circ}\text{C}$;

T – температура, $^{\circ}\text{C}$ або K ; Вище скрізь замінити «кількість» на потік теплоти

$\{T\}$ – вектор невідомих вузлових температур, °C;

$T_{отх}$ – температура газів, що відходять, °C;

T_{oc} – температура навколишнього середовища, °C;

T^m_i – температура матеріалу на виході з i - ї зони, °C;

u^i – компоненти вектора переміщень, м;

u – переміщення, м;

$\{U\}$ – вектор невідомих вузлових переміщень, м;

U – внутрішня енергія одиниці об'єму матеріалу, Дж;

WG – вологість матеріалу, який виходить з ланцюгової зони, %;

WL – вологість сировини, %;

x, y, z – декартові координати, м;

X_1, X_2, X_3 – криволінійна неортогональна система координат, м;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·K); коефіцієнт теплового розширення, K⁻¹;

β – коефіцієнт випромінюваної/поглинаючої здатності променевої енергії;

δ – товщина шару, м;

ε – степінь чорноти поверхні;

ε_{ij} – коваріантні компоненти тензора деформацій;

η – динамічна в'язкість, Па·с;

θ – значення температури, °C; відносна температура

$[\Lambda]$ – матриця теплопровідності, Вт/(м·K);

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

μ – коефіцієнт Пуассона; коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с;

ν – швидкість, м/с;

ρ – густина суцільної фази; середовища, кг/м³;

$\sigma_{m\varphi}$ – межа міцності матеріалу, Па;

σ – напруження, Па;

σ^{ij} – контраваріантні компоненти тензора напружень, Па;

τ – час, с; напруження зсуву, Па;

φ_{ki} – кутовий коефіцієнт випромінювання для суміжних зон;

Φ – дисипація енергії, 1/с²;

ω – кутова швидкість, рад/с;

\sqrt{g} – коефіцієнт об'єму;

Основні скорочення:

ККД – коефіцієнт корисної дії;

НДС – напружено-деформований стан;

МСЕ – метод скінчених елементів;

МСР – метод скінчених різниць;

МСЕ – методу скінчених елементів;

КПІ ім. Ігоря Сікорського – Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

ТОФ – тепловий опір футерівки;

ХПСМ – хімічного, полімерного і силікатного машинобудування;

ВСТУП

Актуальність проблеми. Сучасний науково-технічний прогрес немислимий без розробки й впровадження раціональних ресурсозберігаючих технологій.

Промисловість будматеріалів є значним споживачем палива. Причому більша частина його спалюється в обертових печах, які залишаються ще малодоскональними теплотехнологічними агрегатами. Підвищення їхньої теплової ефективності вимагає розробки більш повних теоретичних моделей процесу теплообміну в печі. Побудова комп'ютерної системи дозволить систематично аналізувати на комп'ютері поведінку теплового агрегату в різних режимах роботи і раціонально підбирати робочі параметри обертової печі. Питання про стан обертових печей і перспективи їхнього розвитку є на сьогоднішній день важливою науковою і виробничою задачею. Однак її не можна ефективно вирішувати, не торкнувшись питання щодо стану футерівки й методів спрямованих на її вдосконалення.

Для вирішення цих питань ставиться задача визначення температурних умов, при яких працює вогнетрив у високотемпературній зоні обертової печі.

Як відзначалося, у сучасних обертових печах втрати теплоти через корпус у навколишнє середовище досить значні. Одним з основних факторів, що визначають теплову ефективність обертових печей, є термічний опір теплопровідності футерування. Відсутність довговічних вогнетривких матеріалів з високими ізоляційними властивостями призвела до необхідності створення футеровок з підвищеною термостійкістю за рахунок зміни форми вогнетривкого матеріалу і введення додаткової волокнистої ізоляції.

Ефективність додаткової теплоізоляції досягається при установці фасонних вогнетривів у високотемпературних зонах печі, чим забезпечується найбільша передача теплоти оброблюваному матеріалу. При роботі печі вогнетрив зношується, і товщина футерівки зменшується, наприклад, від 230 до 80 мм. Це змінює градієнт температур і відповідно термомеханічних навантажень в ній.

Таким чином, застосування зазначеної вище конструкції дозволяє разом зі зменшенням теплових втрат у навколишнє середовище зменшити і масу футерівки.

Одним найбільш перспективних напрямків підвищення ефективності роботи печі є зменшення тепловтрат через корпус печі в навколишнє середовище. Однак при цьому залишаються невирішеними питання, пов'язані зі створенням науково обґрунтованої методики розрахунку термомеханічних напружень у вогнетривах. Аналіз наявних напружень дозволить прогнозувати загальний стан теплового агрегату в процесі роботи, а в окремому випадку дає можливість розробити ефективну й надійну в роботі конструкцію футерівки обертової печі.

Тому робота з удосконалювання методів розрахунку печей, дослідженню діючих у футерівці термомеханічних напруження і створення футерівки з підвищеним термічним опором, що підвищує теплову ефективність печі, є досить актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Основні положення дисертаційної роботи виконані в рамках науково-технічних тематик Міністерства освіти і науки України:

НДР ІХФ–1–2016-2020 «Моделювання та удосконалення конструкційних матеріалів, технологічних процесів і хімічного обладнання». Номер держреєстрації 0115U005592.

НДР ІХФ–9–2022-2027 «Підвищення енерго- і ресурсозберігаючих показників в технології та обладнанні об'єктів хімічного, полімерного та силікатного машинобудування». Номер держреєстрації 0122U201697.

Мета і завдання досліджень.

Метою роботи є розроблення теоретичних основ для дослідження процесу теплообміну в фасонних вогнетривах футерівки обертової печі, визначення впливу особливостей геометрії комірок з теплоізоляцією на процес теплообміну і створення науково обґрунтованих методів розрахунку та розробка на цій основі високоефективних конструкцій вогнетривів з підвищеним тепловим опором.

Мета роботи включає:

- розроблення методів досліджень і розрахунку впливу термоопору футерівки високотемпературної зони на тепловий режим обертової печі;
- розроблення надійної в експлуатації конструкції футерівки, що дозволяє зменшити тепловтрати печі в навколишнє середовище;
- розроблення методу розрахунку термомеханічних напружень у вогнетривах при роботі печі в експлуатаційних режимах;

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні завдання.

1. Проаналізувати сучасні шляхи і методи економії палива й збільшення продуктивності обертових печей промисловості будівельних матеріалів, обґрунтувати необхідність проведення теоретичних і експериментальних досліджень;

2. Розробити математичну модель для дослідження впливу термічного опору футерівки на продуктивність печі та температуру газів, що відходять. Обґрунтувати можливість заміни в футерівці базових вогнетривів на вогнетриви з підвищеним тепловим опором;

3. Обґрунтувати і розробити математичну модель для дослідження теплового режиму в робочому просторі печі з врахуванням впливу переміщення матеріалу від обертання печі. Вирішити задачу та визначити вплив циклічності обертання печі на тепловий режим вогнетривів;

4. Обґрунтувати і розробити математичну модель для дослідження температурних полів в фасонному вогнетриві з коміркою для теплоізоляційного матеріалу. Вирішити задачу та визначити раціональну конструкцію комірки та типу теплоізоляційного матеріалу;

5. Вибрати та застосувати математичну модель для дослідження напружено – деформованого стану футерівки з фасонним вогнетривом. Визначити критерій для оцінки міцності вогнетриву, обґрунтувати можливість використання пропонованої конструкції вогнетриву;

Об'єкт дослідження – теплові процеси в футерівці обертової печі, що базуються на даних, одержаних за допомогою математичного моделювання.

Предмет дослідження – обертова піч, вогнетрива футерівка обертової печі, комірка з теплоізоляційним матеріалом.

Методи дослідження. В роботі використані методи фізичного і математичного моделювання теплообміну в робочому просторі обертової печі та з навколишнім середовищем. Теоретичні дослідження базувалися на використанні класичних положень теорії теплообміну та термосилових навантажень з використанням теорії міцності для крихких тіл.. Для обробки експериментальних результатів досліджень застосовані основні методи математичної статистики. Порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень проводилось за допомогою методів розрахунку похибок відхилень показів.

Наукова новизна

Полягає у створенні наукових методик розробки і вдосконалення обертових печей, що забезпечує підвищення продуктивності та зменшення теплових затрат, можливість вибору раціональних параметрів та режимів їх роботи, а саме:

1. Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці та використанні комплексу новаторських рішень для дослідження і вдосконалення обладнання теплових агрегатів шляхом підвищення теплової ефективності футерівки обертових печей для виробництва будматеріалів;

2. Встановлено закономірності впливу додаткової теплоізоляції на виникнення теплових пульсацій які інтенсифікують теплові та масообмінні процеси, в печі, що є новим ефектом, який базується на даних про температурну динаміку футерівки і виявлений за допомогою числового моделювання;

3. Встановлено, що підвищений термічний опір футерівки дає можливість збільшити передачу тепла матеріалу до 8% за рахунок безпосереднього контакту та радіаційного теплообміну. Отримані результатами свідчать про можливість покращення ефективності процесу обробки матеріалу за рахунок застосування більш раціональних технологічних та технічних параметрів;

4. Встановлено, що при використанні додаткової теплоізоляції в футерівці збільшення продуктивності є більш дієвим методом енергозбереження ніж заощадженням палива. Вказані дані можуть бути використані для оптимізації роботи теплових агрегатів;

Розроблено методику, алгоритми та програмне забезпечення для числового моделювання теплового режиму футерівки печі з визначенням еволюції температур і теплового потоку у вогнетривах, що дає можливість досліджувати стан футерівки з адаптацією до різних умов експлуатації.

Дістали подальший розвиток:

– сформульовано й вирішене завдання по визначенню напружено-деформованого стану для стандартного та фасонного вогнетриву з врахуванням термосилових навантажень.

Практична цінність і реалізація результатів роботи:

– доповнена та реалізована математична модель для комплексного дослідження теплової ефективності високотемпературних теплотехнологічних обертових агрегатів, яка дозволяє враховувати вплив додаткової теплоізоляції на тепловий процес та продуктивність теплотехнологічного агрегату. Це є новим підходом до моделювання таких складних систем, який може бути застосований до інших типів обертових теплотехнологічних агрегатів; А це наукова новизна

– на основі аналізу даних про температурну динаміку футерівки досліджена ефективність регенераційного теплообміну з врахуванням впливу технологічних і технічних параметрів на тепловий режим футерівки та обертової печі в цілому. Отримані дані про механізми теплообміну в вогнетривах можливо використовувати для підвищення стійкості футерівки та підвищення якості продукції;

– для підвищення теплової ефективності футерівки визначені оптимальні конструктивні параметри теплоізоляційних комірок вогнетриву з урахуванням теплової ефективності та міцності;

–розроблено експериментальний стенд, на якому проведено дослідження теплообміну в фрагменті футерівки з додатковою теплоізоляцією, що підтверджує результати числового моделювання;

результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедр хімічного, полімерного і силікатного машинобудування і машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв КПІ імені Ігоря Сікорського. Зробити акт впровадження в навч. проц.

Особистий внесок здобувача

Полягає в самостійному проведенні аналізу стану питання, участі в розробці методик і проведенні досліджень, математичному моделюванні теплових процесів, виконання та аналіз розрахунків на міцність, проведення експериментальних досліджень та обробці даних.

Апробація роботи.

Основні наукові положення й результати роботи доповідалися на 4 міжнародних конференціях, в тому числі 2 зарубіжних.

Публікації. Матеріали роботи висвітлені у 10 наукових працях, у тому числі 1 стаття, що входять до наукометрична база Scopus, Q3 та 8 статті у наукових фахових, категорії Б, 1 фахова, технічні науки та 1 у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до ОЕСР та/або Європейського Союзу.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури (123 найменувань), додатків з методами розрахунку, епюрами напруження, актом випробувань.

Робота викладена на 169 сторінках основного тексту, містить 84 рисунка й 2 таблиць.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУТЕРІВКИ ОБЕРТОВИХ ПЕЧЕЙ

1.1 Роль і місце обпалювальних печей в промисловості будівельних матеріалів

У сучасному визначенні піч – це ізольований від навколишнього простору робочий канал агрегату, у якому відбувається процес одержання теплоти й передача його матеріалу, що піддається тепловій обробці [1].

Багато галузей промисловості, включаючи будівельну, хімічну, харчову, нафтохімічну, металургійну та гірничодобувну, переробляють дрібнодисперсні сипучі матеріали. Ці матеріали мають ряд специфічних властивостей, таких як злежуваність, низька газопроникність і запиленість, які ускладнюють протікання хімічних реакцій і процесів тепло- і масообміну. При виборі обладнання, необхідного для їх переробки, аналіз функціональних, економічних, екологічних, ергономічних та інших критеріїв часто віддає перевагу машинам барабанного типу, таким як ротаційні печі. Найбільш широке застосування обпалювальні печі отримали в промисловості будівельних матеріалів як основне обладнання для виробництва цементного клінкеру, керамзиту, вапна і перліту.

Для виробництва клінкеру може використовуватися теплогенеруюче обладнання різних конструкцій і принципів дії [2,3,4,5]. Однак близько 95%

світового виробництва клінкеру виробляється переважно в обертових печах, 3,5% - в шахтних печах і 1,5% - в інших типах теплового обладнання, таких як агломераційні решітки і реактори для випалу клінкеру в плаваючому або киплячому шарі. Залежно від особливостей підготовки сировинної суміші в термічному агрегаті можна виділити чотири способи виробництва: мокрий, сухий, напівсухий і комбінований [6,7,8,9].

При мокрому способі сировина, що складається з карбонатів, глинистих компонентів і коригувальних добавок, подрібнюється в млині з додаванням води. В результаті виходить сипуча, в'язка маса з вмістом води 30-50%, тобто

сировинний шлам. Вода діє як ефективна поверхнево-активна речовина під час подрібнення, значно зменшуючи споживання енергії та полегшуючи транспортування сировини по продуктопроводу. При сухому способі сировина попередньо висушується, подрібнюється, змішується і кондиціонується, потім подрібнюється до вологості 3-8% і подається в піч. Випалювання відбувається в довгій обертової печі при мокрому способі і в короткій печі з теплообмінником для запікання при сухому способі. Напівсухий спосіб відрізняється від сухого тим, що сировинна суміш перед випалюванням гранулюється до вологості 10-14%. У комбінованому методі осад з вологістю 16-18% зневоднюється, брикетується і гранулюється.

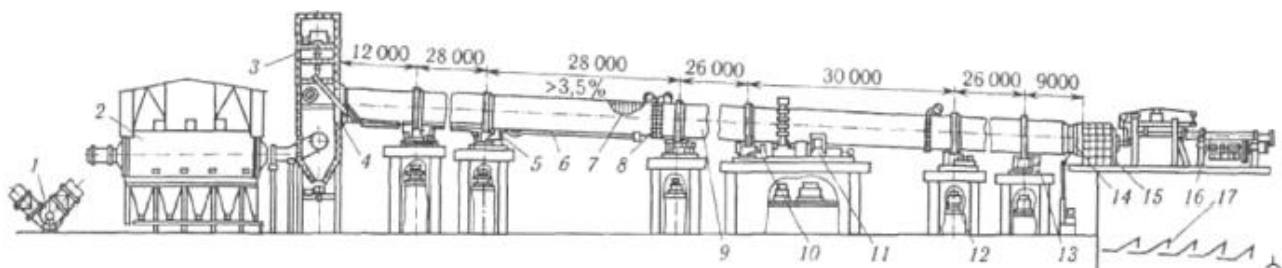
Кожен метод має свої переваги та недоліки. Мокрий і сухий способи в даний час є основними методами, що використовуються в цементній промисловості в усьому світі. Основними факторами, що визначають вибір, є фізико-хімічні властивості сировини, наявність і вартість палива та водних ресурсів [11,12]. Також враховується, що водне середовище полегшує подрібнення сировинних матеріалів і що при їх спільному помелі швидко досягається висока однорідність суміші, в той час як витрати палива на прожарювання сировинної суміші при мокрому способі в 1,5-2 рази вище, ніж при сухому способі. Розмір обертової печі також значно збільшується при випалюванні мокрої сировинної суміші, але це теплове обладнання діє в основному як випарник води, що призводить до меншого питомого об'єму клінкеру на об'єм печі.

На ранніх стадіях випалу спостерігаються відмінності у фізичному перетворенні вологої та сухої підготовленої сировини. У наступних прожарюваннях після повного висихання шлаку фізичні та хімічні перетворення сировини є подібними. У сухих печах сировина нагрівається і процес підготовки відбувається в циклонному теплообміннику, тоді як подальше прожарювання, екзотермічна реакція і спікання сировинної суміші відбуваються в обертових печах.

У багатьох країнах мокрий спосіб виробництва цементу є переважаючим. У Російській Федерації - близько 85%, в Україні - 80%, в Китаї (КНР) - 65%, в США - 61%. Деякі країни мають вищу частку виробництва цементу сухим способом, наприклад, Японія, Іспанія та Німеччина - 100%, Італія - 97%, Польща - 83%, Бельгія - 75%, Канада - 73% та Великобританія - 68% [11,13,14,15,16].

1.1.1.Печі для мокрого способу випалу

Трубчасті обпалювальні печі - це технічні агрегати у вигляді порожнистих циліндрів, які можна безпечно експлуатувати [2,5,7,8,]. Усередині робочий простір захищений від абразивного зносу і впливу навколишнього середовища футеровкою з вогнетривких матеріалів. Оброблюваний матеріал рухається вздовж печі назустріч газовому потоку завдяки нахилу і обертанню печі. Матеріал нагрівається за рахунок тепла, що виділяється при згорянні палива, і піддається фізичним і хімічним перетворенням.



1 - позапічний димосос; 2 - електрофільтр; 3 - пилової камери; 4 – завантажувальна камера; 5 - гідроупор; 6 - живильник печі; 7 - ланцюговий захват; 8 - теплообмінний пристрій; 9 - корпус; 10 - бандаж; 11 - привод; 12 - змащувальна станція; 13 - роликів опора; 14 - паливна форсунка і ущільнення; 15 - розвантажувальний кінець; 16, 17 - охолодник клінкеру.

Рисунок 1.1 - Обертюва піч для мокрого способу виробництва клінкеру

Піч приводиться в дію електродвигуном, який через редуктор і відкриту передачу передає крутний момент на кільцеву шестерню і корпус. Обертання і нахил корпусу печі призводить до того, що шихта переміщується від холодного

(верхнього) кінця до гарячого (нижнього). Продукти згоряння палива (топкові газы) рухаються до шлаку, який нагріває шихту і внутрішню частину печі. Для поліпшення теплопередачі від газів до матеріалу в печі встановлюють різні теплообмінні пристрої [11,17]. До них зазвичай відносять комірчасті теплообмінники, перекидні лопатки, полиці, ланцюгові завіси та інші пристрої. Для захисту корпусу від абразивних матеріалів і зменшення втрат тепла в навколишнє середовище металевий корпус футерують різними видами вогнетривкої цегли. Футеровка також виконує функцію рекуператора тепла, передаючи частину тепла від газу до матеріалу.

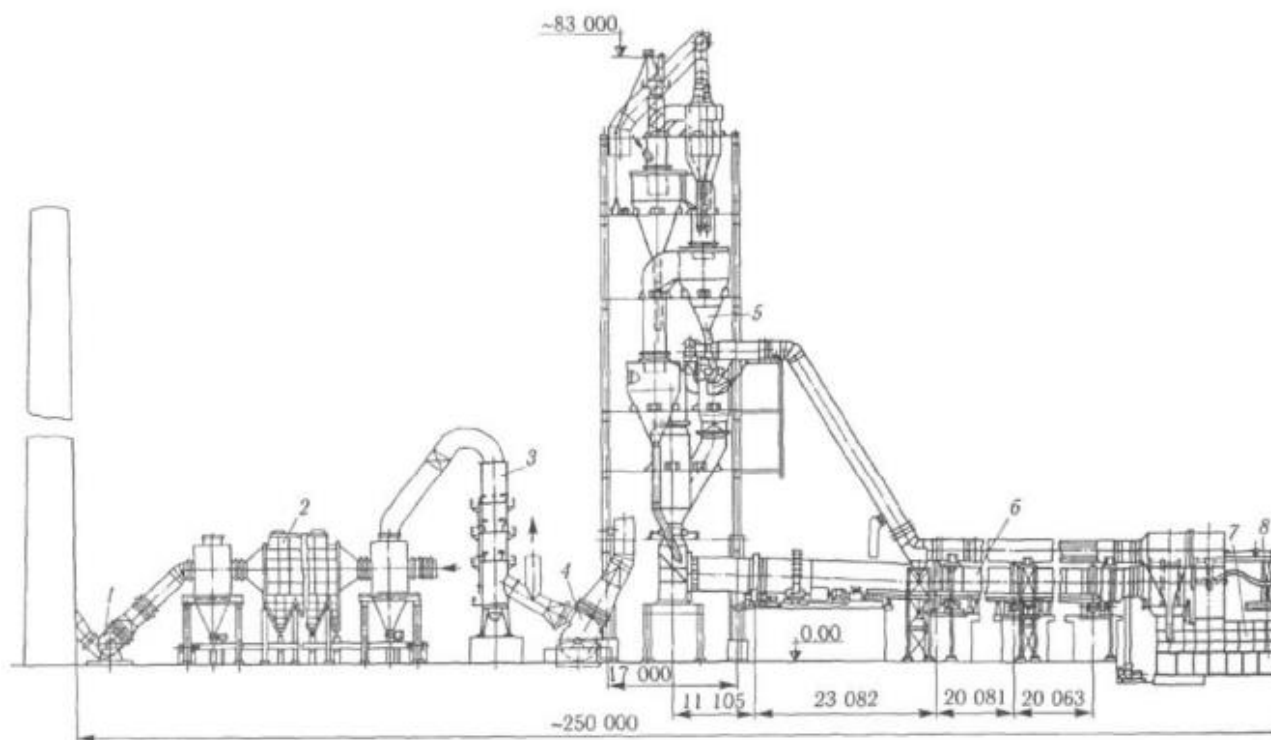
Відпрацьоване повітря відводиться димососом. Видалення пилу з відпрацьованих газів забезпечується фільтром. Випалений продукт, клінкер, вивантажується з голівки печі в шахту охолодження, де його теплова енергія використовується для нагрівання повітря, що надходить в піч, і як вторинне повітря для спалювання палива. Обертові печі мокрого способу випалу - це потужні теплові пристрої діаметром 3,6-7 м і довжиною 118-230 м.

Паливо, що використовується в печі, може бути твердим, рідким або газоподібним. Горіння відбувається безпосередньо в робочому просторі, а газы, що утворюються, рухаються до оброблюваного матеріалу. Тверде паливо є дрібнодисперсним і включає в себе.

1.1.2. Печі для «сухого» способу випалу

У сухих печах випаровування вільної води відбувається в теплообміннику, якій знаходиться запічному просторі, після чого матеріал надгодить в піч для випалу. Як результат, сухі печі набагато коротші, ніж мокрі, і потребують значно менше теплоти для випалу сировини. Як наслідок, печі мають менші розміри - від 2х60 до 7х95 м [6,11,18,19,20]. Спочатку ці печі не використовували внутрішні теплообмінники, а температура відхідних газів становила від 700 до 750 °С. Пізніше почали використовувати теплообмінники різних конструкцій, що

дозволило знизити температуру димових газів до 380-400 °С і висушити сировину, яка надходила в піч, до оптимальних значень. Схема сушильної установки з обертовою піччю показана на рисунку 1.2.



- 1 - кінцевий димосос; 2 - електрофільтр; 3 - зволожувальна установка;
4 - позапічний димосос; 5 - циклон; 6 - корпус печі; 7 - колосники охолодника;
8 - конвеєр.

Рисунок 1.2 - Загальний вигляд обертової печі 4,5×80м

Циклонні теплообмінники печі призначені для попередньої термічної обробки і часткової декарбонізації сировини шляхом інтенсивного теплообміну з гарячим газовим потоком, що виходить з печі і блоку декарбонізації. Гарячі гази рухаються через всю систему, включаючи теплообмінник і димохід, завдяки вакууму, що створюється в димоході. Подрібнена сировинна суміш подається у верхню частину димоходу теплообмінника і рухається назустріч газовому потоку через циклон і блок декарбонізації і потрапляє в обертову піч. У газовому потоці на вході сировини встановлені перегородки для рівномірного розподілу сировини

вздовж газового потоку і забезпечення хорошого теплообміну між газом і сировиною.

Блок прожарювання [18,20] технічно і конструктивно пов'язаний з теплообмінником запікання і складається з прожарювача і камери змішування, розташованої між циклонним теплообмінником другого ступеня і теплообмінником першого ступеня. Агрегат спроектований таким чином, щоб забезпечити високий рівень прожарювання сировини перед її подачею в піч. Спеціальна конструкція блоку декарбонізації дозволяє знизити вміст оксидів азоту в пічних газах, тим самим зменшуючи шкідливі викиди в атмосферу. Використання установок декарбонізації значно знижує теплове навантаження, дозволяє використовувати низькосортне паливо (навіть відходи), а також зменшує викиди шкідливих газів (оксидів азоту) завдяки більш низьким температурам горіння. Тепле повітря (третинне повітря) подається з 13 холодильних установок до блоку декарбонізації, і в ньому відбувається спалювання. Кінці тангенціально розташованих пружин жорстко прикріплені до корпусу печі та зубчастого кільця. Робочий режим забезпечується двигуном постійного струму.

1.2.Проблеми пічних агрегатів

Однак у теперішній час коефіцієнт використання палива в обертових печах ще дуже низький. Навіть цементні обертові печі, робота яких налагоджена краще, ніж печі для випалу вапна [21]. (теплообмінні апарати, пиловловлювачі, завантажувальні пристрої і т.д.) є недосконалими тепловими установками. Тепловий ККД обертових печей, в яких випалюється основна маса цементного клінкера, не перевищує 55 % [22]. Тому для визначення оптимальних режимних параметрів процесу випалу й раціональних розмірів багатьма дослідниками запропоновані різні методи моделювання теплової роботи обертових печей.

Для визначення теплової потужності й розмірів печі А.Н.Іванов [23] використовував емпіричні формули, отримані в результаті обробки статистичних

даних. Однак отримані залежності згідно [24] при розрахунках сучасних потужних печей не дають точних результатів.

Теоретичні й експериментальні дослідження теплообміну в обертових цементних печах дозволили Е.І.Ходорову створити розрахунковий метод, користуючись якими на основі теорії теплообміну можна визначати довжину технологічних зон і необхідний час перебування матеріалу в зонах спікання й охолодження клінкера [2]. Зокрема, автором були обчислені значення коефіцієнтів тепловіддачі до матеріалу в різних технологічних зонах печі.

Методи розрахунків А.С.Воробйова і Д.Я.Мазурова [2,25], Автори використовують методи аналітичного моделювання, що базуються як на теорії теплопередачі, так і на спрощених емпіричних формулах. Метод включає два напрямки розрахунків: аналітичні та спрощені розрахунки, які можна застосувати у повсякденній виробничій практиці. За А.І.Богановим [22] витрата палива в обертовій печі визначається з урахуванням втрат теплоти через кладку печі в навколишнє середовище. Крім того, на відміну від попередніх дослідників, при складанні теплового балансу автор аналітично розраховує втрати в навколишнє середовище через футерівку при проектуванні печі в окремих секціях, що дозволяє врахувати вплив таких важливих параметрів, як ступінь зносу вогнетривів на теплову роботу печі.

Для дослідження обертових печей, які використовуються у виробництві в'язких промислових будівельних матеріалів користуються методами теплового розрахунку Д.Я.Мазурова [25]. Дослідження теплообміну в цих печах дозволило на заснованих даних про розподіл температури газового потоку й виконуваних при цьому фізико-хімічних перетворень робочий простір цементної й вапняновипальної [21] обертових печей розділити на три зони: реакційну високотемпературну, підготовчу низькотемпературну й рекуперативну післявипальну. Автором [25] представлена методика теплового розрахунку обертових печей з по-зонним визначенням довжини. Втрати теплоти в навколишнє середовище визначаються по зонах за формулою, яка враховує

числові коефіцієнти, що характеризують швидкість обертання печі, рух повітряного середовища, що оточує корпус печі, і кут падіння повітряного потоку в корпус печі. Особливо для печей, встановлених на відкритому повітрі, точність теплових розрахунків може бути значно підвищена за рахунок врахування цих параметрів.

Проведено значну кількість досліджень з використанням математичних моделей теплової роботи печей, що обертаються, але їх велика кількість і суттєві відмінності по відношенню до аналогічних печей вказують на цих досліджень неповноту. Закриті системи рівнянь часто складаються зі спрощень та узагальнень найважливіших фізичних та хімічних процесів, особливо тепло- та масообміну, іноді спотворюючи фізику процесу [18]. Недолік інформації пояснюється значною складністю механізмів теплообміну в умовах численних технологічних процесів під час роботи пічних агрегатів, які мало вивчені. Аналіз теплової роботи конкретної технічної системи в основному ґрунтується на вивченні емпіричних даних та оцінці теплового балансу печі [26,27]. Такий підхід має незначну практичну цінність,

При числових дослідженнях футеровки печей, що обертаються, в літературі розглянуто ряд моделей теплопередачі [28–35]. Автори застосовують різні методи та використовують математичні моделі, що описують теплообмін між стінкою печі, газовим потоком, шаром сипучого матеріалу та навколишнім середовищем:

- В роботах [28,29] була розроблена аналітична одновимірна модель для прогнозування впливу різних параметрів у печі на регенеративний теплообмін між стінками і футеровкою печі, що обертається. Модель заснована на введенні шару з постійною теплоємністю та нескінченною теплопровідністю в радіальному напрямку. Товщина цього шару визначається проникненням тепла у нескінченне тіло;

- В роботах [30,31] для визначення температури всередині футерування за допомогою програми FLUENT використовується кожна сітка. Температурне поле, отримане під час вирішення завдання, симетрично між областями нагріву та

охолодження футеровки, тобто, при вході та виході з контакту з матеріалом. Це не відповідає значенням із фізичних експериментів;

- У роботі [32] розроблена математична модель використовується для прогнозування руху матеріалу в циліндрі, що обертається. Розрахунки засновані на балансі маси та імпульсу за відомих початкових умов, заданих фізично, і масова витрата та швидкість на поверхні матеріалу можуть бути передбачені як функція швидкості обертання, діаметра циліндра та ступеня заповнення;

- У роботах [33,34,35] була запропонована математична модель, що враховує температурні профілі сипучого матеріалу, газу та вогнетривких матеріалів оберткових печей. Модель рекомендована для використання при розрахунку ротаційних теплових агрегатів із зовнішнім обігрівом з метою оптимізації умов виробничого процесу з точки зору споживання енергії та теоретичного визначення умов покращення якості продукції. Однак ця модель не враховує нестационарність процесу, що моделюється за швидкістю обертання, і не визначає час нагріву футерування при виході на квазістационарний режим, тобто, режим регенеративного теплообміну.

Експериментальні дослідження процесу теплообміну між футеруванням печі та сипучим матеріалом можна знайти в роботах [27,36]. Проте експериментальний підхід не вирішує таких проблем тепло обміну футерівки з додатковою теплоізоляцією при її зношені.

Більш точна математична модель теплообміну між футеровкою, газом і матеріалами в цементних оберткових печах представлена в [37–39]. Тут модель зводиться до системи інтегральних рівнянь і її розв'язання є трудомістким, оскільки при дослідженні теплообміну враховується велика кількість незалежних змінних.

Однак теплотехнічні розрахунки базуються на створенні матеріального і теплового балансу печі, газодинамічних розрахунках, визначенні розмірів печі і технологічних зон. Тепловий баланс печі складається на основі заданих теплотехнічних параметрів печі і результатів розрахунку матеріального балансу,

який визначає витрату палива і продуктивність печі, необхідну для випалу. При цьому такий важливий фактор, як температура газів, що виходять з печі, вводиться в розрахунок як постійний параметр, що вимагає експериментального визначення. При розрахунку теплового балансу печі цей фактор впливає на питоме споживання теплоти, а отже, і на відповідну витрату палива.

Аналітичне визначення температури димових газів на основі теорії теплопередачі в робочому просторі обертової печі є важливим питанням, оскільки економічні вигоди в значній мірі залежать від обґрунтованої витрати палива, розрахованої на основі теплового балансу. Позитивне рішення цього питання поряд з уточненням розрахунку теплових режимів печі дає можливість більш детально досліджувати вплив різних процесів на підвищення її ефективності. Це викликане необхідністю вдосконалення роботи печі й вимогами до збільшення точності теплових розрахунків.

1.3.Методи підвищення ефективності роботи теплових агрегатів

Ефективність роботи обертових печей у промисловості будівельних матеріалів значною мірою залежить від розумного споживання палива [39]. При цьому величина використання палива визначається головним чином повнотою його спалювання й величиною теплової енергії, не використаної у робочому просторі печі, яка характеризується тепломісткістю або температурою газів, що відходять, і тепловими втратами через футерівку печі в навколишнє середовище.

Є кілька шляхів, спрямованих на підвищення ефективності використання обертових печей:

- Покращена повнота згоряння палива завдяки більш ефективним режимам і вибору найкращого положення пальника та напрямку факела. [40];
- зменшення тепловтрат з газами, що відходять, за рахунок поліпшення теплообміну між пічними газами й матеріалом, що обробляється, за допомогою установки різного роду теплообмінників [2,22,21,41];

– зменшення втрат тепла через корпус печі [42 – 44] за рахунок збільшення термічного опору футерівки (ТОФ).

З них найбільш ефективними, на наш погляд, є заходи щодо збільшення ТОФ, тому що в цементних печах втрати теплоти в навколишнє середовище через корпус досягають 20 %, а в вапняновипальних – 25 % від потоку теплоти, що виділяється при спалюванні палива [21]. У зв'язку із цим підвищення термічного опору футерівки є значним резервом зниження витрати палива на випал клінкера.

Відомо, що максимум тепловтрат корпуса припадає на високотемпературну зону обертової печі [45]. Тут тепловтрати для вапняновипальної печі досягають 50 %, а для цементних до 35 % від загальних втрат через корпус. При цьому температура його зовнішньої поверхні становить 300 °С і в міру зношування футерівки підвищується до 400 °С, а в деяких випадках досягає 550 °С. При цьому при закритій установці печі близько 60 % теплоти втрачається в навколишнє середовище випромінюванням і приблизно 40 % конвекцією. Якщо ж піч встановлена на відкритому повітрі, то вплив конвективного теплообміну, навіть при незначному русі повітря, суттєво збільшується. У випадку дощу або снігу теплові втрати через корпус збільшуються на порядок.

Відомо, що навіть незначні тепловтрати в реакційній зоні впливають на загальні витрати теплоти по обертовій печі [46]. Втрата у високотемпературній зоні 1 кДж енергії викликає втрату 4 кДж по всій печі. Ця залежність підтвердилася В.В.Класеном [47] на Семипалатинському цементному заводі і має важливе практичне значення, яка вказує на ефективний шлях економії палива за рахунок збільшення ТОФ печі у високотемпературній зоні.

Тому установку додаткової теплоізоляції слід здійснювати у футерівці високотемпературної зони, як найбільш раціональної для підвищення ефективності роботи обертової печі.

Можливість застосування додаткової теплоізоляції у футерівці зони спікання цементної печі ретельно досліджена в [21], де показано, що збільшення

ТОФ припустиме для цементної печі й дозволяє суттєво підвищити ефективність її використання.

Умови роботи футерівки в вапняновипальної і цементної печах різні. Так температура футерівки в зоні випалу вапняновипальної печі приблизно на 150 °С нижче ніж у цементній й становить 1300 °С. Однак відсутність на вогнетриві захисної обмазки сприяє збільшенню тепловтрат у цій зоні й створює більш тяжкі умови служби вогнетривів. Внаслідок цього при зношуванні вогнетриву марки периклазохромітова цегла (ПХЦ) до висоти 0,1 м температура корпусу печі збільшується до 400 °С, що є сигналом для його заміни й зупинки печі на ремонт. Тому збільшення ТОФ у зоні випалу вапняновипальної обертової печі є ефективним засобом не тільки для зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище, але й для збільшення терміну служби вогнетриву та печі в цілому.

Питання про підвищення ТОФ у реакційній зоні обертової печі може бути вирішено двома способами:

1. Застосуванням легковагових вогнетривів.
2. Розробкою таких конструкцій футерівки, які дозволили б застосовувати для їхньої теплоізоляції високоефективні теплоізоляційні матеріали.

Щодо першого з них відмітимо, що, як відзначено в [48], легковагові вогнетриви масового виробництва, що виготовляються в нашій країні, не відповідають реальним умовам служби в обертовій печі. Застосовувані способи поризації не забезпечують необхідної міцності виробів. Крім того, аналіз можливих і перспективних шляхів розвитку в області вогнетривів показує, що найбільш прийнятними для футерівки реакційних зон обертових печей є периклазохромітові вогнетриви [49]. Тому раціонально вести такі роботи з конструювання у високотемпературних зонах футерівок з додатковим теплоопором, де б у якості вогнетриву застосовувалася міцна периклазохромітова цегла.

У теперішній час для зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище є ряд технічних рішень, які передбачають збільшення ТОФ печі. В [21] запропонована кладка периклазохромітового вогнетриву впереміш із

хромомангнетитовим. З метою збереження стійкості футерівки проти абразивного стирання й збільшення ТОФ пропонується легковагові вироби розміщувати по колу печі між щільними вогнетривами. При цьому співвідношення щільних і легковагових цеглин повинне дорівнювати (3–4) : 1. Однак, як показує практика, у цьому випадку зношування футерівки відбувається швидше, а зростання ефективності незначно.

Становлять інтерес конструкції, що передбачають установку у футерівці додаткового теплоізоляційного шару.

Згідно з відомими рекомендаціями [49] пропонується укладання вогнетривів на теплоізоляційному шарі із шамотної лещадки, теплопровідність якої менше ніж у вогнетриву. Цей метод має недоліки: зменшення об'єму робочої зони печі, збільшення ваги футерівки, крім того, двошарова футерівка має меншу конструктивну міцність.

Відповідно до патенту США [50] у футерівку у вигляді колій або сегментів укладаються пресовані азбестові волокна, на яких установлюються вогнетривкі вироби. До недоліків такого способу слід віднести те, що покладений у такий спосіб теплоізоляційний матеріал, мав низьку міцність, піддається значному навантаженню, особливо в періоди зупинки й пуску печі. Так, при укладанні вогнетривів на спресовані з базальтового волокна мати на Здолбунівському ЦШК їх повне стирання відбулося при пуску печі.

Більш перспективними, на наш погляд, є методи збільшення тепловий опір футерівки (ТОФ) за допомогою зміни конфігурація вогнетриву. Такий підхід дозволяє, поряд зі збереженням наявних розмірів робочого простору печі, зменшити вагу футерівки й заощадити сировинний вогнетривкий матеріал.

Згідно з патентом [51] для зменшення тепловтрат у навколишнє середовище пропонується змінити форму вогнетривкої цегли, лише 1/3 поверхні якої упирається в корпус печі, а простір між іншими 2/3 поверхні цегли й кожухом печі утворюють повітряну ізоляцію, яка значно зменшує потік теплоти від вогнетриву до кожуха печі. З останнім твердженням не можна погодитися

повністю. На початку кампанії печі, коли на поверхні "холодної" сторони вогнетриву температура відносно невелика, повітряний прошарок дійсно є ефективною теплоізоляцією. Але в міру зношування вогнетриву й підвищення температури його "холодної" сторони до 400-500 °С у теплопередачі зростає роль радіаційної складової.

Пропонуються методи введення додаткової теплоізоляції у футерівку обертової печі шляхом утворення у вогнетриві комірок для укладання в них розчину з теплоізоляційним матеріалом [52]. Цей метод не припускає зменшення опорної поверхні цегли, однак теплоізоляція, отримана при його реалізації, буде менш ефективна, ніж при застосуванні волокнистого теплоізоляційного матеріалу, що має меншу теплопровідність. Крім того, при однакових температурах нагрівання двох зразків з різними коефіцієнтами теплового розширення в місці їх сполучення будуть виникати значні термомеханічні напруження, які здатні викликати руйнування матеріалу.

У промисловості перераховані вище методи не знайшли широкого застосування. Це пов'язане з наявністю наявних недоліків, які або знижують тривалість експлуатації в складних умовах роботи обертової печі або дають незначний економічний ефект, або є конструктивно ненадійними в роботі.

Отже, необхідна спеціальна конструкція футерівки, яка задовольняла б вимогам, які висуваються до неї при роботі печі. При створенні такої футерівки необхідно використовувати надійний у тепловому відношенні теплоізоляційний матеріал. Відсутність довговічних жаростійких матеріалів з відмінними теплоізоляційними властивостями багато в чому визначила напрямок робіт зі створення ефективної футерівки печі з додаванням волокнистого утеплювача. При цьому відомо, що застосування в печах виробництва портландцементного клінкера як теплоізоляції із базальтового волокна, з температурою використання до 850 °С, не дає позитивних результатів. Ця температура є недостатньою, що дозволило зробити висновок про необхідність його заміни на більш термостійкий матеріал. У зв'язку з освоєнням промисловістю серійного випуску

мулітокремнеземистого теплоізоляційного матеріалу з температурою використання до 1600 °С з'явилася реальна можливість для розробки конструкції футерівки з підвищеним тепловимопором.

Специфіка служби футерівок в обертових печах висуває особливі вимоги й до властивостей вогнетривів. Тому прагнення до зниження тепловтрат шляхом збільшення теплового опору футерівки повинне сполучатися зі збереженням її надійності, термостійкості та зносостійкості.

Конструкція футерівки, що задовольняє цим вимогам, є вогнетрив зі зміненою конфігурацією й укладанням з утворенням виїмок із високоефективного теплоізоляційного матеріалу [53](для реакційної зони застосовується мулітокремнеземисте волокно). Теплоізоляційний матеріал укладається з боку зменшеної поверхні вогнетриву, що спирається на корпус печі. Наявні розрахункові й дослідні дані експлуатаційної надійності зазначеної конструкції футерівки показують, що найбільш ефективною в експлуатації є конструкція, у якій вогнетрив спирається на корпус незначною частиною своєї тичковою поверхнею. Це дозволяє значно зменшити теплові втрати обертової печі в навколишнє середовище, знизити масу футерівки, заощадити імпортований сировинний матеріал, який використовується для виробництва вогнетривів. Однак, при виборі конфігурації вогнетриву для промислового застосування необхідно враховувати крім перерахованих вище факторів і технологічність його промислового виготовлення.

Від вибору форми вогнетриву залежить ефективність його використання й надійність запропонованої конструкції. Так, при збільшенні комірки з теплоізоляцією збільшується тепловий опір футерівки й зменшуються теплові втрати в навколишнє середовище. Однак його конструктивна міцність при цьому, через збільшення в опорній «ніжці» термомеханічних напруг, зменшується. Тому для оптимального вибору надійної в роботі конструкції вогнетриву необхідно досліджувати напружено-деформований стан (НДС), який виникне у фасонній

цеглі під час роботи печі, і визначити той вплив, який виявляє на НДС зміну форми вогнетриву та площі його контакту з металевим корпусом обертової печі.

1.4 Постановка задачі і програма досліджень

В даний час темпи зростання стійкості футерування обертових печей в промисловості сповільнюються [42]. Однією з причин цього є те, що запас традиційних методів підвищення стійкості вогнетривів вичерпано, а недостатня вивченість питання напруженого стану вогнетривів суттєво обмежує заходи, спрямовані на підвищення ефективності використання вогнетривів.

Відомо, що під час експлуатації печі футерування зазнає значного впливу абразивної дії матеріалу [54], яка посилюється високими температурами та великими термомеханічними напруженнями, що їх генерують. Останні складаються з термічних напружень, викликаних зміною градієнта температури вогнетривкового тіла, і механічних навантажень, викликаних питомою вагою футеровки і технологічного матеріалу. Їх одночасна дія створює в цеглі складний напружено-деформований стан, величина якого разом з робочою температурою визначає надійність, швидкість зносу і термін служби вогнетриву.

У випадку укладання у футерівку фасонного вогнетриву, напруження, що виникають у ньому, зростають. Комірки з теплоізоляцією, створюючи додатковий тепловий опір, збільшують температурний градієнт і отже термопружність. При цьому на опірній стороні вогнетриву, площа якої зменшилась, концентруються механічні напруження. Через це в розроблювальній конструкції футерівки необхідно погоджувати величину теплоізоляційного гнізда з величиною діючих у вогнетриві напруг, які не повинні перевищувати межі міцності матеріалу.

Крім того, під час роботи обертової печі футеровка виконує основну робочу функцію теплового обладнання, і знання напруженого стану футеровки веде до знання загального стану роботи печі. Проактивне вирішення цього питання також сприяє підвищенню експлуатаційної надійності, зменшенню кількості поломок і

ремонтів, забезпеченню планової зупинки печі на ремонт і поліпшенню автоматичного контролю робочих параметрів [55].

Знання значень складових термомеханічних напружень, що виникають в футерівці і вогнетриві, дозволяє своєчасно виявляти дефекти, прогнозувати загальний стан печі і визначати ступінь підвищення індивідуальних напружень вогнетриву в найбільш відповідальних зонах [56]. Аналізуючи дані про стан вогнетриву й порівнюючи їх із допустимими, можна визначити можливості подальшого їхнього використання, а при узгодженні цього питання з величиною допустимого нагрівання корпусу можна знайти й граничний стан їх зношування.

На сьогоднішній день питання напруженого стану вогнетриву в кільці футерування залишається невирішеним через складність задачі, яку необхідно вирішити. Кількість досліджень, присвячених визначенню впливу футерування на піч, незначно, а робіт, у яких би вивчалися механічні напруження у вогнетриві, з урахуванням дії матеріалу, що завантажується в піч, немає взагалі. Такому важливому питанню як визначення температурних напруг у вогнетриві також приділялося недостатньо уваги [57], хоча перші роботи в цій області з'явилися на початку 40-х років минулого століття. У роботі Г.О. Гросса [58] досліджено вплив футерівки з твердою ізоляцією на несучий корпус печі. Напруження, що виникають у цій конструкції, які викликані різними коефіцієнтами теплового розширення футерівки, впливають на ізоляцію та корпус. В результаті шари ізоляції, футерування і корпусу печі розглядаються як вкладені кільця з постійними фізико-механічними властивостями і постійною температурою по всьому кільцю.

У роботі В.С. Коршунова [59] досліджується допустима швидкість нагрівання вогнетривких виробів. При цьому цілісність вогнетривкого виробу описується співвідношенням, яке дорівнює різниці між розміром виробу при різних температурах і максимально допустимим лінійним переміщенням. З цього порівняння цілісність вогнетриву визначається величиною температурного градієнта в напрямку товщини, тобто, в кінцевому підсумку, температурним

напруженням. Цей метод використовується для визначення допустимого температурного градієнта для певних типів вогнетривів. Розвиток руйнівних термомеханічних напружень, що викликають розшарування вогнетривів, розглянуто в роботі В.І. Шубіна [60], де критичний стан вогнетриву визначався за допустимим градієнтом температури.

Слід зазначити, що методи [58,59] дають занадто спрощені оцінки напружено-деформованого стану вогнетриву. Більш точне рішення отримане у [60]. Тут методом теорії пружності виконуються розрахунки температурних напружень тіла вогнетриву. У цьому випадку коефіцієнт теплового розширення, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона футерівки вважаються незалежними від температури, а стискаючі напруження в футерівці розглядаються від нуля до межі міцності на розрив. Однак розрахунки були проведені для шахтної печі, а результати перенесені на обертову піч. В результаті розрахунків значення термічних напружень для футерівки виявилися значно вищими за допустимі.

Пояснюється виникненням на зовнішній поверхні футерівки тріщинуватої зони, де вони релаксують. На наш погляд, значні може, колові напруження на розрив і стиснення виходять через те, що при розрахунках не враховане, що футерівка є багатозв'язаним тілом, яке містить окремі складові вогнетривів.

Для більш точного визначення температури і напружено-деформованого стану вогнетриву необхідно розглядати не футерувальне кільце в цілому, а ізолюваний від нього вогнетрив. Таке рішення отримано в роботі [61]. Там вогнетривке футерування розглядається при плазмовому напиленні на його поверхню порошку корунду, а футеровка розглядається як пластина, припускаючи існування в ній одновимірного температурного поля. У розрахунках механічні властивості вогнетриву вважалися відомими і залежними від температури. Розв'язок термопружної задачі, отриманий за допомогою мабуть, числових розрахунків, дозволяє ідентифікувати небезпечні зони у вогнетриві. Однак отримані в результаті розрахунків значення термопружності досягають значень, що в багато разів перевищують межу міцності вогнетриву на розрив.

Іншим недоліком цього методу є те, що при постановці задачі теплопровідності не враховується температурна залежність теплопровідності вогнетривів. Це має велике значення при визначенні температурних напружень розглянутої термопружної задачі. Тому пропонується наступний метод розрахунку не представляється можливим використовувати для визначення напружено-деформованого стану у вогнетривах, покладених у футерівку обертової печі. Для рішення поставленої задачі необхідно розробити метод визначення температурних напружень у вогнетриві.

Механічні напруження у вогнетривах, що виникають у результаті дії масових сил футерівки й матеріалу, які обертаються, ще мало досліджені. Пояснюється це декількома причинами, однак однієї з головних є те, що рішення асиметричної задачі, до якої зводиться визначення напружень у вогнетривах, приводить до значних математичних труднощів.

В роботах [62, 63] досліджуються деформації оболонки та напруження в ній в обертових печах. Проведені авторами теоретичні дослідження дозволили вирішити задачу про напруження, що виникають в кожусі печі. При цьому були визначені навантаження, що виникають на межі між кожухом і футеровкою. Недоліком цього методу є те, що, згідно з розглянутими граничними умовами, футерування сильно притискається до корпусу печі. В реальності [64–72] спостерігається прогин футерівки у верхній частині секції печі. Ця модифікація викликає значну зміну величини і характеру напружень.

Більш точні рішення для визначення напружень на зовнішній поверхні кільця футерування були отримані в роботах [64,65]. У цих роботах автори визначили зону звисання футерівки з корпусу печі і розраховували напруження, що виникають на межі розділу футерівки і корпусу печі.

Однак методи розрахунків [62–65] не дають можливості визначити напруження, що виникають по тілу вогнетриву, тому що в цих роботах досліджується корпус печі, представлений як тонкостінна просторова конструкція. Крім того, у розрахунках не враховується дія, яка надається футерівці матеріалом,

який обробляється і захисною обмазкою, що утворюється в цементних обертових печах. Тому запропоновані рішення не можна застосовувати для дослідження механічних напружень, що виникають у футерівці обертової печі.

Таким чином, напружено-деформований стан вогнетриву при роботі його у футерівці обертової печі майже не вивчено, а у літературі відсутня науково-обґрунтована методика його визначення.

Отже, обертові печі, які застосовуються у промисловості будівельних матеріалів, є високопродуктивними в порівнянні із шахтними, але мало ефективними у тепловому відношенні агрегатами. Шляхом підвищення їх ефективності є збільшення теплового опору футерівки, засноване на науково-обґрунтованому методі розрахунків температурного та НДС вогнетривів. На підставі огляду літератури можна сформулювати наступні задачі:

1. Дослідити вплив підвищеного теплового опору футерівки (ТОФ) високотемпературної зони на ефективність роботи теплового агрегату в цілому;

2. Дослідити вплив ТОФ на теплообмін у високотемпературній зоні обертової печі;

3. Визначити НДС у стандартному й фасонному вогнетривах з урахуванням дії гравітаційних сил і термосилових навантажень;

4. Визначити оптимальну конструкцію вогнетриву з комірною теплоізоляцією при комплексному врахуванні теплової ефективності та міцності вогнетриву;

5. Провести експериментальні дослідження теплообміну з фрагментом футерівки з додатковою теплоізоляцією для порівняння з результатами розрахунку.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ОБЕРТОВИХ ПЕЧАХ

Обертіві печі широко використовуються в хімічній, металургійній, фармацевтичній, промисловості будівельних матеріалів та ряді інших галузей. Зазвичай вони застосовуються для виконання трьох технологічних процесів: нагрівання, протікання реакції та сушіння твердого матеріалу, причому в багатьох випадках відбувається комбінація цих процесів. Широке використання обертівих печей пов'язане з такими факторами, як здатність працювати з різноманітною сировиною, до якої відносяться сипкий матеріал, суспензії або гранульовані матеріали, котрі мають великі відмінності в розмірі частинок.

Повільне обертання печі, що встановлена з ухилом, забезпечує ретельне перемішування матеріалу при його транспортуванні вздовж печі, а оперативне регулювання часу перебування дозволяє створювати оптимальні умови для термічної обробки [19,66,67]. При проектуванні та моделюванні обертівих печей слід враховувати два важливі фактори з точки зору технологічного процесу – теплообмін та швидкість протікання хімічних реакцій. Теплообмін є найважливішим з цих факторів, оскільки у багатьох практичних випадках він є основним показником продуктивності обертівих печей. Таким чином моделюючи роботу печі [2,8] потрібно визначити:

1. Тепловий та матеріальний баланс пічної установки в цілому.
2. Потік теплоти, що передається матеріалу в енергетичних зонах, який визначається як різниця потоку енергії на початку та в кінці зони.
3. Температуру газового потоку на границях зон, котра визначається з теплового балансу.
4. По заданій температурі матеріалу на границях визначаються теплові баланси окремих зон та ступінь фізично-хімічних перетворення матеріалу враховуючи присадку і виділення пилу.
5. З теплового балансу холодильника знаходять температуру повітря, що надходить в піч.

Особливості, що характеризують теплопередачу, визначаються наступними параметрами теплообміну:

1. Між газовим потоком та поверхнею матеріалу.
2. Між газовим потоком та стінкою футерівки, яка обертається і залежить від швидкості обертання печі.
3. Між стінкою футерівки та шаром насипного матеріалу.
4. Між відкритим корпусом печі та зовнішнім середовищем.

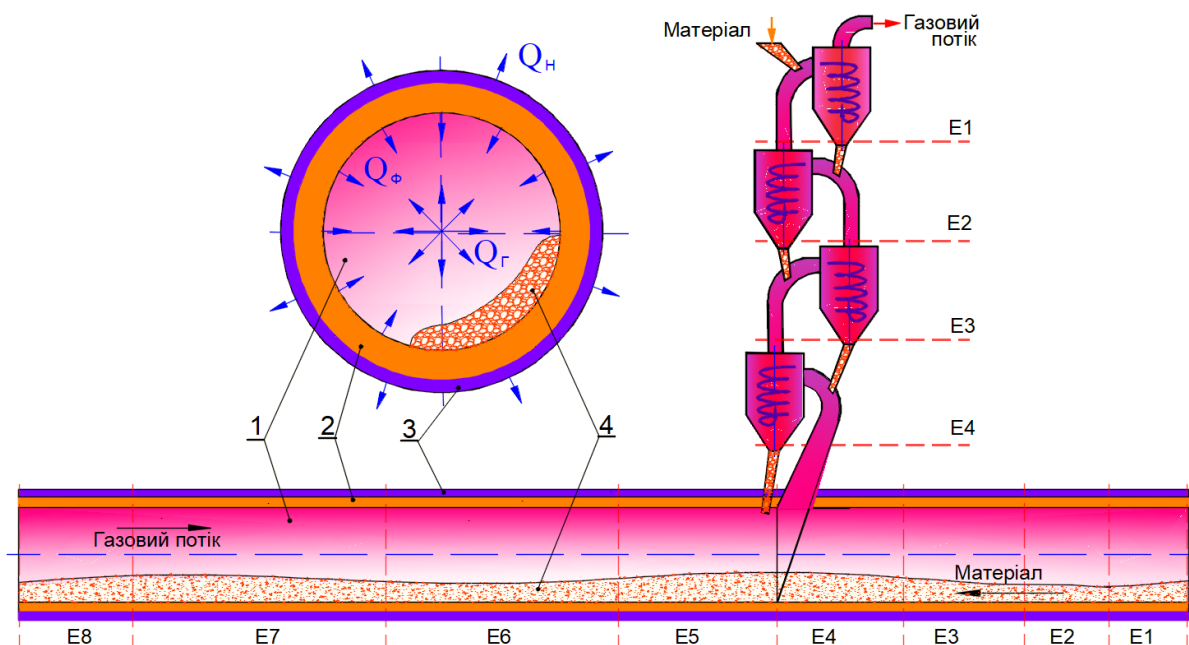
Також важливо враховувати час перебування твердих частинок у печі, що є важливим конструктивним фактором і визначається вибором діаметру, довжини, швидкості обертання, нахилом та внутрішньою конструкцією печі.

2.1. Моделювання теплових процесів в обертівій печі з футерівкою підвищеного термоопору

Через високу продуктивність, потужність, розміри та високі температури важко безпосередньо вивчати технічні та теплові процеси реальної печі для випалу. Тому особливого значення набувають модельні та чисельно-експериментальні дослідження. Одним із ефективних методів дослідження та вдосконалення є математичне моделювання технологічних процесів. З розвитком обчислювальної техніки з'явилася можливість застосовування складних, та більш точних математичних моделей, які забезпечують отримання шляхом використання обчислювального експерименту великого обсягу інформації про об'єкти дослідження на стадіях його проектування. Обчислювальний експеримент з використанням математичного опису об'єктів дає значний економічний ефект, замінюючи натурні дослідження на реальних об'єктах. Таким чином, ефективним шляхом вирішення проблеми вдосконалення технологій з метою пошуку оптимальних конструктивних рішень, технологічних режимів та забезпечення стабільної роботи технологічного обладнання на цих режимах є розробка та застосування математичних моделей.

Для визначення ефективності роботи теплового агрегату з обертівією піччю

в футеровці якої встановлені вогнетривки з додатковою теплоізоляцією скористаємося методикою зонального розрахунку, запропонованою Е.І. Ходоровим [2,8,19,68,69]. В тепловому агрегаті розглядається 8 енергетичних зон. Потрібно зазначити, що в тепловому агрегаті відсутня чітка межа між енергетичними зонами, так як важко точно встановити температуру газу, матеріалу та внутрішньої поверхні футерівки на окремих ділянках. Реагує лише частина матеріалу, тому багато реакцій відбуваються послідовно або накладаються одна на одну. Тому на окремих ділянках попередній і наступний процеси можуть протікати одночасно. Для вирішення задачі будемо розглядати обертову піч як сукупність фрагментів, що визначені окремими енергетичними зонами (див. рис. 2.1.). Температура матеріалу на межах фрагментів задається емпірично, виходячи з умов нагрівання. При цьому фрагменти можуть складатись з декількох елементів. Деякі фрагменти, які мають невеликі розмірами та однотипний процес фізично-хімічних перетворень, можуть складатись з одного елементу.



1 – газовий потік; 2 – футерівка; 3 – металевий корпус; 4 – матеріал;
 E1 – підігріву; E2 – випаровування; E3 – сушіння; E4 – дегідратації; E5 – декарбонізації;
 E6 – екзотермічних реакцій; E7 – спікання; E8 – охолодження.

Рисунок 2.1 – Енергетичні зони

Потрібно зазначити, що обертові печі в яких застосовують «сухий» спосіб з

запічним теплообмінником мають безпосередньо у пічному агрегаті восьму, сьому, шосту та п'яту енергетичні зони. При цьому четверта, третя, друга та перша виносяться з печі в теплообмінники, зберігаючи послідовність відповідних фізично-хімічних перетворень, які відповідають умовам отримання клінкеру та мають таку ж температуру матеріалу на границях.

2.1.1 Тепловий баланс пічної установки

Температура вогнетрива оцінюється за значеннями температури газового потоку, стінок печі та матеріалу. Температура газового потоку визначається шляхом розрахунку теплообміну між зонами печі, або з балансового рівняння або на основі різниці температур всередині матеріалу, що забезпечує проходження всіх ендотермічних і екзотермічних процесів при утворенні клінкеру.

Балансові рівняння теплових потоків для i -ї енергетичної зони мають такий вигляд:

загальний потік теплоти, що надходить від газового потоку, Вт

$$Q_z = Q_{z-\phi}^K + Q_{z-\phi}^L + Q_{z-m}^L + Q_{z-m}^K, \quad (2.1)$$

загальний потік теплоти, що надходить до футерівки, Вт

$$Q_\phi = Q_{z-\phi}^K + Q_{z-\phi}^L - Q_{\phi-m}^L - Q_{\phi-m}^m + Q_{c-\phi}^L + Q_{c-\phi}^{L'}, \quad (2.2)$$

загальний потік теплоти, що отримує матеріал, Вт

$$Q_m = Q_{z-m}^K + Q_{z-m}^L + Q_{\phi-m}^L + Q_{\phi-m}^m + Q_{c-m}^L + Q_{c-m}^{L'}, \quad (2.3)$$

кількість тепла, передана матеріалу через футерівку:

$$Q_{\phi M}^L + Q_{\phi M}^\tau = k(T_\phi^H - T_\phi^B), \quad (2.4)$$

де Q_Γ – загальна кількість тепла, що виділяється газовим потоком, Вт;

$Q_{\Gamma\phi}^L, Q_{\Gamma\phi}^K$ – потік теплоти, що віддається газовим потоком випромінюванням та конвекцією відкритій поверхні футерівки, Вт;

$Q_{\Gamma M}^L, Q_{\Gamma M}^K$ – потік теплоти, що віддається газовим потоком випромінюванням та конвекцією відкритій поверхні матеріалу, Вт;

$Q_{\phi M}^L$ – потік теплоти, що віддається випромінюванням відкритою поверхнею футерівки відкритій поверхні матеріалу, Вт;

$Q_{\varphi M}^{\tau}$ – потік теплоти, що віддається закритій матеріалом поверхні футерівки закритою поверхнею матеріалу, Вт;

Q_H – потік теплоти, що віддає поверхня печі навколишньому середовищу, Вт;

Q_M – загальний потік теплоти, який отримує матеріал, Вт;

$Q_{c-\phi}^{\prime L}, Q_{c-\phi}^{\prime \prime L}$ – потік теплоти, що отримує футерівка з суміжних зон, Вт;

$Q_{c-M}^{\prime L}, Q_{c-M}^{\prime \prime L}$ – потік теплоти, що отримує матеріал з суміжних зон, Вт.

Складові рівнянь (2.1) – (2.4) визначаються наступним чином [68]:

$$Q_{c-\phi}^L = 5,67 \varepsilon_{\phi} \left[\varepsilon'_z \left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \varepsilon_z'' \left(\frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 \right] \cdot \psi_{\partial.\phi}, \quad (2.5)$$

$$Q_{c-\phi}^K = \alpha_K (t_z - t_{\phi}) \cdot \psi_{\partial.\phi}, \quad (2.6)$$

$$Q_{c-M}^L = 5,67 \varepsilon_M \left[\varepsilon_z'' \left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \varepsilon_z''' \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right] \cdot \psi_{x.M}, \quad (2.7)$$

$$Q_{c-M}^K = \alpha_K (t_z - t_M) \cdot \psi_{x.M} \quad (2.8)$$

$$Q_{\phi-M}^L = 5,67 \varepsilon_{\phi} \varepsilon_M \left[(1 - \varepsilon_z'') \left(\frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - (1 - \varepsilon_z''') \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right] \cdot \psi_{x.M}, \quad (2.9)$$

$$Q_{\phi-M}^m = \sqrt{60 n \lambda_{\phi} C_{\phi} \gamma_{\phi}} \cdot I \cdot (t_z - t_M) \cdot \psi_{\partial.M}, \quad (2.10)$$

$$Q_{\varphi M}^T = \lambda_M (T_{\varphi} - T_M) L_{DM} L_3,$$

$$\text{де } \psi_{\partial.M} = h_S \cdot l_{\partial.M}; \quad \psi_{x.M} = h_S \cdot l_{x.M}; \quad \psi_{\partial.\phi} = h_S \cdot l_{\partial.\phi};$$

φ_{ki} – кутові коефіцієнти випромінювання для суміжних зон;

h_S – крок дискретизації, м;

$l_{\partial.M}$ – довжина дуги матеріалу, м; $l_{\partial.\phi}$ – довжина дуги футерівки, м;

$l_{x.M}$ – довжина хорди матеріалу, м;

T_z – температура газу по довжині печі, К;

T_M – температура матеріалу по довжині печі, К;

T_{ϕ} – температура футерівки по довжині печі, К.

Ступінь чорноти визначаються за наступними залежностями:

– газового потоку при середній температурі газу

$$\varepsilon'_z = (1 - \varepsilon_T)(\varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O} - \Delta \varepsilon) + \varepsilon_T; \quad (2.11)$$

– CO₂ і H₂O при середній температурі футерівки

$$\varepsilon_{CO_2} = \varepsilon'_{CO_2} \left(T_z / T_\phi \right)^{0,65}; \quad \varepsilon_{H_2O} = \beta * \varepsilon'_{H_2O}; \quad (2.12)$$

– газового потоку при середній температурі футерівки:

$$\varepsilon''_z = (\varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}) + \varepsilon_T - (\varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}) * \varepsilon_T; \quad (2.13)$$

– CO₂ і H₂O при середній температурі матеріалу:

$$\varepsilon_{CO_2} = \varepsilon'_{CO_2} \left(T_z / T_m \right)^{0,65}, \quad \varepsilon_{H_2O} = \beta * \varepsilon'_{H_2O}; \quad (2.14)$$

– газового потоку при середній температурі матеріалу:

$$\varepsilon'''_z = (\varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}) + \varepsilon_T - (\varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}) * \varepsilon_T. \quad (2.15)$$

Головним джерелом енергії в схемі теплообміну обертової печі є енергія від спалювання палива. У внутрішньому просторі печі теплова енергія передається відкритим поверхням матеріалу та футерівки.

Надходження потоку теплоти, Вт:

$$Q_Q = Q_{низ}^p \cdot a. \quad (2.16)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

$Q_{низ}^p$ – нижча теплота згоряння робочого палива, кДж/кг.

Витрата потоку теплоти:

1. Теоретична теплота клінкероутворення, Вт, визначається з залежності:

$$Q_1 = Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} + Q_{15} \quad (2.17)$$

де $Q_{11} = G_{H_2O}^M \cdot 6855$ – витрата тепла на дегідратацію каолініта сировини (6855

– тепловий ефект дегідратації каолініта в кДж/кг гідратної води);

$Q_{12} = G_{CaCO_3}^M \cdot 1776 + G_{MgCO_3}^M \cdot 1396$ – витрата тепла на декарбонізацію CaCO₃ і MgCO₃ (1776 – тепловий ефект декарбонізації CaCO₃, 1396 – тепловий ефект декарбонізації MgCO₃);

$Q_{13} = 209$ – витрата тепла на утворення рідкої фази;

$Q_{14} = -(C_3S \cdot 527 + C_2S \cdot 714 + C_3A \cdot 61 + C_4AF \cdot 109) \cdot 10^{-2}$ – прихід тепла в результаті утворення клінкерних мінералів (527 – тепловий ефект утворення $3CaO \cdot SiO_2$ кДж/кг C_3S , 715 – тепловий ефект утворення $2CaO \cdot SiO_2$ кДж/кг C_2S , 61 – тепловий ефект утворення $3CaO \cdot Al_2O_3$ кДж/кг C_3A , 109 – тепловий ефект утворення $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ кДж/кг C_4AF);

$Q_{15} = -105$ – прихід тепла в результаті застигання рідкої фази.

2. Витрата тепла потоку теплоти на випаровування води із сировини, Вт

$$Q_2 = G_{\omega}^M \cdot 2487 \quad (2.18)$$

де G_{ω}^c – практична витрата сухої сировини, кг/кг;

(2487 – прихована теплота утворення водяної пари при 0 °C);

3. Втрати потоку теплоти з газами, що відходять, Вт

$$Q_3 = [(V_{CO_2}^T + V_{CO_2}^M) \cdot C_{CO_2} + V_{N_2}^T \cdot C_{N_2} + V_{O_2}^T \cdot C_{O_2} + (V_{H_2O}^T + V_{H_2O}^M) \cdot C_{H_2O}] \cdot t_{омх}^r \quad (2.19)$$

де $t_{отх}^r$ – температура газів, що відходять з печі, °C;

4. Втрати потоку теплоти з клінкером, Вт

$$Q_4 = C_{кл} \cdot t_{кл} \quad (2.20)$$

де $C_{кл}$ – теплоємність клінкеру при температурі $t_{кл}$. Вт

5. Втрати потоку теплоти з повітрям, що викидається з холодильника, Вт

$$Q_5 = V_{\Pi}^{u3} \cdot C_{\Pi} \cdot t_{\Pi}^{u3} \quad (2.21)$$

6. Витрата тепла Втрати потоку теплоти з винесенням, Вт

$$Q_6 = G_{nl}^{бес} \cdot C_{nl} \cdot t_{омх}^r + (G_M^C - G_{nl}^{бес}) \cdot C_{nl} \cdot (t_{омх}^r - t_{nl}) \quad (2.22)$$

де $t_{пл}$ - температура пилу, що відходить ($\approx 40^\circ\text{C}$); $G_{nl}^{бес} = 0,0074$ - втрата сировини;

$C_{пл}$ – теплоємність уносу.

7. Втрати потоку теплоти в навколишнє середовище, Вт

$$Q_7 = QQ - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6) \quad (2.23)$$

Маючи дані про хімічний склад, вологість сировини й одержуваного продукту, знаючи продуктивність печі, знос футеровки, враховуючи хімічний

склад газоподібного палива, що спалюється і коефіцієнт надлишку повітря, можна встановити, застосовуючи вищеописані методи розрахунку, тепловий режим роботи обертової печі.

Матеріальний баланс пічного агрегату, кількість продуктів горіння і їхній склад визначається за відомими методиками, приведеними в [2,8,68], тому не приводиться в даній роботі.

2.1.2 Визначення витрат палива, температури газів, що відходять, і втрат теплоти в навколишнє середовище

В даний час для дослідницьких і проектних робіт з обертових цементних печей широко застосовується метод зонального розрахунку, запропонований Е.І.Ходоровим [2,18], який був розглянутий у попередньому розділі. Цей метод дозволяє визначити ряд характерних параметрів роботи печі: розміри, питомі витрати тепла, сировини та ін. Недоліком методу є те, що такий важливий фактор як температура димових газів, що відходять із печі, вводиться в розрахунок як незмінний параметр, що вимагає його експериментального визначення. При визначенні теплового балансу пічної установки цей фактор виявляє істотний вплив на питому витрату тепла, а це у свою чергу і на визначальну витрату палива.

Тому, приступаючи до оцінки ефективності використання звичайної обертової печі, і печі з підвищеним тепловим опором футеровки, вводимо в метод зонального розрахунку деякі доповнення, що дозволяють визначити температуру газів, що відходять, і втрати тепла через корпус.

Виходячи з зонального методу розрахунку ентальпія газового потоку на виході з печі описується виразом:

$$Q_3 = q_o^2 + \frac{Q_{\text{низ}}^p \cdot R_s}{\Pi_p} - \sum_{i=1}^I (G_i^M - P_i^M) \quad (2.24)$$

$$\text{де } q_o^2 = q_{\text{кл}}^n - q_{\text{кл}}^x - q_{\text{в}}^{u3} - q_{\text{ном}}^x + q_T^{\phi} + q_{\text{в}}$$

$$X = \frac{\sum_{i=2}^N (G_i^M + P_i)}{Q_{\text{низ}}^p \cdot a} \quad a = \frac{R_s}{\Pi_p}$$

де a – питомі витрати тепла на обпалювання матеріалу;

R_s – витрата палива, $\text{нм}^3/\text{год}$; функція сітчного числа Рейнольдса.

Значення Q_3 залежить від витрат палива. При цьому температура димових газів, що відходять із печі, ($T_{\text{отх}}^r$) визначається методом підбору зі співвідношення:

$$Q_3 = [(V_{CO_2}^r + V_{CO_2}^M) \cdot C_{CO_2}(T) + (V_{H_2O}^r + V_{H_2O}^M) \cdot C_{H_2O}(T) + V_{N_2}^r \cdot C_{N_2}(T) + V_{O_2}^r \cdot C_{O_2}(T)] \cdot T_{\text{отх}}^r \quad (2.25)$$

Виходячи з теплового балансу на одиницю маси отриманого продукту, втрати теплоти в навколишнє середовище через корпус печі складуть:

$$Q_7 = Q - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6) = f(T_{\text{отх}}^r) \quad (2.26)$$

З іншого боку питомі втрати теплоти в навколишнє середовище можна представити виразом

$$Q_7 = \frac{Q_{\text{ос}}}{P_\rho} \quad (2.27)$$

де $Q_{\text{ос}}$ - тепловтрати в навколишнє середовище через корпус печі, Вт. Визначаючи Q_7 відносно зон, будемо мати:

$$Q_7 = \sum_{i=1}^I P_i = \frac{2\pi \cdot r}{P_\rho} \sum_{i=1}^I \frac{T_{K1i} - T_{K2i}}{R_i} \cdot L_i; \quad R_i = \frac{\delta_{1i}}{\lambda_{1i}} + \frac{\delta_{2i}}{\lambda_{2i}} \quad (2.28)$$

$$T_i^r = 0.5(T_i^{r1} + T_i^{r2}); \quad T_i^{r1} = T_{i-1}^{r2} \quad (2.29)$$

$$\begin{cases} T_{K1i} = T_{K2i} [1 + R_i (3.5 + 0.062 \cdot T_{K2i})] \\ T_{K2i} = \frac{K1(T_i^r - T_{K1i}) + C_B \left[\left(\frac{T_i^r + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{K1i} + 273}{100} \right)^4 \right]}{3.5 + 0.062 \cdot T_{K2i}} \end{cases} \quad (2.30)$$

$$K1 = \frac{0.418 \cdot \lambda_\Gamma}{D_n} \cdot \left(\frac{\omega_\Gamma \cdot D_n}{\nu_\Gamma} \right)^{0.67} \quad (2.31)$$

$$C_B = \frac{5.68 \cdot K_B \cdot \varepsilon_M}{1 - (1 - \varepsilon_M) \cdot (1 - F_n)}, \quad i = 1 \dots 8 \quad (2.32)$$

Рівняння (2.28) - (2.32) замикають побудовану систему (2.24) - (2.27) в якості невідомих входять витрати палива R_s , температура газів, що відходять, $T_{\text{отх}}^r$ і позонні втрати тепла в навколишнє середовище P_i .

Отримана система нелінійних рівнянь розв'язується методом ітерацій. Температура на "гарячій" (T_{K1i}) і на "холодній" (T_{K2i}) поверхні футеровки визначається з підсистеми нелінійних рівнянь (2.30) - (2.31) вирішуваних методом дотичних. При цьому температура на межах зони T_i^{T1} визначається за відомими співвідношеннями із зонального методу розрахунку [2].

Варто зауважити, що урахування значень теплового опору футеровки (ТОФ) в різноманітних зонах (R_i) дає можливість проводити розрахунки печі при різних ступенях зносу вогнетриву й в окремому випадку досліджувати той вплив, що виявляє на тепловий процес усередині печі збільшення ТОФ високотемпературної зони.

2.2 Теплообмін в корпусі печі

Високотемпературні термічні агрегати зазвичай футеровані вогнетривкою цеглою, щоб забезпечити стабільний технологічний процес, зменшити тепловтрати і захистити поверхню посудини від високих температур і механічних пошкоджень. Високотемпературні термічні агрегати барабанного типу широко використовуються в таких галузях, як металургія, будівництво та цементна промисловість. Водночас вони залишаються недосконалими тепловими установками з високим енергоспоживанням і особливо високими тепловими втратами від агрегату в навколишнє середовище [18,68]. Тому актуальною є задача розробки та впровадження футерівки виконаної вогнетривом з підвищеним тепловим опором, що досягається використанням фасонного вогнетриву з комірками заповненими теплоізоляційним матеріалом.

Проведення чисельно-експериментальних досліджень для моделювання технологічного режиму та визначення енергоефективності теплових агрегатів вимагає розробки аналітичного методу розрахунку вогнетривів різної конфігурації. Вказана методика дозволяє оперативно виконувати розрахунки, зокрема при ітераційних процесах для визначення раціональних та оптимальних параметрів. Так використання кінцево-елементних числових методів суттєво

збільшує термін розрахункових робіт та пред'являє підвищені вимоги до ресурсів комп'ютера.

2.2.1 Методика оперативного розрахунку термо опору у футерівці з фасонним вогнетривом

В описаних вище технічних рішеннях визнається, що встановлення жорсткої ізоляції може призвести до значних теплових напружень через різницю в коефіцієнтах лінійного розширення різних матеріалів. Ефективним вирішенням цієї проблеми є використання вогнетривів з комірками, заповненими волокнистими ізоляційними матеріалами, такими як мультикремнеземна вата або базальтові волокна. Опорні ніжки вогнетриву мають трапецієподібну форму, що зменшує температурний градієнт і, відповідно, термічні напруження у вогнетриві. Розрахункова схема вогнетриву приведена на рисунку. 2.2.

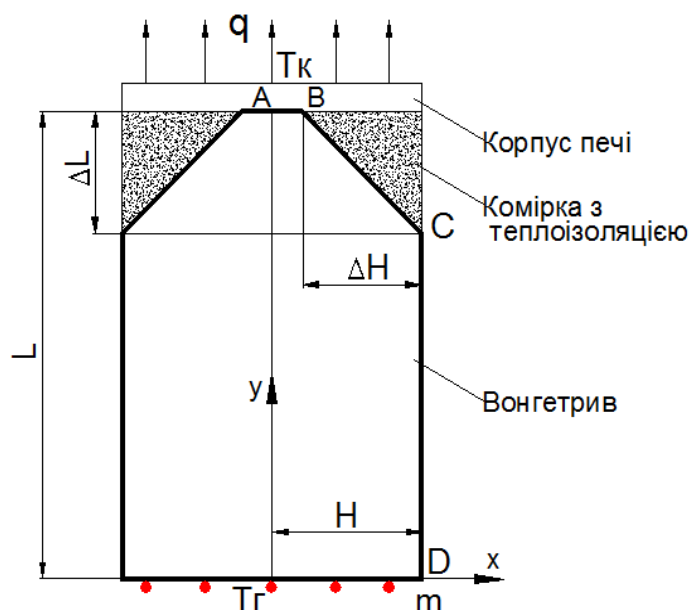


Рисунок 2.2 – Конструкція вогнетриву з комірками теплоізоляції

Для розрахунку теплового потоку через фасонний вогнетрив, комірки якого заповнені теплоізоляцією, прийняті наступні допущення:

- теплопровідність теплоізоляційного матеріалу вкрай мала відносно теплопровідності вогнетриву і тепловий потік через матеріал відсутній $\partial T / \partial n = 0$;
- термічний опір металевого корпусу печі суттєво менше опору вогнетриву і в розрахунку не враховується;
- перетин $y = \text{const}$ характеризується середньою температурою.

Останнє допущення, щодо строгої горизонтальності ізотерм, значно спрощує розрахунок, однак не дозволяє отримати детальну картину розподілу температури. В подальших викладках значення T відповідає усередненій температурі в перетині.

Визначення термічного опору вогнетриву. Вважається, що границя В,С,D (рис. 2.2) задана у вигляді безперервної функції $x = X(y)$. У вогнетриві створюється температурний напір $T_r - T_k$. При цьому в перетині $y=0$ встановлюється питомий тепловий потік:

$$q_o = \frac{T_r - T_k}{R} \quad (2.33)$$

де R – термічний опір вогнетриву, який підлягає визначенню, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Відповідно до прийнятих допущень через границю В,С,D потік тепла відсутній, так як С,D – площа симетрії, В,С – площа контакту з теплоізоляційним матеріалом (рис. 2.2). Тому питомий тепловий потік через довільний перетин $y = \text{const}$.

$$q = q_o \frac{m}{X(y)} \quad (2.34)$$

Відповідно до закону Фур'є $q = -\lambda_o dI/du$, та враховуючи (2.34) маємо:

$$\frac{dT}{dy} = -\frac{q_o}{\lambda_o} \frac{m}{X(y)} \quad (2.35)$$

Інтегруючи по висоті вогнетриву отримаємо:

$$T_k - T_r = -\frac{mq_o}{\lambda_o} \int_0^L \frac{dy}{X(y)}. \quad (2.36)$$

Зіставляючи останнє рівняння з (2.33), отримаємо термічний опір вогнетриву, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$:

$$R = \frac{m}{\lambda_o} \int_o^L \frac{dy}{X(y)}. \quad (2.37)$$

Таким чином тепловий потік, Вт, через футерівку становить:

$$q_o = \frac{T_r - T_{oc}}{\frac{m}{\lambda_o} \int_o^L \frac{dy}{X(y)} + \frac{1}{\alpha}}. \quad (2.38)$$

Інтегруючи рівняння (2.35), отримаємо поле температур по вогнетриву:

$$T = T_r - \frac{T_r - T_{oc}}{\int_o^L \frac{dy}{X(y)} + \frac{1}{\alpha}} \int_o^L \frac{dy}{X(y)} \quad (2.39)$$

де λ_o – теплопровідність;

α – коефіцієнт тепловіддачі від корпусу в оточуюче середовище, $\alpha = A + B \cdot T_k$.

Поверхня вогнетриву списується наступними рівняннями:

$$X(y) = \begin{cases} H & \text{для } y \in (0, L - \Delta L) \\ (H - \Delta H) + \beta(L - y) \frac{\Delta H}{\Delta L} & \text{для } y \in (L - \Delta L, L) \end{cases} \quad (2.40)$$

Підставляючи (2.40) у вирази (2.37) – (2.39), отримуємо формули для розрахунку теплового опору, температури та теплового потоку через вогнетрив:

$$R = \frac{H}{\lambda_o} \left[\frac{L - \Delta L}{H} - \frac{1}{\beta} \ln \left(1 - \frac{\Delta H}{H} \right) \right]; \quad \beta = \frac{\Delta H}{\Delta L}. \quad (2.41)$$

де L, H – висота та довжина вогнетриву;

λ_o – теплопровідність вогнетриву у відповідній зоні;

$\Delta L, \Delta H$ – розмір комірки з теплоізоляцією.

Температура поверхні вогнетриву T_k , що опирається на корпус, знаходиться за наступною залежністю:

$$q_o = \frac{T_r - T_k}{R} = \frac{T_r - T_{oc}}{R + 1/\alpha}, \quad (2.42)$$

звідки

$$T_k = \frac{\sqrt{R^2(A+B \cdot T_{oc})^2 + 2 \cdot R(A+2 \cdot B \cdot T_r - B \cdot T_{oc}) + 1 + B \cdot R \cdot T_{oc} - A \cdot R - 1}}{2 \cdot B \cdot R}. \quad (2.43)$$

де T_{oc} – температура оточуючого середовища.

Слід відзначити, що рівняння (2.42) суттєво спрощується при використанні значення $T_{oc}=0.0$ °C. В цьому випадку воно має вигляд:

$$T_k = \frac{\sqrt{A^2 \cdot R^2 + 2 \cdot R(A+2 \cdot B \cdot T_r) + 1 - A \cdot R - 1}}{2 \cdot B \cdot R}. \quad (2.44)$$

При використанні коефіцієнта тепловіддачі виду $\alpha = const$, тобто $\alpha = A$, отримаємо:

$$T_k = T_{oc} + \frac{T_r - T_{oc}}{1 + A \cdot R}. \quad (2.45)$$

Тепловий потік визначається за залежністю (2.41). Температурне поле у вогнетриві:

$$T = T_r - (T_r - T_{oc}) \frac{1}{\left[\left(1 - \frac{\Delta L}{L} \right) - \frac{1}{\beta} \frac{H}{L} \ln \left(1 - \frac{\Delta H}{H} \right) \right] + \frac{\lambda_o}{\alpha L} \frac{y}{L}} \quad \text{для } y \in (0, L - \Delta L); \quad (2.46)$$

$$T = T_r - (T_r - T_{oc}) \frac{\left(1 - \frac{\Delta L}{L} \right) - \frac{1}{\beta} \frac{H}{L} \ln \left[\left(1 - \frac{\Delta H}{H} \right) + \beta \frac{L}{H} \left(1 - \frac{y}{L} \right) \right]}{\left[\left(1 - \frac{\Delta L}{L} \right) - \frac{1}{\beta} \frac{H}{L} \ln \left(1 - \frac{\Delta H}{H} \right) \right] + \frac{\lambda_o}{\alpha L}} \quad \text{для } y \in (L - \Delta L, L). \quad (2.47)$$

Таким чином, в результаті вирішення задачі були отримані рівняння які, дають можливість визначити тепловий потік та температури в фасонному вогнетриві з довільною конфігурацією комірок з теплоізоляцією.

2.2.2 Порівняння числового та аналітичного рішень

Для перевірки запропонованої методики виконаний розрахунок фасонного вогнетриву, конструкція якого приведена на рисунку. 2.2. Як показує практика, вказаний вогнетрив з розмірами $L=0.23$ м, $H=0.075$ м, $\Delta L=0.06$ м, $\Delta H=0.06$ м є найбільш технологічний при виготовленні.

При порівнянні отриманих даних використовувалось числове моделювання з врахуванням металевого корпусу та комірок заповнених теплоізоляційним

матеріалом. Для розрахунків застосовувався програмний комплекс ВЕСНА [70], розроблений на кафедрі ХПСМ, КПІ ім. Ігоря Сікорського.

При розрахунках потрібно враховувати, що впродовж роботи печі, за рахунок тертя матеріалу по внутрішній поверхні футерівки, її товщина зменшується від 230 мм (початок компанії печі) до 80 мм (кінець компанії печі), після чого проводиться плановий ремонт з встановленням нової футерівки

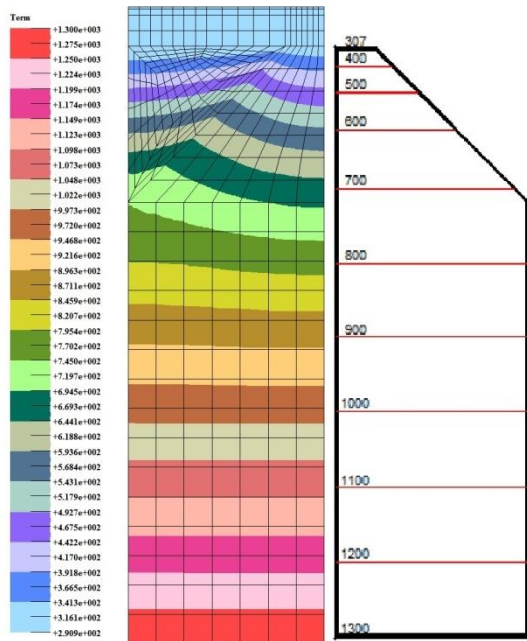
Вихідні дані для розрахунку:

- довжина вогнетриву $L=0.23$ м, 0.19 м, 0.155 м, 0.12 м, 0.08 м;
- напівширина вогнетриву $H=0.075$ м;
- зріз по довжині $\Delta L= 0.06$ м;
- зріз по ширині $\Delta H = 0.06$ м;
- температура вогневої поверхні $T_{\Gamma} = 1300$ °С;
- температура навколишнього середовища $T_{OC} = 20$ °С;
- теплопровідність хромомагнетитового вогнетриву $\lambda_o=1.900$ Вт/(м· К);
- коефіцієнт тепловіддачі в оточуюче середовище $\alpha=3.5+0.062 \cdot T_{\kappa}$, Вт/(м²·К).

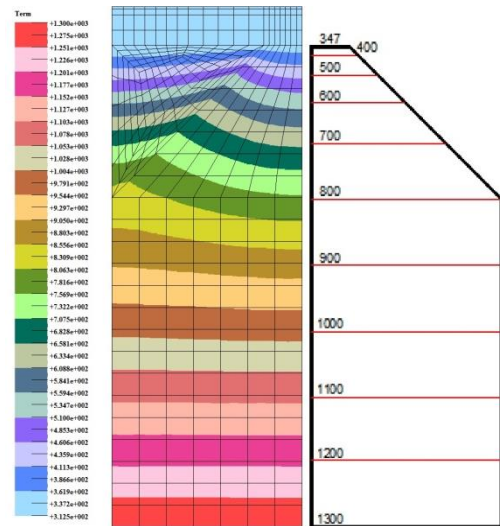
При числовому розрахунку додатково враховувались:

- металевий корпус $L_{\kappa}=0.02$ м;
- теплопровідність корпусу $\lambda_{\kappa}=45$ Вт/(м К);
- теплопровідність теплоізоляційного матеріалу $\lambda_{\Gamma} = 0.15$ Вт/(м К), мулітокремнеземна вата.

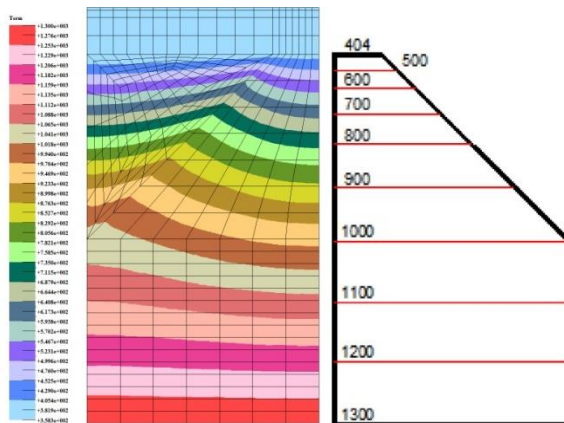
Теплові поля отримані в результаті числового моделювання та ізотерми при розрахунку по формулах (2.37) – (2.47) приведені на рисунку 2.3.



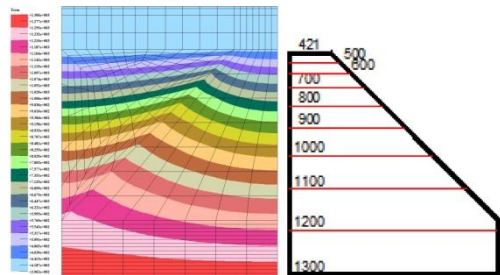
а) висота вогнетриву $L=0.23$ м



б) висота вогнетриву $L=0.19$ м



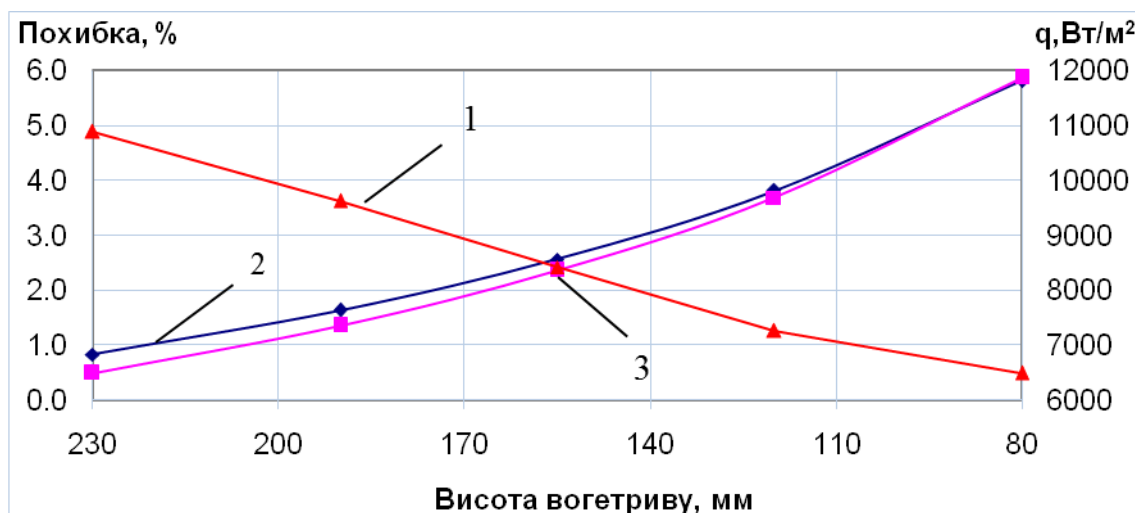
г) висота вогнетриву $L=0.12$ м



д) висота вогнетриву $L=0.08$ м

Рисунок 2.3 – Порівняння температури у фасонному вогнетриві, які визначені числовим та аналітичним методом

З наведених на рисунку 2.3 даних видно, що результати, які отримані аналітичним та числовим методом близькі за отриманими значеннями. Але слід зазначити, що в даних, отриманих аналітичним методом, ізолінія температур характеризується середньою температурою, що не дозволяє визначити детальну картину розподілу. Результати розрахунку зі значеннями теплового потоку через вогнетрив представлені на рисунку. 2.4.



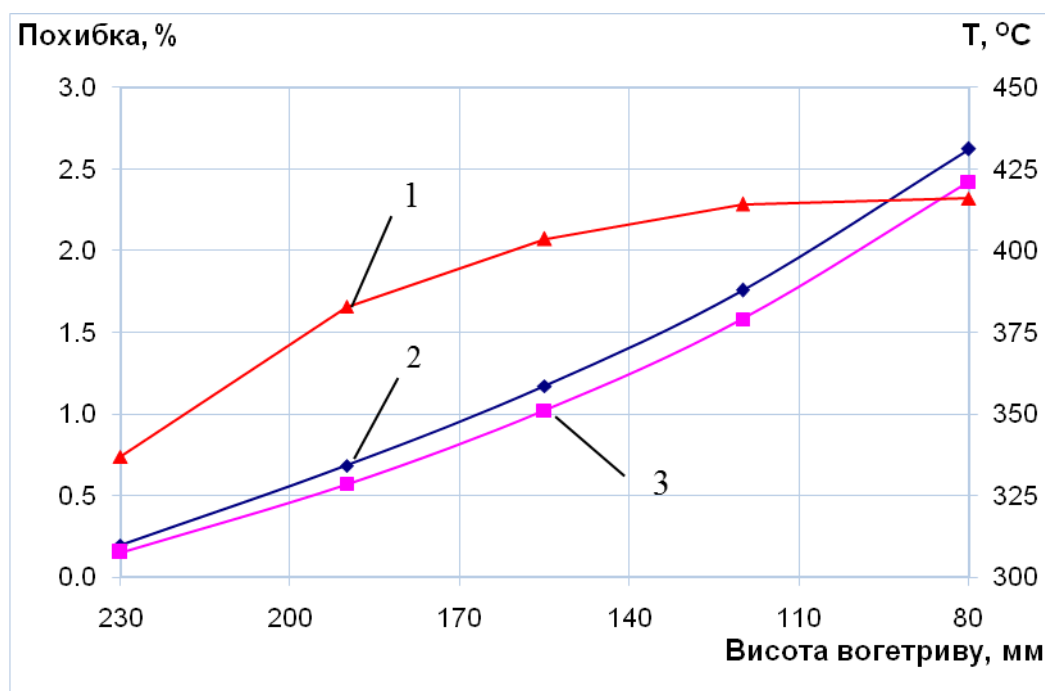
1-Аналітичний; 2-Числовий; 3-Похибка.

Рисунок 2.4 – Тепловий потік через фасонний вогнетрив

При порівнянні значень встановлено, що тепловий потік при числовому рішенні становить від 6831 Вт/м^2 до 11810 Вт/м^2 , при аналітичних розрахунках 6497 Вт/м^2 – 11896 Вт/м^2 . Таким чином максимальна похибка не перевищує 5%. Як слідує з аналізу даних, похибка зменшується при підвищенні температури в зоні теплоізоляційної комірки. Отримані дані показують, що при вказаній конструкції вогнетриву тепловий потік через комірку з теплоізоляцією не суттєвий і його значення не впливають на загальний тепловий режим в футерівці, тобто при оперативному розрахунку може не враховуватись, що було вказано в допущеннях.

Вказане дає можливість зробити висновок, що при збільшенні температур за рахунок зменшення товщини футерівки, ефективність теплоізоляції зростає. Тобто, чим вища температура у вогнетриві тим вища ефективність шару теплоізоляції.

Значення температури в опірній ніжці вогнетриву T_k приведені на рисунку 2.5.

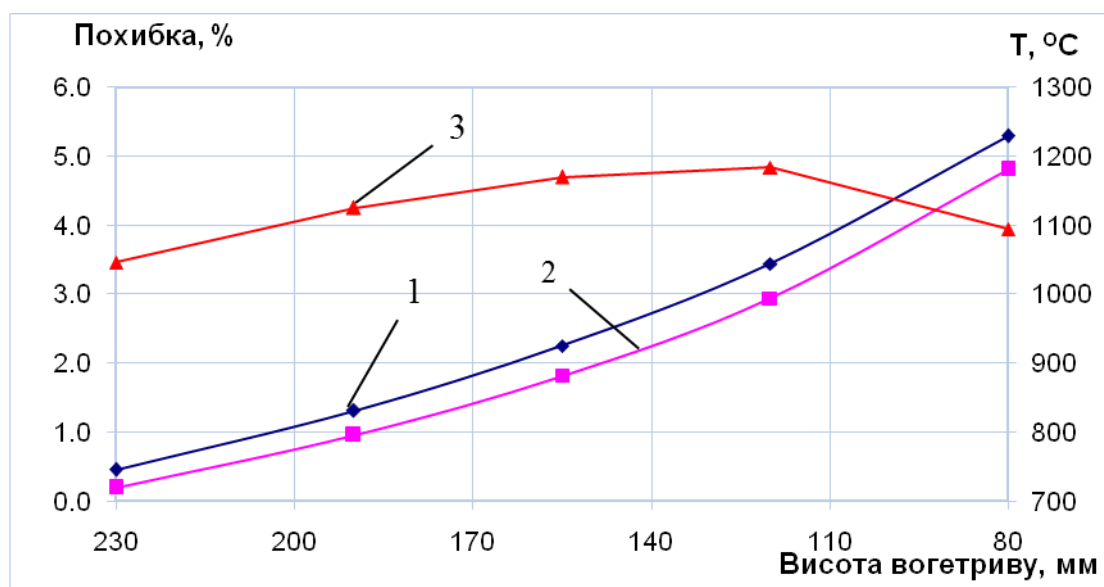


1-Аналітичний; 2-Числовий; 3-Похибка.

Рисунок 2.5 – Температури в опірній ніжці вогнетриву T_k

З графіків на рисунку 2.5 видно, що температура в ніжці вогнетриву T_k монотонно зростає при зменшенні товщини вогнетриву. По числовому розрахунку вона становить $309.7\text{ }^\circ\text{C} - 431\text{ }^\circ\text{C}$, аналітичному $307\text{ }^\circ\text{C} - 421\text{ }^\circ\text{C}$. Розбіжність між аналітичним та числовим методом не перевищує 2,3 %.

Важливим фактором для вибору теплоізоляційного матеріалу є визначення максимальної температури в теплоізоляційній комірці. На рисунку 2.6 приведені порівняння вказаних даних отриманих при аналітичному та числовому методах розрахунку. З графіків видно, що температура в комірці змінюється від $720\text{ }^\circ\text{C}$ до $1180\text{ }^\circ\text{C}$ при аналітичному та $746\text{ }^\circ\text{C} - 1229\text{ }^\circ\text{C}$ числовому розрахунку. Розбіжність даних по максимальних температурах у комірці з теплоізоляцією не перевищує 5 %.



1-Аналітичний; 2-Числовий; 3-Похибка.

Рисунок 2.6 – Зміна температури в комірці з теплоізоляцією

Отримані дані показують, що вказані допущення для аналітичного обчислення вибрані вірно і загалом для розглянутої конструкції вогнетриву та конфігурації комірки з теплоізоляційним матеріалом похибка розрахунків є допустимою. При порівнянні результатів з числовою моделлю похибка не перевищує 5%. Тому запропоновану методику можливо застосовувати для розрахунку зміни теплового потоку і теплового опору футерівки з додатковою теплоізоляцією, а також для при моделювання теплового потоку і теплового опору вогнетривів з додатковою теплоізоляцією.

2.3 Опис математичної моделі та алгоритму розрахунку

При встановленні у футеровку печі додаткової теплової ізоляції виникає ряд питань: який вплив зробить зменшення втрат у навколишнє середовище на температуру газів, що відходять; як змінюється витрата палива в залежності від зносу футеровки і, нарешті, яка ефективність встановлення теплоізоляції відносно теплового агрегата в цілому.

Через те, що обертова піч є складним агрегатом, теплові процеси в якому відбуваються комплексно і в значній мірі залежать один від іншого, відповідь на поставлене питання не є однозначним і вимагає проведення ряду досліджень.

Проте реалізація подібних досліджень безпосередньо на промислових печах вкрай складне а в деяких випадках є неможливим. Крім того, дослідження, проведені на одній печі, у силу її фізичної сутності, будуть відповідати тільки цій печі. В лабораторних умовах не реально змодельовати ті умови, при яких у процесі служби знаходиться тепловий агрегат.

У зв'язку з цим виникає необхідність теоретичного розв'язання поставленої задачі з урахуванням оптимальних параметрів роботи обертової печі. Задачу можливо вирішити при проведенні відповідних чисельно-експериментальних досліджень.

2.3.1 Алгоритм розрахунку печі з додатковою теплоізоляцією корпусу

В даній роботі ставиться задача промодельовати та визначити чисельно такі важливі теплові показники при роботі обертової печі як температури газів, що відходять та втрати тепла через стандартну футерівку та футерівку виконану вогнетривами з теплоізоляцією. При цьому потрібно враховувати зношування футерівки при роботі печі. Рішення вказаної задачі можливе при моделюванні роботи печі з комплексним використанням всіх теплових процесів, розглянутих вище та враховуванням особливостей конструктивних елементів теплового агрегату, зокрема вогнетривів з теплоізоляційними комірками. Загалом задача приводяться рішення системи нелінійних рівнянь в якій невідомі величини позначені курсивом.

Розглянемо рівняння теплового балансу для обертової печі [18,68,71].

$$\mathbf{Q} = Q_1 + Q_2 + \mathbf{Q}_3(t_w^G) + Q_4 + Q_5 + \mathbf{Q}_6(t_w^G) + Q_7 \quad (2.48)$$

де \mathbf{Q} – надходження теплоти, Вт;

Q_1 – тепловий ефект утворення клінкеру, Вт;

Q_2 – теплота на випаровування води, Вт;

$\mathbf{Q}_3(t_w^G)$ – втрати з газами, що відходять;

Q_4 – втрати з клінкером, Вт;

Q_5 – з повітрям яке виходить з холодильника, Вт;

$Q_6(t_w^G)$ – втрати теплоти з виносом, Вт;

Q_7 – втрати в навколишнє середовище через корпус, Вт;

t_w^G – температура газів, що відходять з печі, °С.

Надходження потоку теплоти визначається по наступним залежностям:

$$Q = Q_n^p \cdot \frac{R_s}{P_\rho} + \frac{R_s}{P_\rho} \cdot c_d t_d + (G_C^C c_C + G_W^M) t_M + \frac{R_s}{P_\rho} \cdot V_w c_w t_w \quad (2.49)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_n = \left(\frac{X}{0.124} \right)^3 \cdot \frac{Q_n^p \cdot R_s}{\sigma \cdot T_t^4} \\ Q_n^p \cdot \frac{R_s}{P_\rho} = \frac{\sum_{i=1}^I (G_i^M + P_i^M)}{X} \\ X = \left[0.43 \cdot \left(\frac{F_n}{D_n} \right)^{0.1} + \sqrt{\frac{Q_n^p \cdot R_s}{\sigma \cdot T_t^4} \cdot F_n} \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot T_t^3}{\omega_G^{0.1}}} \right] \\ \omega_G = \frac{V_g \cdot P_\rho \cdot 1000}{3600 \cdot 0.785 \cdot D_d^2 \cdot (1 - F_n)} \cdot \frac{T_i^G}{273} \end{array} \right. \quad (2.50)$$

де P_p – продуктивність печі;

D_d – діаметр печі, м;

ω_G – швидкість продуктів згорання, рад/с;

F_n – поверхня загального теплообміну;

η – ступінь тепловикористання;

R_s – витрати палива;

P_i – втрати тепла в навколишнє середовище відносно зон та інші, що визначаються з матеріального балансу або розрахунку горіння палива.

Затрати теплоти на утворення клінкеру Q_1 , на випаровування води Q_2 , з клінкером Q_4 , з повітрям, що виходить з холодильника Q_5 за відомими залежностями [2,68].

Згідно з зональним методом розрахунку ентальпія газового потоку на виході з обертового теплового агрегату визначається з співвідношення:

$$\mathbf{Q}_3 = q_0^\Gamma + \frac{Q_{\text{низ}}^p \cdot \mathbf{R}_s}{P_p} - \sum_{i=1}^I (G_i^M - P_i^M), \quad (2.51)$$

тобто значення \mathbf{Q}_3 залежить від витрати палива. Крім того температуру газів, що відходять з печі (\mathbf{t}_w^G), можливо визначити, використовуючи метод підбору, по наступній залежності:

$$\mathbf{Q}_3 = \left[\left(V_{H_2O}^\Gamma \cdot \frac{\mathbf{R}_s}{P_p} + V_{H_2O}^M \right) \cdot C_{H_2O}(\mathbf{t}) + \left(V_{CO_2}^\Gamma \cdot \frac{\mathbf{R}_s}{P_p} + V_{CO_2}^M \right) \cdot C_{CO_2}(\mathbf{t}) + V_{O_2}^\Gamma \cdot \frac{\mathbf{R}_s}{P_p} \cdot C_{O_2}(\mathbf{t}) + V_{N_2}^\Gamma \cdot \frac{\mathbf{R}_s}{P_p} \cdot C_{N_2}(\mathbf{t}) \right] \cdot \mathbf{t}_{\text{omx}}^\Gamma \cdot \quad (2.52)$$

Втрати теплоти при виносі пилу визначаються по формулі:

$$\mathbf{Q}_6 = G_d^b \cdot \mathbf{t}_w^G + (G_M^C - G_d^b) \cdot C_d \cdot (\mathbf{t}_w^G - t_d). \quad (2.53)$$

Втрати потоку тепла в навколишнє середовище через корпус, виходячи з теплового балансу [68], становлять:

$$\mathbf{Q}_7 = \mathbf{Q} - [\mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2 + \mathbf{Q}_3(\mathbf{t}_w^G) + \mathbf{Q}_4 + \mathbf{Q}_5 + \mathbf{Q}_6(\mathbf{t}_w^G)]. \quad (2.54)$$

Разом з цим втрати потоку теплоти в навколишнє середовище через корпус можливо визначити відносно втрат по енергетичним зонам:

$$\mathbf{Q}_7 = \sum_{i=1}^L \mathbf{P}_i = \frac{2\pi r}{P_p} \sum_{i=1}^L \frac{\mathbf{T}_{K1i} - \mathbf{T}_{K2i}}{\mathbf{R}_i} \cdot L_i; \quad \mathbf{R}_i = \frac{\delta_{li}}{\lambda_{li}} + \frac{\delta_{2i}}{\lambda_{2i}(\mathbf{T}_{K2i})} \quad (2.55)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{T}_{K1i} = T_i^\Gamma - \frac{T_i^\Gamma - \mathbf{T}_{K2i} - R_i C_B \left[(T_i^\Gamma + 273)^4 - (\mathbf{T}_{K1i} + 273)^4 \right]}{\frac{0.418 \cdot \lambda_\Gamma \cdot \left(\frac{\omega_\Gamma \cdot D_n}{\nu_\Gamma} \right)^{0.67}}{D_n} \cdot R_i + 1} \\ \mathbf{T}_{K2i} = \frac{\sqrt{R_i^2 (A + B \cdot T_{OC})^2 + 2 \cdot R_i (A + 2 \cdot B \cdot \mathbf{T}_{K1i} - B \cdot T_{OC}) + 1 + B \cdot R_i \cdot T_{OC} - A \cdot R_i - 1}}{2 \cdot B \cdot R_i} \end{array} \right. \quad (2.56)$$

$$R_i = \frac{H}{\lambda_o} \left[\frac{L - \Delta L_i}{H} - \frac{1}{\beta_i} \ln \left(1 - \frac{\Delta H_i}{H} \right) \right]; \quad \beta_i = \frac{\Delta H_i}{\Delta L_i}. \quad (2.57)$$

$$C_B = \frac{5.68 \cdot 10^{-8} K_B \cdot \varepsilon_m}{1 - (1 - \varepsilon_m) \cdot (1 - F_n)}, \quad i = 1 \dots 8$$

де \mathbf{T}_i^G – температури газу на границях зон;

$\mathbf{T}_{K1i}, \mathbf{T}_{K2i}$ – температура внутрішньої та зовнішньої поверхні футерівки по зонам;

R_i – тепловий опір корпусу печі по зонам;

δ_{ji} – товщина складових по корпусу (j) відносно енергетичних зон (i);

λ_{ji} – теплопровідність складових по корпусу (j) відносно енергетичних зон (i);

$\alpha = A + B \cdot T_{K2i}$ – коефіцієнт тепловіддачі від корпусу в оточуюче середовище.

При використанні ітераційних методів розрахунку доцільно використати аналітичний метод для визначення температури корпусу печі з врахуванням уведення в футерівку додаткової теплоізоляції [88].

При визначенні температури газового потоку на границях зон використовуються відомі рівняння зональних методів відносно технологічного методу, який досліджується.

Практично завжди, при моделюванні теплообміну в обертових печах, поле температур визначається через відомі потоки тепла. При цьому зональні рівняння теплового балансу є нелінійними відносно невідомих температур.

Таким чином в рівняннях (2.48) – (2.57) отримуємо замкнуту систему нелінійних рівнянь, в якій невідомі виділені курсивом. До них відносяться: витрата робочого палива R_s , температура газів t_w^G , що виходять з печі, температури $T_1 \dots, T_j$, по зонні втрати тепла в навколишнє середовище P_i , та інші. Отримана система нелінійних рівнянь вирішується ітераційним методом Ньютона. Температура на «гарячій» (T_{KH}) та «холодній» (T_{K2i}) поверхнях футерівки визначається з підсистеми нелінійних рівнянь, які вирішуються методом дотичних. При цьому температура по межах зон T_i^G визначається по відомих з зонального методу розрахунку співвідношеннях. Урахування значень теплового опору (R_i) в різних зонах печі дає можливість моделювати різну величину зносу вогнетриву та можливість встановлення теплоізоляційного шару футерівки.

2.3.1 Алгоритм розрахунку печі з додатковою теплоізоляцією корпусу

Для здійснення чисельного експерименту створений алгоритм із використанням вищенаведених методів розрахунку обертової цементної печі. У алгоритмі піч умовно розбивається на зони з заданими температурами матеріалу на їхніх межах. Спочатку розрахунок проводиться без введення в футеровку

обертової печі додаткової теплоізоляції. При цьому виконується позонний розрахунок потоку теплоти що необхідно передати або відібрати в сировини для збереження теплового балансу по межах зон. Задача вирішується виходячи з хімічного складу шихти й отримуваного продукту.

Після визначення компонент газowego потоку обчислюється ентальпія продуктів горіння палива і теоретичної температури горіння полум'я.

Потім визначається ентальпія газowego потоку між зонами печі. За отриманими даними методом підбору визначається температура газowego потоку. При цьому враховується склад і кількість газів, що виділяються в кожній зоні.

Надалі температури газowego потоку, що відходить із печі, і інших показників визначається тепловий баланс печі. Отримані з теплового балансу втрати тепла в навколишнє середовище Q_7 порівнюються з раніше розрахованими втратами P, O, T . Якщо різниця між ними буде більше наперед заданої величини D, T , то витрата газу змінюється і розрахунок повторюється по описаній вище схемі. Розрахунок провадиться доти, поки відмінність між Q_7 і P, O, T буде задовільною.

Наступним етапом чисельного експерименту є розрахунок температури газу, що відходить, і теплового балансу печі при введенні в її футеровку теплоізоляційного матеріалу. У цьому випадку ефективність використання палива збільшується. На цьому етапі в розрахунок вводиться номер зони печі, в яку укладається додаткова теплоізоляція, довжина зони укладки додаткової теплоізоляції і теплопровідність теплоізоляції. Залишивши витрату палива і склад продуктів горіння тими ж, що і без теплоізоляції печі, визначається питома витрата газу при більш високій ефективності його використання у різних зонах печі за допомогою зменшення втрат тепла в навколишнє середовище. Далі визначається приріст продуктивності, пов'язаний зі зменшенням втрат тепла в навколишнє середовище за рахунок введення додаткової теплоізоляції. По отриманих значеннях розраховується температура газів, що відходять, і складається тепловий баланс печі.

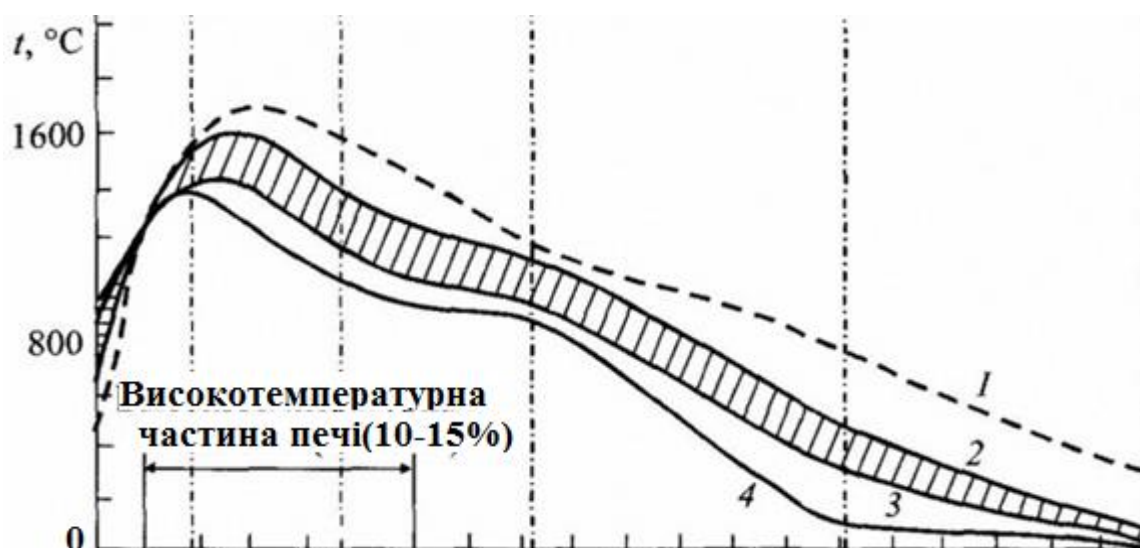
Дані, що характеризують хімічний склад вихідної сировини і палива що спалюється, а також певні температури газового потоку на межах зон і на виході з печі разом із розрахунком теплового балансу виводяться на друк.

Відповідно до описаного вище алгоритму на алгоритмічній мові FORTRAN розроблена прикладна програма для розрахунку обертової печі й ефективності застосування в ній додаткової теплоізоляції. Блок-схема та опис програмного забезпечення приведено в **ДОДАТОК А**.

2.4 Дослідження теплових режимів обертових печей

2.4.1 Рішення контрольно–тестових задач

Для апробації розробленої методики та алгоритмів розрахунку використовувались тестові задачі, для яких є достовірні теоретичні дані або дані фізичного експерименту. Результати розрахунку порівнювались з вказаними даними [2,11]. Для тестування програми виконувався розрахунок обертової печі для «сухого» та «мокрого» способів виробництва цементу. Числові значення по розподілу кількості теплоти по довжині для діючих обертових печей брались з [2, 8,11]. Для тестування приведеної математичної моделі розраховувалась обертова піч для виробництва цементу по «мокрому» способу. Розмір 5x185 м, продуктивність 73 т/год. Паливо – газ Дашавського родовища. На рисунку 2.7 приведені дані [2] відносно температури газового потоку, футерівки та матеріалу печі 5x185 м.



1-Газовий потік; 2,3-Футерівка; 4-Матеріал.

Рисунок 2.7 –Значення температур в печі (для «мокрого» способу) [2]

Результати розрахунку температури газового потоку, внутрішньої поверхні футерівки та металевого корпусу печі приведені на рисунку 2.8.

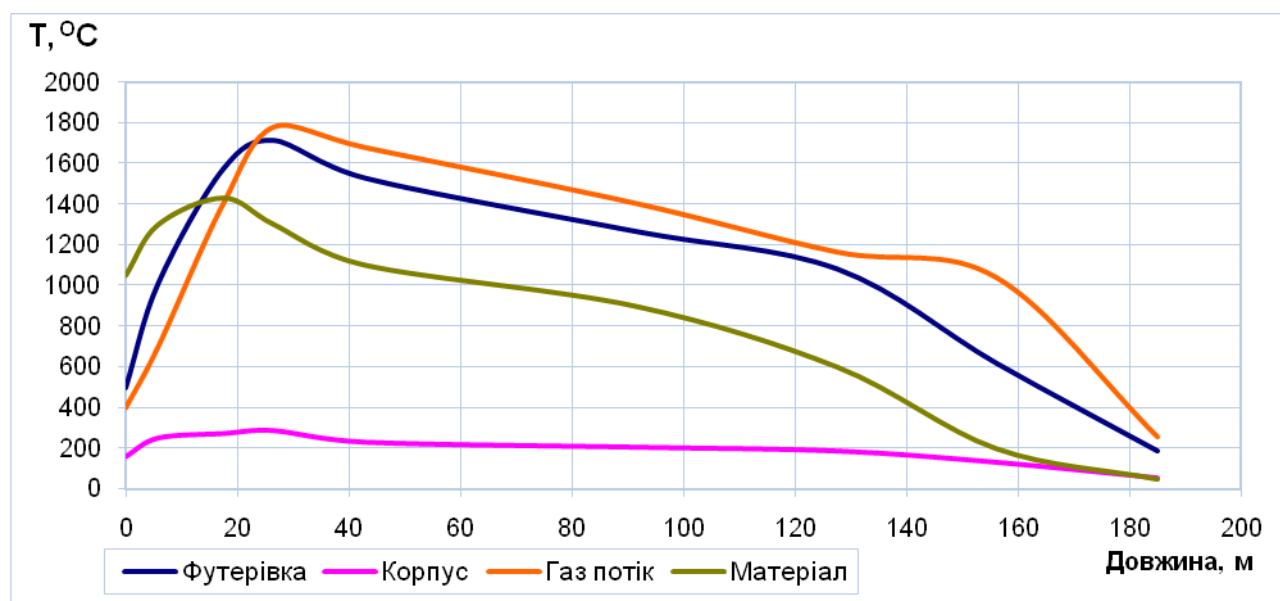
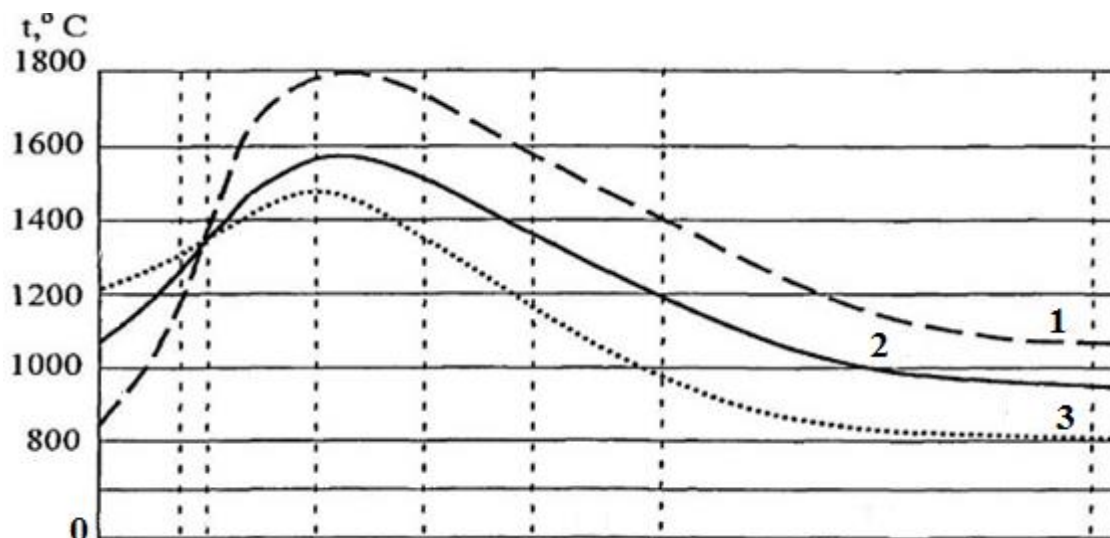


Рисунок 2.8 – Результати розрахунку температур в обертовій печі

Аналізуючи результати розрахунку встановлено, що максимальна розбіжність у даних, отриманих у результаті чисельного експерименту та розрахунках приведених в [2,8] не перевищує 8% по температурі димових газів, що відходять, і 10% щодо витрати палива.

Числові значення по розподілу температур газового потоку, матеріалу та футерівки для обертової печі 4,5х80м брались з даних приведених в [6,8,11]

приведені на рисунку 2.9. Продуктивність 125000 кг/год, при використанні природного газу Дашавського родовища.



1 - Газовий потік; 2 – Футерівка; 3 - Матеріал.

Рисунок 2.9 –Значення температур в печі (для сухого способу) [11]

Результати розрахунку температури газового потоку, футерівки та матеріалу приведені на рисунку 2.10

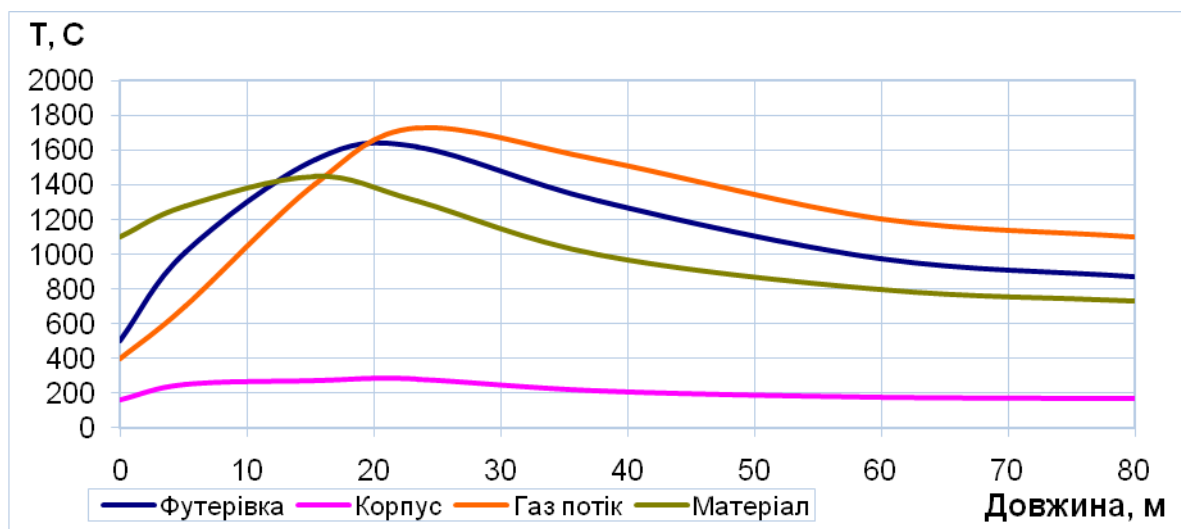


Рисунок 2.10 – Розподіл температур в обертовій печі «сухого» способу

Аналізуючи результати розрахунку встановлено, що максимальна розбіжність у даних, отриманих у результаті чисельного експерименту та аналітичних даних в [2, 8] не перевищує 6.2% по температурі димових газів, що відходять та 8% щодо витрати палива.

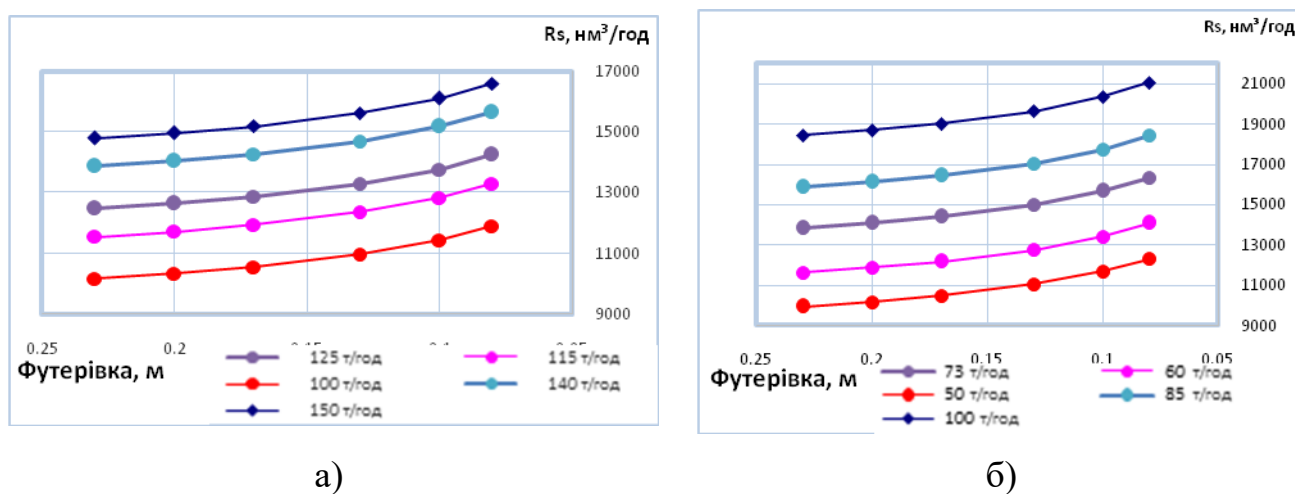
Визначивши можливість розрахунку обертової цементної печі розглянемо вплив додаткової теплоізоляції на теплові процеси, що протікають у печі.

2.4.2 Дослідження ефективності теплового агрегату при наявності футерівки з теплоізоляцією

Основними показниками роботи теплового агрегату, які визначають його енергоефективність та впливають на характеристики роботи є витрата палива, втрата теплоти через корпус печі в оточуюче середовище, втрати з димовими газами, що відходять з теплового агрегату а також дослідження теплообміну в робочому просторі печі.

Для виконання числового експерименту як похідні дані були використані конструктивні та теплові характеристики для найбільш поширених в Україні теплових агрегатів печі 4.5x80 м для «сухого» та печі 5x185 м «мокрого» способів виготовлення цементу. В експерименті досліджувався різний ступень зношення футеровки, де висота вогнетривів становила – 230, 200, 170, 130 та 80 мм. Продуктивність теплового апарату «сухого» способу складала 100, 115, 125, 140, 150 т/год, «мокрого» способу 50, 60, 73, 85, 100 т/год. Для спалювання в печах використовувався природний газ, що за своїм складом відповідав Дашавському родовищу.

Результати розрахунку витрат газу від ступеню зношеності футеровки представлені на рисунку 2.11. Розрахунок проводився при різних значеннях продуктивності оборотної печі.



а)

б)

а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

Рисунок 2.11 – Залежність ступеню зношеності футеровки від витрати газу

З наведених даних видно, що витрати палива збільшуються за нелінійною

залежністю та збільшуються при зменшенні товщини футерівки та збільшенні продуктивності печі. Насамперед це пов'язано зі збільшенням теплових втрат в навколишнє середовище крізь зношену футеровку.

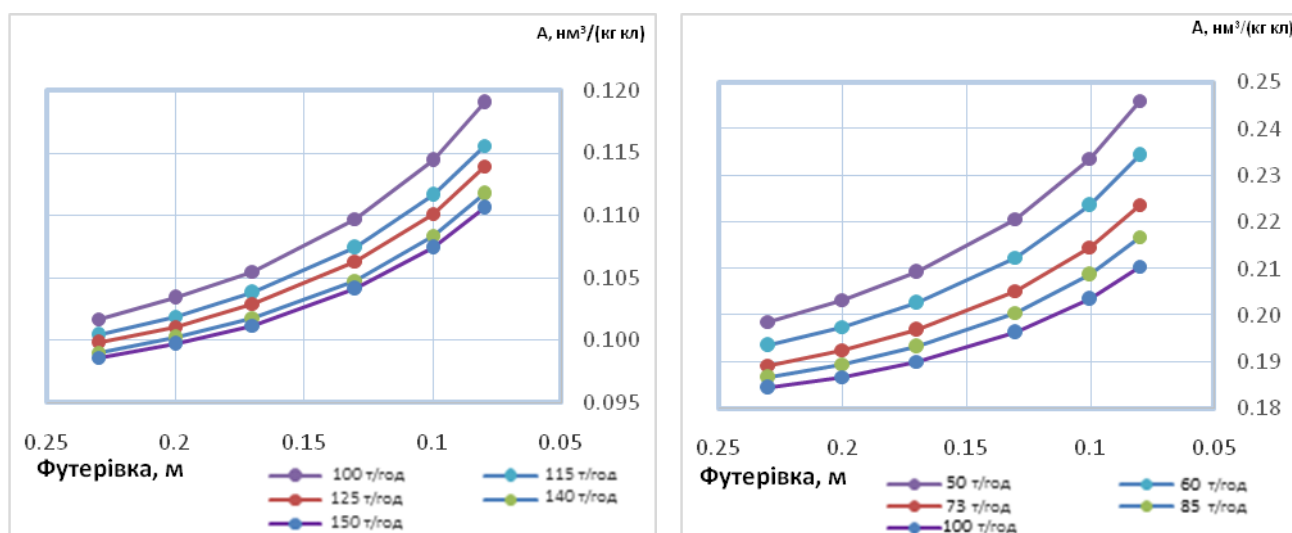
Розрахунок питомих витрат палива, визначався з залежності:

$$A = \frac{R_s}{P_p}, \quad (2.58)$$

де R_s – витрати палива, $\text{нм}^3/\text{год}$;

P_p – продуктивність, $\text{кг}/\text{год}$.

Результати розрахунку для теплових агрегатів наведені на рисунку 2.12.



а)

б)

а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

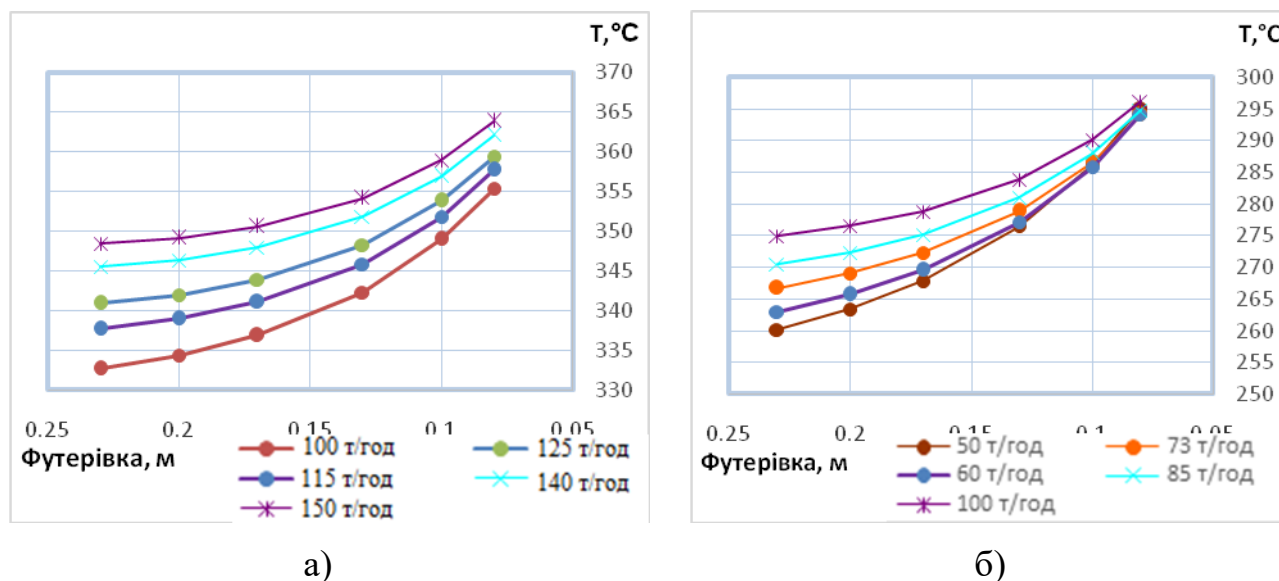
Рисунок 2.12 – Питомі витрати палива

З наведених даних видно, що витрати газу збільшуються при зменшенні товщини футерівки та продуктивності печі. Потрібно відмітити, що отримані питомі витрати газу добре узгоджуються з розрахунками обортових печей, виконаними в [2,8,18]. Витрати газу збільшуються при зменшенні товщини футерівки та збільшенні продуктивності печі.

Порівнюючи результати розрахунку печей «мокрого» та «сухого» способу потрібно відмітити, що витрати палива печі «мокрого» перевищують в 1.8-2.0 раз витрати при «сухому» способі, що відповідає практиці експлуатації діючих обортових печей та свідчить про більш ефективне використання теплової енергії пічними агрегатами «сухого» способу виробництва клінкеру. Вказане явище пояснюється тим, що в печі «мокрого»

способу мають досить низьку продуктивність, а значна кількість теплоти використовується для випаровування вологи з сировинного матеріалу.

Зміна температури газу, що відходить з пічного агрегату приведена на рис. 2.13.



а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

Рисунок 2.13 – Зміна температура газів що відходять з печі при зміні продуктивності

З графіка видно, що при збільшенні продуктивність печі збільшується температура газів, що відходять, і відповідно витрати палива. При збільшенні ступеню зносу футеровки температури газового потоку, що відходить з печі також збільшується. При цьому температура газового потоку, що виходить з теплового агрегату «сухого» способу суттєво вища ніж з обертової печі «мокрого» способу. Зазвичай для зменшення температури газів використовують скрубери [11,18].

Потрібно зазначити, що при «сухому» способі виготовлення клінкеру тепловий агрегат складається з обертової печі, та запічних теплообмінників. Тому газовий потік, що відходить з печі, потрапляє в теплообмінники, де відбувається підігрів сировинних матеріалів. Підігрітий в теплообмінниках матеріал, з температурою 700 – 750 °C потрапляє в піч для подальшої обробки, а газовий потік, що віддав частину тепла матеріалу - в теплообмінник. Температура газового потоку, що виходить з печі в теплообмінник, наведена на рисунку 2.14.

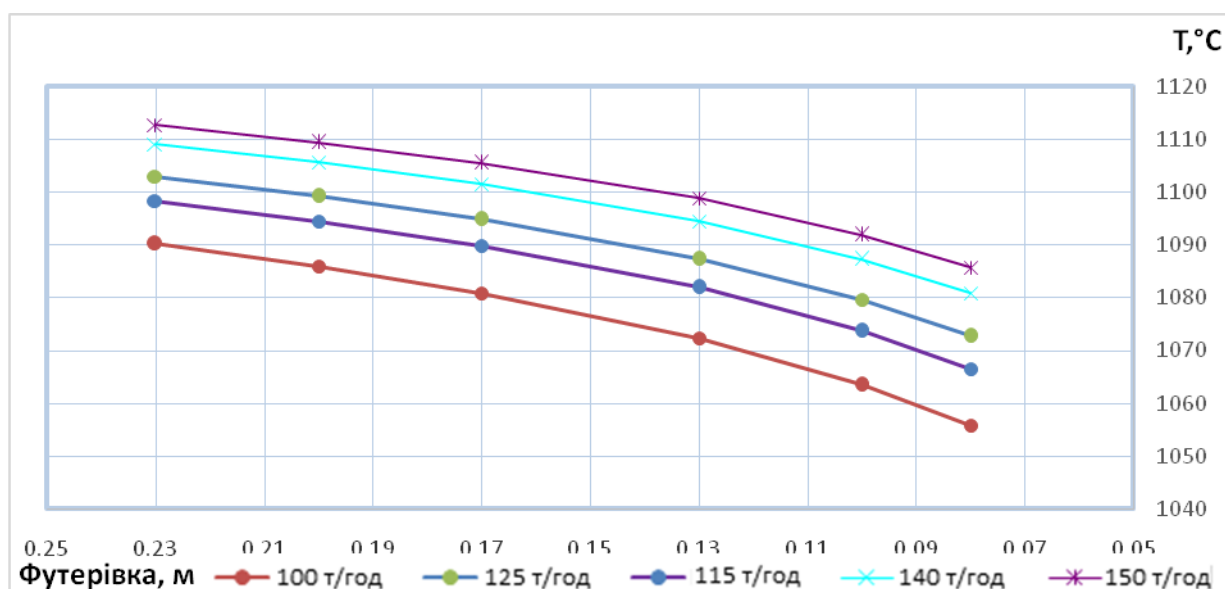
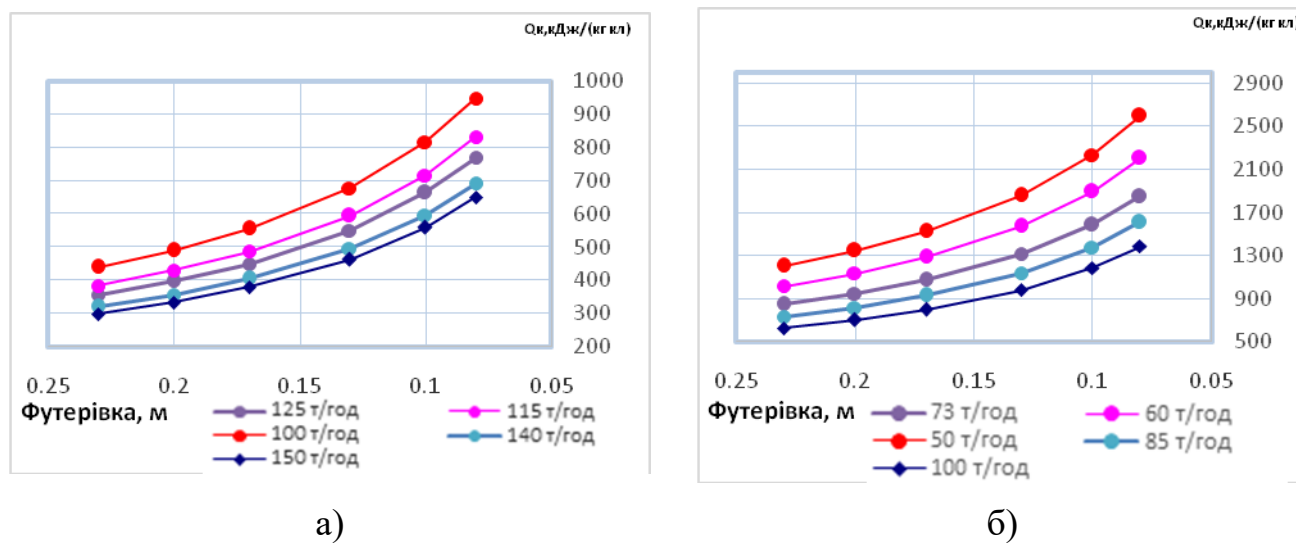


Рисунок 2.14 – Температура газів, що відходять з печі

З графіків видно, що температура газового потоку, який відходить з обертової печі, зменшується при зменшенні товщини футерівки. Вказане пояснюється збільшенням теплових втрат в навколишнє середовище через корпус печі. При зміні продуктивності температура газового потоку збільшується пропорційно зміні цього параметру, що пояснюється збільшенням витрат палива, яке використовується для обробки більшої кількості матеріалу.

Витрати теплоти через корпус печі в навколишнє середовище, в залежності від зносу футерівки, приведені рисунку 36.



а)

б)

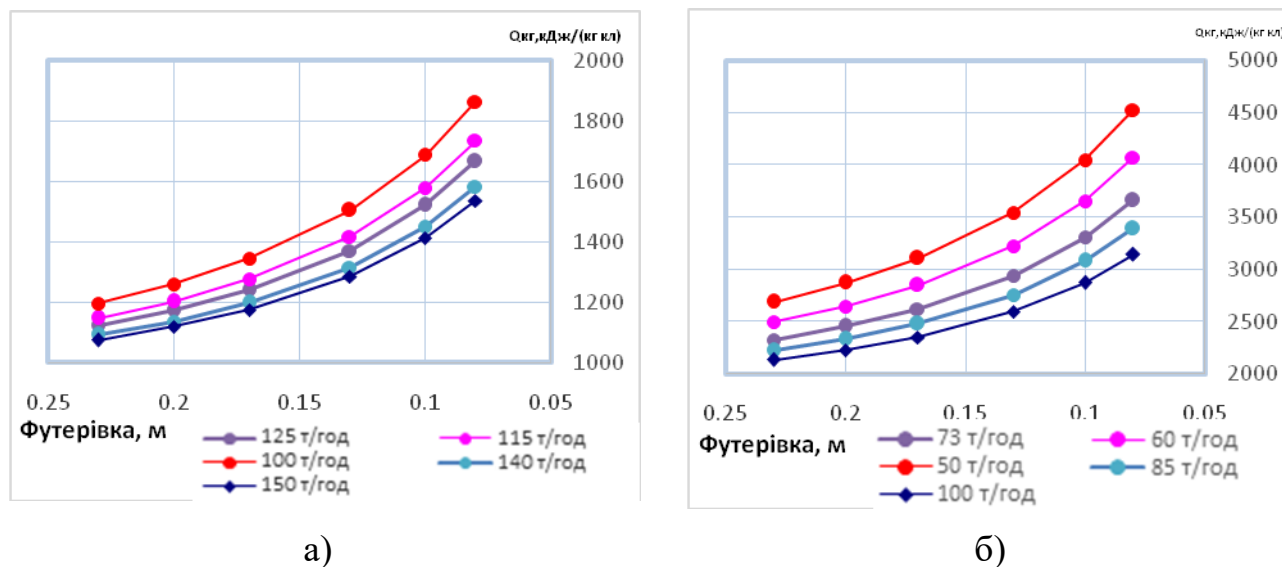
а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

Рисунок 2.15 – Втрати теплоти через корпус

З отриманих даних видно, що втрати тепла через корпус для обертових печей

«мокрого» способу виробництва клінкеру суттєво вищі ніж при «сухому». Величина втрат пов'язана з значною довжиною обертової печі «мокрого» способу, яка становить 185 м, в порівнянні з піччю довжиною 80 м.

Загальні витрати втрати теплоти через корпус печі та з газами, що відходять з теплового агрегату, в залежності від зношення футерівки, приведені рисунку 2.16.



а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

Рисунок 2.16 – Загальні втрати тепла

З графіків видно, що зменшення товщини футерівки суттєво збільшує втрати теплоти, приблизно на 35-45%. Потрібно відмітити, що дані втрати спричинені головним чином тепловими втратами через корпус печі. Питомі втрати тепла з газовим потоком, що відходять з теплового агрегату, залишаються майже незмінними і становлять близько 20-22%.

Питомі витрати мабуть, палива для базових варіантів печей становлять 0.11 нм³/(кг кл) для агрегату «сухого» способу з піччю 4.5х80 м та 0.21 нм³/(кг кл) для печі 5х185м «мокрого» способу виробництва клінкеру (середнє значення).

Аналіз енергетичної ефективності теплового агрегату свідчить, що перспективним напрямком збільшення енергоефективності є використання теплоізоляції у футерівці обертової печі. Тому вкрай актуальним є вирішення питання, як саме встановлення додаткової теплоізоляції буде впливати на роботу обертової печі та агрегату в цілому.

Пропонуємо вирішити проблему енергозбереження шляхом встановлення в

футерівку печі вогнетривів з підвищеним тепловим опором. Будемо розглядати два можливі режими використання печей: 1 – зменшення витрат газу шляхом економії палива; 2 – збільшення продуктивності за рахунок зменшення теплових витрат.

Розрахунок виконаний з використанням математичної моделі та алгоритмів описаних вище. В якості футерівки з додатковою теплоізоляцією застосовувались вогнетриви наведені на рисунку 2.3.

Результати розрахунку температур газового потоку, внутрішньої поверхні футерівки, матеріалу та металевого корпусу печі «сухого» способу, при товщині футерівки 230 мм приведені на рисунку 2.17.

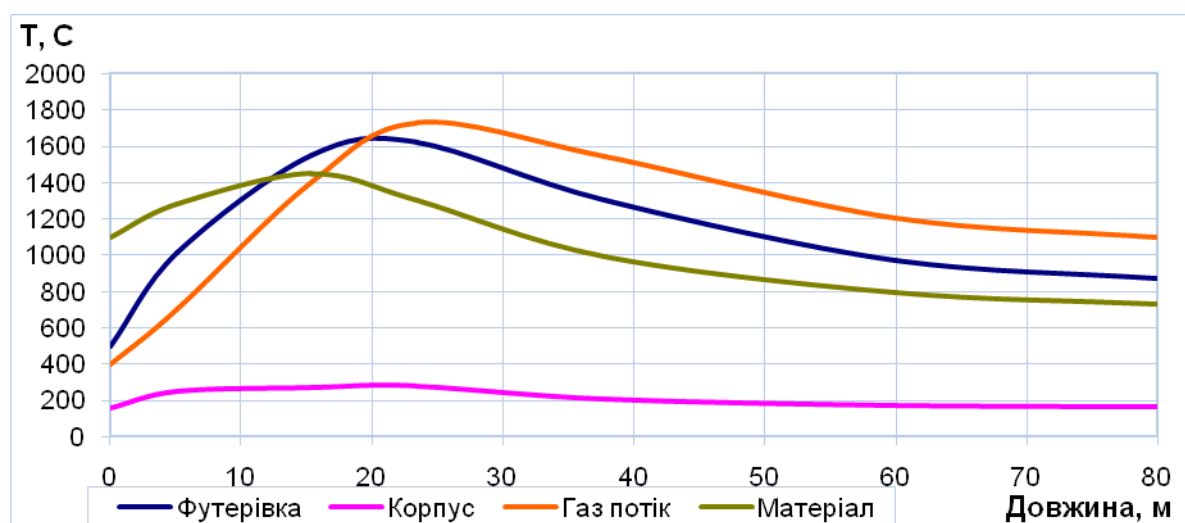


Рисунок 2.17 –Результати розрахунок печі 4.5x80 м з теплоізоляцією корпусу

Порівнюючи результати розрахунків з базовою конструкцією обертової печі та печі з футерівкою з теплоізоляцією було встановлено, що температура газового потоку в обертовій печі підвищилась в середньому на 25-30 °С, температура футерівки, у високотемпературних зонах на 35-48 °С. Температура корпусу печі зменшилась на 66-82 °С.

Результати розрахунку печі «мокрого» способу, з товщиною футерівки 230 мм приведені на рисунку 2.18.

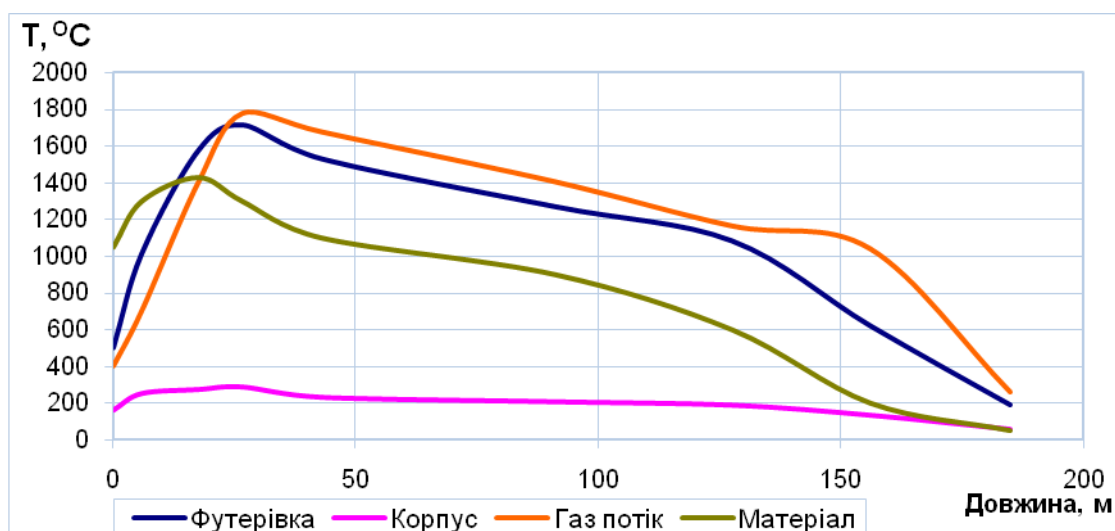
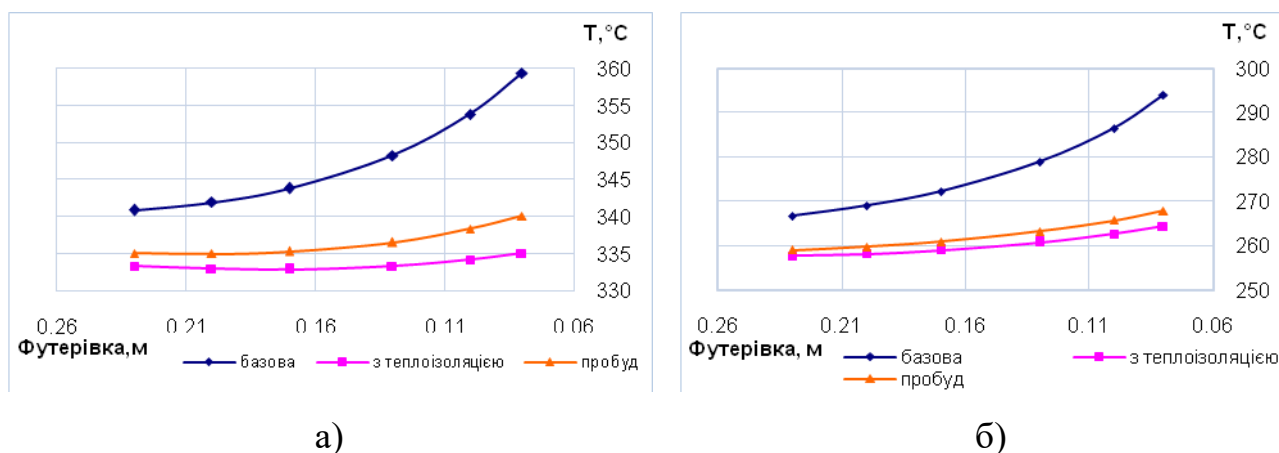


Рисунок 2.18 – Результати розрахунку печі 5x185 м з теплоізоляцією корпусу

Відповідно до базової конструкції обертової печі футерівка з теплоізоляцією дозволила підвищити температуру газового потоку у високотемпературних зонах в середньому на $35\text{--}44^\circ\text{C}$, температуру футерівки на $57\text{--}62^\circ\text{C}$. При цьому температура корпусу печі зменшилась на $77\text{--}89^\circ\text{C}$. Вказані результати дають можливість підвищити продуктивність агрегату або зменшити витрати палива.

Значення температури газів на виході з теплового агрегату, в порівнянні з базовими, приведені на рисунку 2.19.



а)

б)

а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

Рисунок 2.19 – Температура газів на виході з теплового агрегату

Згідно результатів числового експерименту температура газового потоку на виході з запічних теплообмінників змінюється в межах $340\text{--}360^\circ\text{C}$, а з печі 5x185 м $266\text{--}294^\circ\text{C}$, що добре узгоджується з даними по експлуатації аналогічних теплових установок. При наявності футерівки з теплоізоляцією температура газів, що відходять зменшується та

становить 332-335 °С, та 258-265 °С відповідно. Причому інтервал зміни температур явно зменшився, що дає можливість краще регулювати процес очищення газів особливо використовуючи електрофільтри. Зниження температури пояснюється збільшенням теплового опору вогнетриву шляхом уведення в комірки волокнистого теплоізоляційного матеріалу з значним тепловим опором в порівнянні з шамотом.

Температура газового потоку, при виході з печі 4.5x80 м представлена на рисунку 2.20.

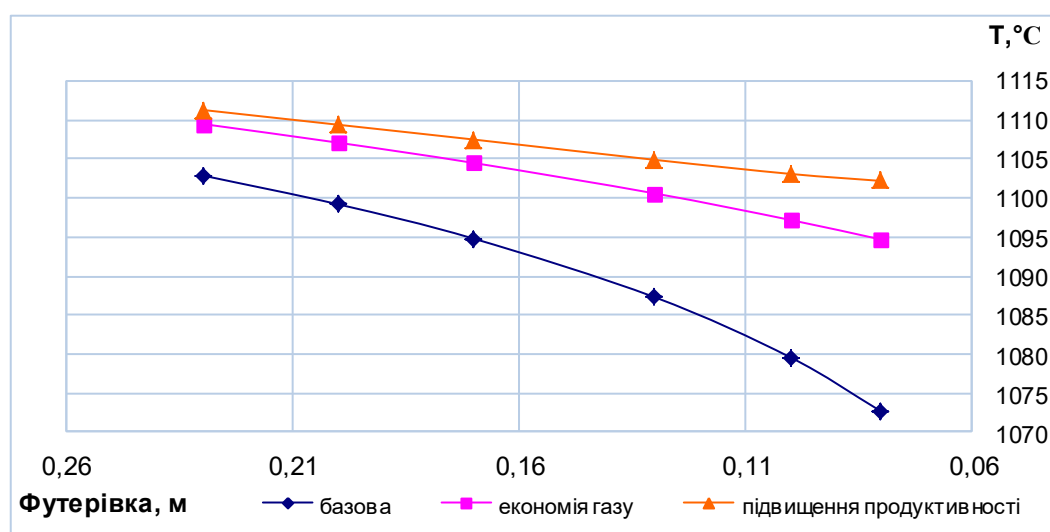
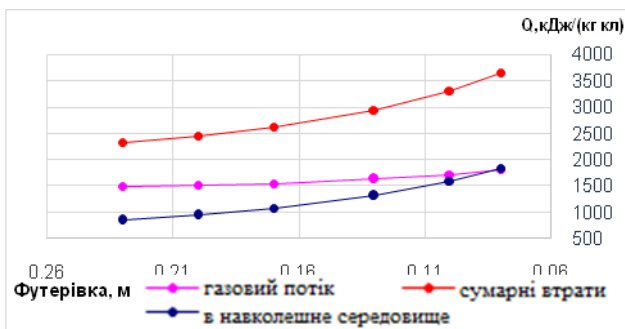
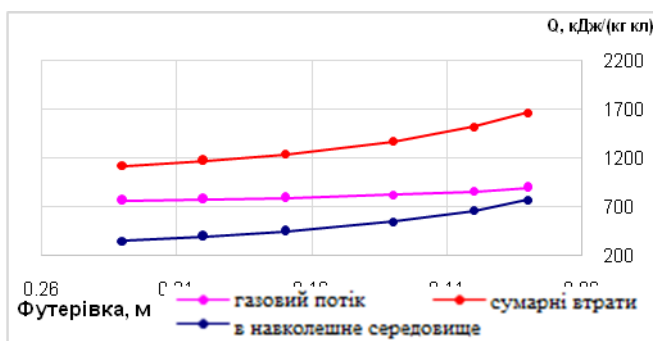


Рисунок 2.20 – Температура газів на виході з печі 4.5x80 м

З графіків видно, що по мірі зношення футерівки температура газового потоку, що відходить з теплообмінника, зменшується. Максимальна температура становить 1102 °С – при товщині футерівки 230 мм, та 1073 °С – при товщині футерівки 80 мм. Але при використанні додаткової теплоізоляції вона збільшується. Таким чином використання додаткової теплоізоляції дає можливість зменшити температуру газів, що виходять з теплового агрегату (Рисунок 2.19а), та збільшити кількість теплоти, що потрапляє в запічний теплообмінник. Загалом це сприяє зменшенню втрат тепла та більш ефективному використанню теплоти газового потоку.

При аналізі втрат тепла з будемо розглядати втрати через корпус печі та з газами, що відходять, оскільки вони є основними. Втрати з клінкером, повітрям (з холодильника) та винесенням є вкрай незначними та враховуються в розрахунках при визначенні теплового балансу. Втрати тепла в базовому тепловому агрегаті приведені на рисунку 2.21



а)

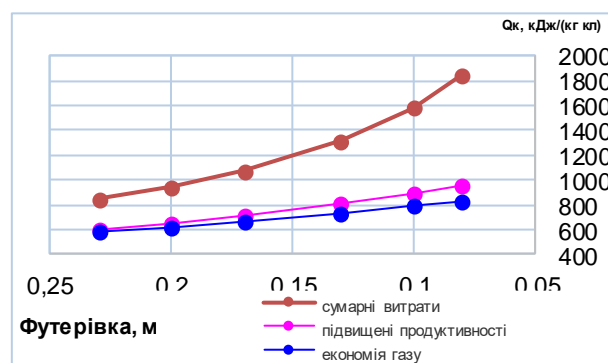
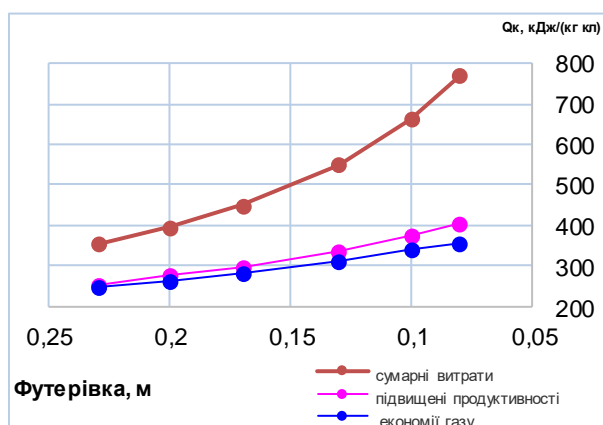
б)

а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб.

Рисунок 2.21 – Втрати тепла з базовою футерівкою в тепловому агрегаті

На рисунках показані втрати через корпус, з газовим потоком та сумарні втрати теплового агрегату в залежності від зношення футерівки. Як слідує з графіків при зміні товщини футерівки втрати через корпус значно збільшуються та для печі 4.5x80 складають 355-770 кДж/(кг кл), для печі 5x185 м відповідно 844-1845 кДж/(кг кл). Втрати з газом, що відходить, змінюються не суттєво. Загальні втрати теплоти збільшуються, головним чином, за рахунок збільшення втрат через корпус, та становлять 1121-1667 кДж/(кг кл) для печі «сухого» та 2328-3660 кДж/(кг кл) для печі «мокрого» способу. Суттєві втрати печі «мокрого» способу пояснюються умовами технологічного режиму роботи, який включає: випаровування великої кількості вологи (до 45%), значні розміри корпусу печі та відносно низьку продуктивність.

Порівняння втрат через корпус печі наведені на рисунку 2.22.



а)

б)

а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб;

Рисунок 2.22 – Втрати тепла з футерівкою з теплоізоляцією при економії газу

Як і слід очікувати при зменшенні товщини футерівки втрати теплоти в оточуюче середовище зростають. Порівнюючи втрати тепла через корпус видно, що використання теплоізолюваної футерівки суттєво зменшує втрати через корпус. Так для печі 4.5x80 м на початку кампанії печі вони становлять 355 кДж/(кг кл), в кінці кампанії – 770 кДж/(кг кл). При використанні теплоізоляції для економії палива відповідно 254 кДж/(кг кл) та 403 кДж/(кг кл). У випадку підвищення продуктивності ці показники складають відповідно 245 кДж/(кг кл) та 355 кДж/(кг кл).

Для обертової печі 5x185 м втрати теплоти в оточуюче середовище через корпус на початку кампанії складають 844 кДж/(кг кл), кінець кампанії – 1845 кДж/(кг кл). У випадку встановлення додаткової теплоізоляції в футерівку втрати становлять 603 кДж/(кг кл) та 961 кДж/(кг кл) при економії палива і 573 кДж/(кг кл) та 819 кДж/(кг кл) при збільшенні продуктивності теплового агрегату.

Загальні втрати тепла через корпус та з газовим потоком приведені на рисунку 2.23

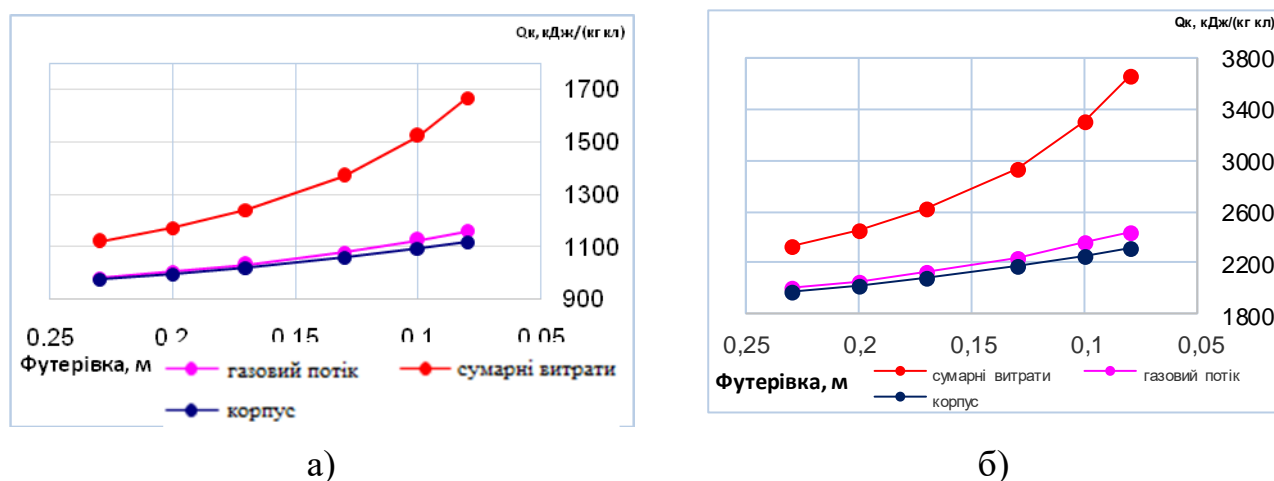


Рисунок 2.23 – Втрати тепла з футерівкою з теплоізоляцією при економії продуктивності

З графіків видно, що загальні втрати теплоти суттєво зростають при

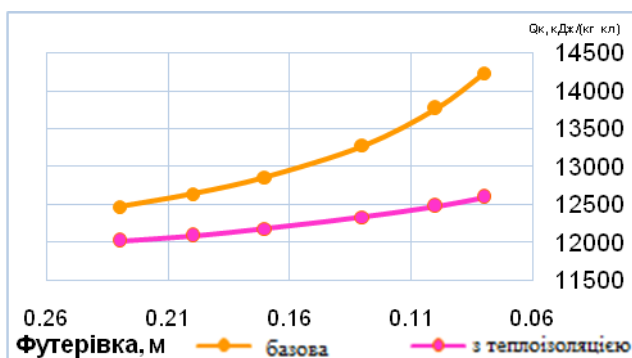
зношенні футерівки. Причому інтенсивність тепловтрат при цьому суттєво збільшується. Так для теплового агрегату з піччю 4.5x80 м вони становлять 1121 кДж/(кг кл) при товщині футерівки 230 мм та 1667 кДж/(кг кл) з товщиною 80 мм. Для печі 5x185 м відповідно 2328 кДж/(кг кл) та 3660 кДж/(кг кл).

Інша картина спостерігається при використанні футерівки з теплоізоляцією. В цьому випадку, як показують розрахунки, загальні втрати теплоти для агрегату з піччю 4.5x80 м в середньому зменшуються на 21% при економії палива та на 22.8% при підвищенні продуктивності. В печі 5x185 м - на 23.8% та 26.1% відповідно. Причому інтенсивність зростання втрат теплоти при зменшенні товщини футерівки суттєво менша, що пояснюється підвищеним тепловим опором футерівки.

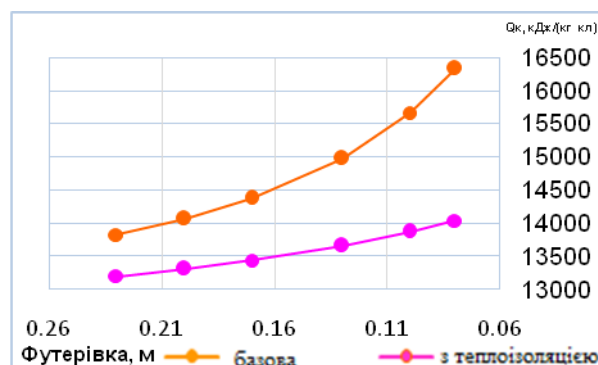
При порівнянні з втратами теплоти через корпус (див. рис. 2.22) загальні втрати теплоти збільшуються за рахунок втрат теплоти через корпус та пропорційно їм. Втрати теплоти з газовим потоком змінюються не суттєво. Останнє очевидно пояснюється тим, що підтримання у високотемпературній зоні печі нормального теплового режиму, при зменшенні товщини футеровки вимагає збільшення витрат палива.

Як показують розрахунки кількість теплоти, що втрачається через корпус печі та з газовим потоком при встановленні футерівки з додатковою теплоізоляцією суттєво зменшується. Також з отриманих даних можливо зробити висновок, що з точки зору енергозбереження обертової печі збільшення продуктивності теплового агрегату є більш ефективним ніж економія палива.

Розглянемо питання зменшення енерговитрат при економії палива та підвищенні продуктивності більш детально. На рисунку 2.24 приведені результати розрахунку ефективності теплоізоляції шляхом економії палива.



а)



б)

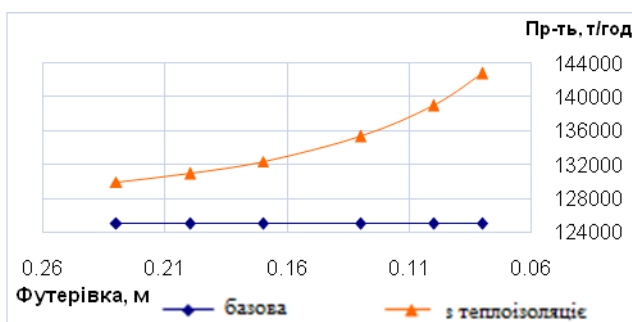
а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

Рисунок 2.24 – Залежності витрати газу при економії палива

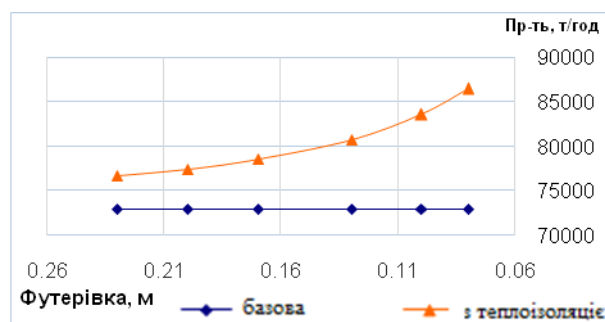
Розглядаючи питання можливості економії палива в теплових агрегатах порівняємо витрати палива для печі «сухого» способу. В середньому, як видно з приведеного на рисунку графіка, вони складають $13282 \text{ нм}^3/\text{год}$. При встановленні в футерівку додаткової теплоізоляції витрати зменшуються на 7.1% і становить становлять $12333 \text{ нм}^3/\text{год}$. Економія газу складає $949 \text{ нм}^3/\text{год}$.

Більш суттєвою є економія газу при виробництві клінкеру «мокрим» способом. В цьому випадку витрати газу зменшуються до $13659 \text{ нм}^3/\text{год}$ відносно $14977 \text{ нм}^3/\text{год}$, тобто на $1318 \text{ нм}^3/\text{год}$.

На рисунку 2.25 приведені результати розрахунку ефективності теплоізоляції шляхом підвищення продуктивності теплового агрегату.



а)



б)

а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

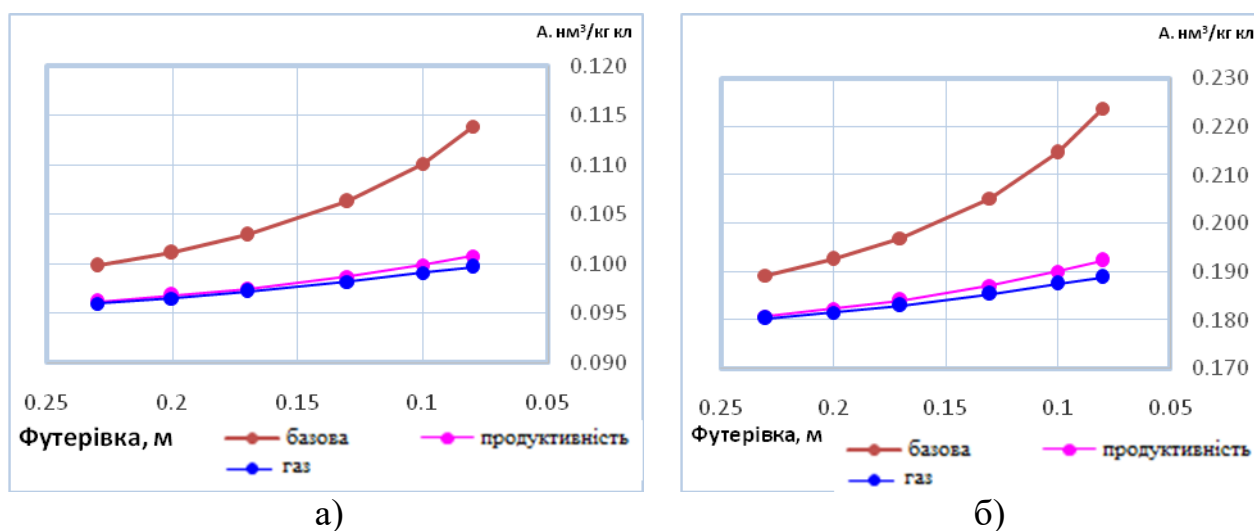
Рисунок 2.25 – Залежності підвищення продуктивності від теплоізоляції

Порівняння проводилось методом зіставлення продуктивності базового агрегату та агрегату з теплоізоляційованою футерівкою. З приведених графіків

видно, що приріст продуктивності для печі 4.5x80 м становить 10.2 т/год. Для печі 4.5x80 м продуктивність зросла на 7.3 т/год.

Підвищення продуктивності пов'язане насамперед зі зменшенням теплових втрат в навколишнє середовище, за рахунок чого досягається зменшення витрат на випал матеріалу.

Загальна ефективність роботи теплового агрегата характеризується питомими витратами газу відносно його продуктивності. Порівняємо дані значення відносно базового теплового агрегата та обертової печі з теплоізоляцією футерівки. Результати розрахунку питомих витрат палива приведені на рисунку 2.26



а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

Рисунок 2.26 – Питомих витрат палива

З отриманих графіків видно, що піч сухого способу працює більш ефективно, затрати становлять в ній питомі витрати природного газу становлять 0.0998 nm³/(кг кл) на початку кампанії та збільшуються до 0.13 nm³/(кг кл) в кінці кампанії. Питомі витрати для печі мокрого способу становлять 0.19 nm³/(кг кл) та 0.22 nm³/(кг кл) відповідно. Збільшення витрат пояснюється насамперед збільшенням теплових втрат в навколишнє середовище і тим самим збільшенні витрат палива і витрат теплоти на випал матеріалу.

З приведених графіків неважко помітити, що ефективність теплоізоляції суттєво підвищується при максимальному зношенні футерівки. При цьому питомі витрати газу становлять $0.10 \text{ нм}^3/(\text{кг кл})$ для печі $4.5 \times 80 \text{ м}$, що дозволяє в кінці кампанії заощаджувати 3750 нм^3 газу в годину. Для печі $5 \times 185 \text{ м}$ питомі витрати $0.1923 \text{ нм}^3/(\text{кг кл})$, економія палива становить 2292 нм^3 в годину.

Аналізуючи отримані дані розглянемо загальну ефективність використання додаткової теплоізоляції в футерівці. Результати розрахунків представлені у вигляді графіків приведених на рисунку 2.27.

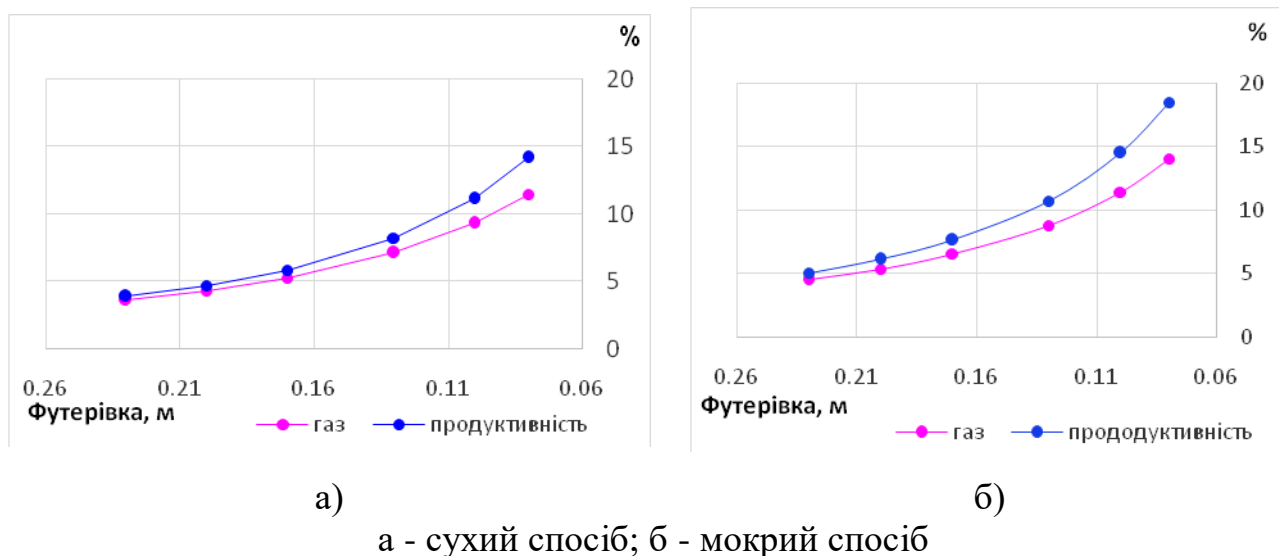


Рисунок 2.27 – Загальна ефективність застосування додаткової теплоізоляції

З розрахунків визначено, що для обортової печі $4.5 \times 80 \text{ м}$ «сухого» способу при товщині футерівки 230 мм економія палива становить 3.9% . При зменшенні товщини футерівки до 80 мм – 11.5% . Тобто за час експлуатації середньоінтегроване значення складає 6.86% , що дозволяє зменшити витрати газу на $950 \text{ нм}^3/\text{год}$. Збільшення продуктивності, при використанні тієї ж кількості палива як і для футерівки без теплоізоляції, становить для футерівки 230 мм становить 3.9% , 80 мм – 14.2% , тобто в середньому, за період експлуатації, на 8.02% або збільшення продуктивності на 10.03 т/год .

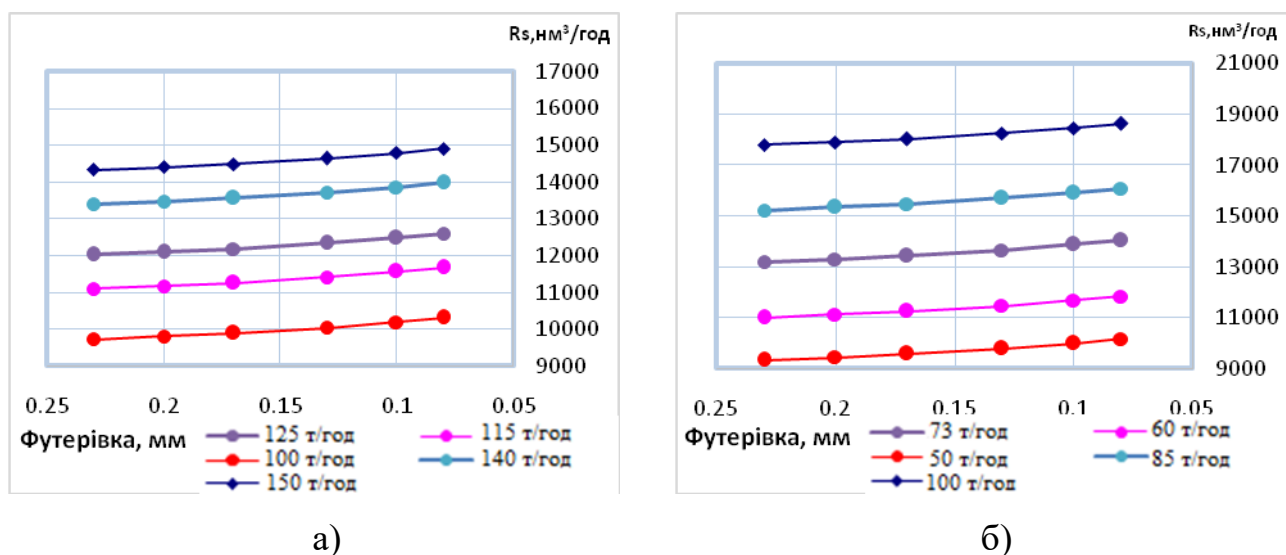
При використанні печі $5 \times 185 \text{ м}$ «мокрого» способу витрати палива за період експлуатації печі можливо скоротити в середньому на 9.1% (4.5% початок кампанії печі, 14.1% кінець кампанії). За рахунок цього можливо зменшити витрати газу на $1320 \text{ нм}^3/\text{год}$. Підвищення продуктивності становить 10.1% (5.4% при товщині футерівки 230

мм та 18.7 % при товщині 80 мм). Збільшення продуктивності за час роботи печі становит 7.34 т/год.

Як слідує з приведених графіків збільшення продуктивності теплового агрегату є більш дієвим методом з точки зору підвищення енергетичної ефективності теплового агрегату як для «сухого» так і «мокрого» способів виробництва клінкеру.

Для повного рішення задачі доцільно розглянути питання яким чином додаткова теплоізоляція впливає на загальну зміну продуктивності обертової печі в порівнянні з базовою продуктивністю теплового агрегату.

Результати розрахунку витрат палива при зміні продуктивності та використанні футерівки з теплоізоляцією представлені на рисунку 2.28.

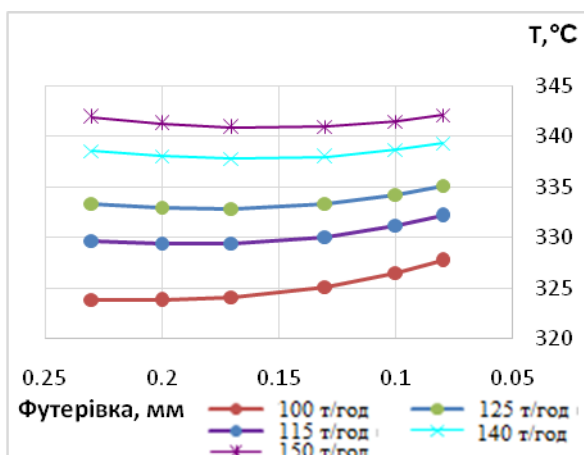


а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

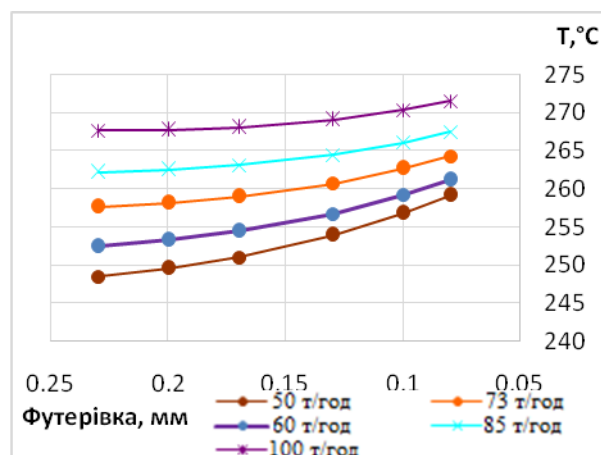
Рисунок 2.28 – Загальні витрати палива при теплоізоляції (а де ж тут ізоляція)

Порівнюючи отримані дані з витратами теплового агрегату без теплоізоляції (рис. 2.11) можливо зробити висновок про зменшення загальних витрати палива. При цьому при продуктивності 100 т/год витрати зменшуються на 8.4%, продуктивності 150 т/год на 6.2% для «сухого» способу. Для печей «мокрого» способу виробництва при продуктивності 60 т/год витрати зменшуються на 11.2%, продуктивності 85 т/год на 7.0%.

Температура газу, що виходить з теплового апарату в режимі економії палива наведена на рисунку 2.29.



«сухий» спосіб

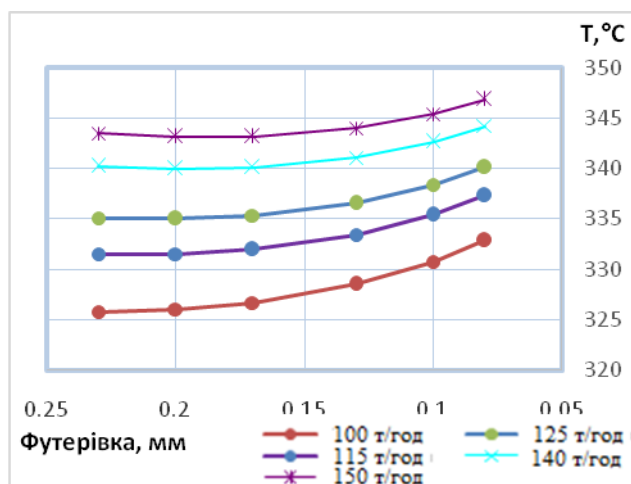


«мокрый» спосіб

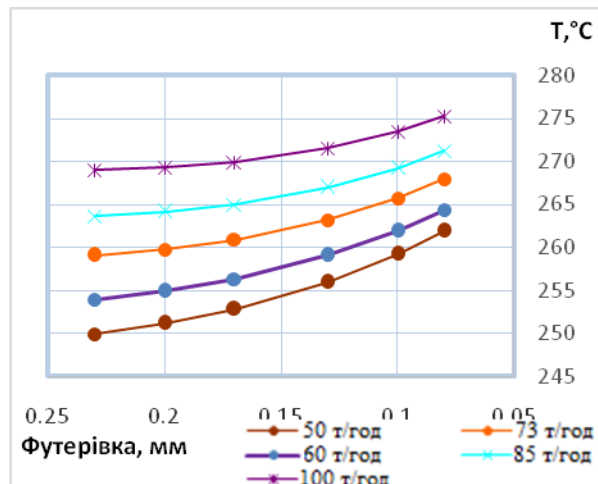
Рисунок 2.29 – Залежності температури відхідних газів при теплоізоляції

Порівнюючи отримані дані з рисунку 2.13 можливо відмітити, що температура газового потоку, що відходить з теплового агрегату зменшилась у порівнянні з агрегатом без використання теплоізоляції. Однак вона збільшується при збільшенні продуктивності печі, що пов'язане зі збільшенням витрат палива. Як слідує з графіків, інтенсивність збільшення температури зростає при збільшенні продуктивності печі «мокрого» способу та сповільнюється для печі «сухого» способу, що пояснюється наявністю запічних теплообмінників.

Температура газу, що виходить з теплового апарату в режимі підвищення продуктивності приведена на рисунку 2.30.



а)



б)

а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

Рисунок 2.30 – Температура газу при виході з апарату в режимі підвищення продуктивності

При використанні режиму підвищення продуктивності температура газів, що відходить також підвищується при збільшенні загальної продуктивності теплового апарату. Причому температура газового потоку вища ніж в режимі економії палива на 3-5 °С. Вказане пояснюється зменшенням втратами через корпус для печі в режимі роботи підвищення продуктивності.

Втрати теплоти через корпус в режимі економії палива представлені на рисунку 2.31.

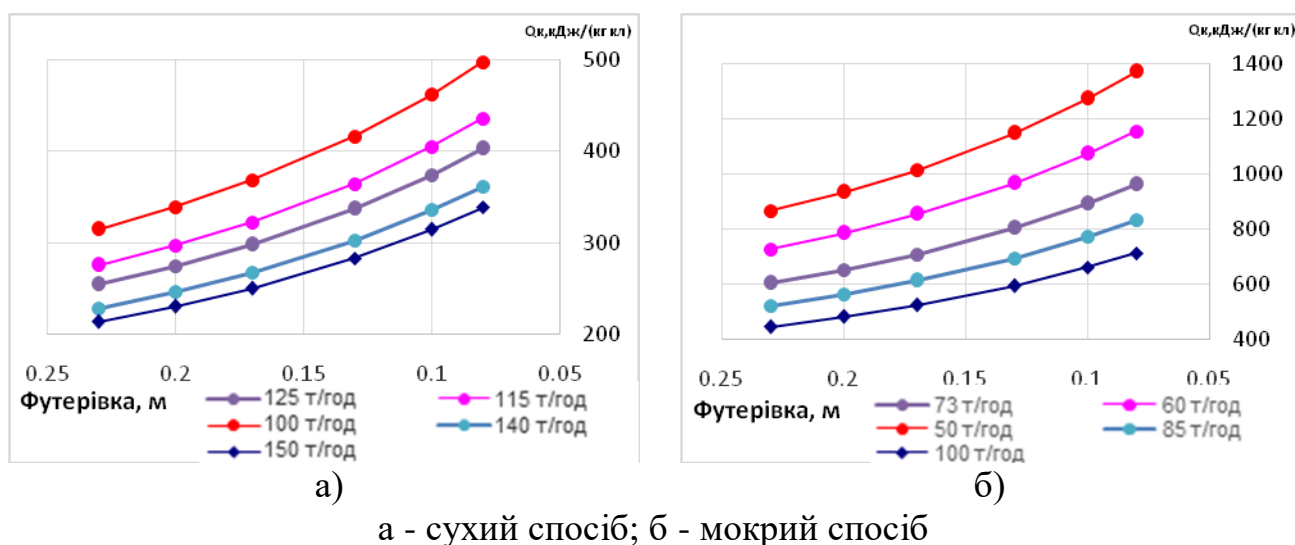
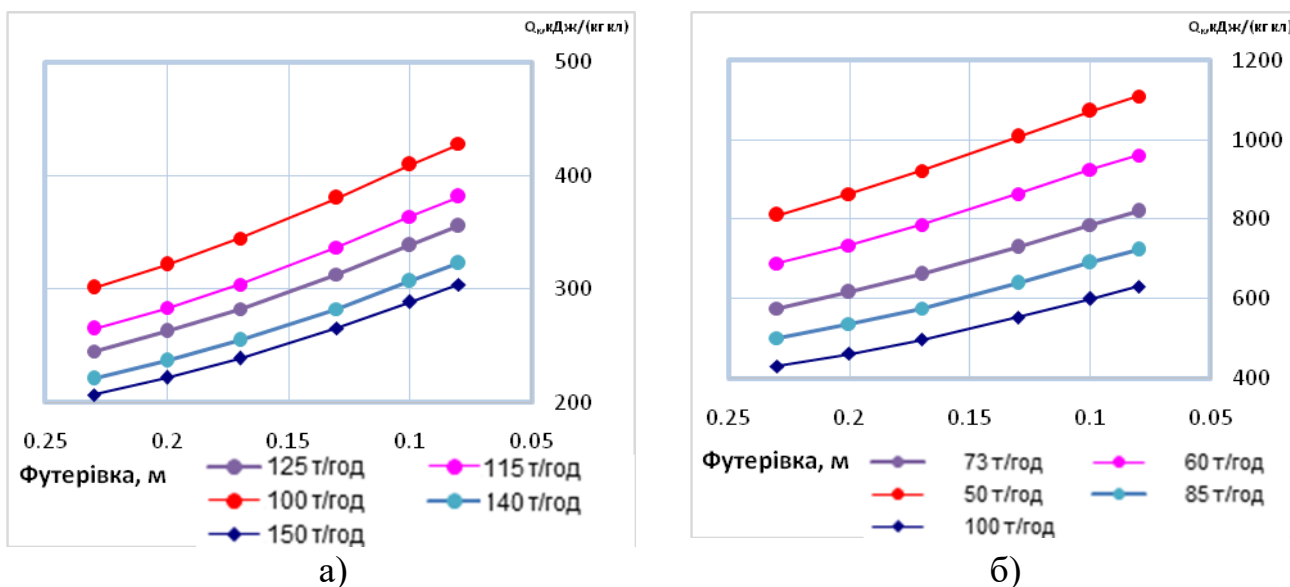


Рисунок 2.31 – Втрати теплоти через корпус печей в режимі економії палива

З наведених рисунків видно, що при збільшенні продуктивності печі втрати тепла через корпус зменшуються. Дане явище пов'язане зі збільшенням площі контакту футерівка-матеріал і відповідно зменшенням вільної поверхні футерівки.

Втрати тепла через корпус в режимі підвищення продуктивності наведені на рисунку 2.32.

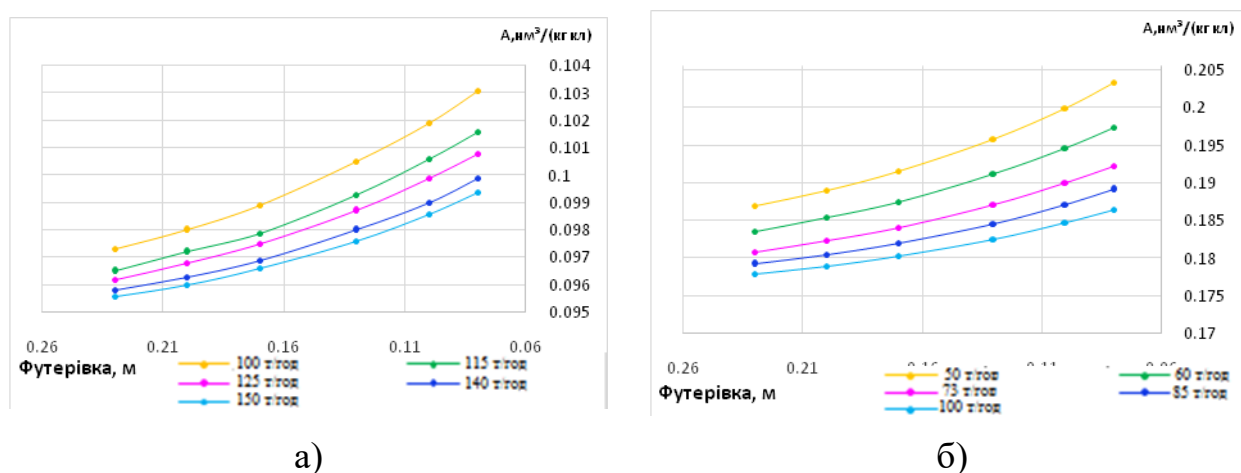


а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

Рисунок 2.32 – Втрати через корпус (пр.-ть)

Втрати через корпус, при використанні режиму підвищення продуктивності, зменшуються при збільшенні загальної продуктивності печі. Інтенсивність зростання втрат збільшується відповідно зменшенню продуктивності для печей «сухого» та «мокрого» способів. Отримані дані свідчать, що втрати теплоти через корпус менші ніж для режиму економії палива, що пояснюється незначним збільшенням втрат з газами, що відходять з теплового агрегату.

Питомі витрати палива теплових агрегатів в режимі економії палива на рисунку.2.33



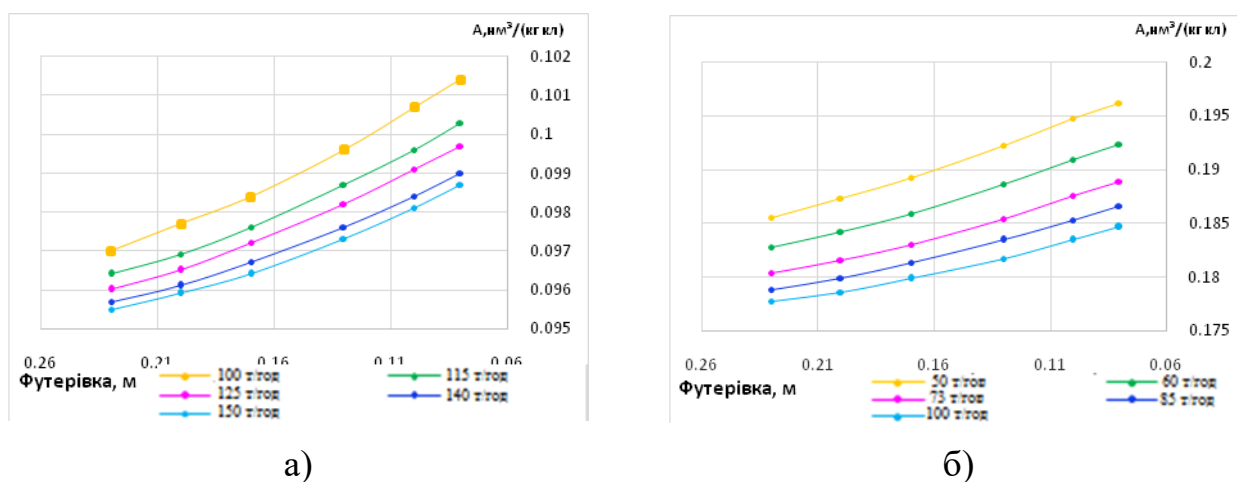
а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

Рисунок 2.33 – Питомі витрати палива при теплоізоляції

З рисунків видно, що при збільшенні продуктивності теплового агрегату

питомі витрати палива зменшуються. Як слідує з графіків динаміка зменшення втрат має нелінійну залежність і сповільнюється при збільшенні продуктивності печі. Пояснюється більш повним використанням палива за рахунок збільшення теплового опору вогнетривів особливо в процесі його зношення.

Питомі витрати палива теплових агрегатів в режимі підвищення продуктивності наведені на рисунку 2.34



а - сухий спосіб; б - мокрий спосіб

Рисунок 2.34 – Питомі витрати газів при збільшенні продуктивності

З приведених на рисунку графіків видно, що як і в режимі економного використання палива при збільшенні продуктивності питомі втрати тепла зменшуються. Однак в режимі збільшення продуктивності, при порівнянні зі зменшенням витрат, загальні витрати зменшуються приблизно на 1-2%. Даний ефект пояснюється більш ефективним використанням теплоти газового потоку. Важливо відмітити, що навіть такий показник дає можливість економити 300-500 nm^3 газу в годину. Тому на протязі року, враховуючи проміжні ремонти, це становить близько 120 тис m^3 .

2.4.3 Вплив теплоізоляції, встановленої в різних енергетичних зонах

Окреме питання, яке потребує свого рішення для печей «мокрого» способу є визначення впливу ділянки теплоізоляції встановленої в різних енергетичних зонах на теплову ефективність агрегату. Для цього отримані дані порівнюються з результатами для печі з стандартною футерівкою та футерівкою з підвищеною тепловою ізоляцією. Питома ефективність використання теплоізоляційного шару

відносно енергетичної зони визначається по залежності:

$$E^i = \frac{R_s^i - R_s}{L^i} \quad (2.59)$$

де R_s^i – витрати газу при установці теплоізоляції в i -й зоні;

R_s – витрати газу при стандартній конструкції футерівки печі;

L^i – довжина ділянки з теплоізоляцією.

Додаткова теплоізоляція моделюється ділянкою, довжина якої відповідає довжині енергетичної зони. При цьому витрати палива визначаються при незмінній, базовій продуктивності печі. Зменшення витрат палива E^i , відносно погонної довжини футерівки з додатковою теплоізоляцією та врахуванням ступеня її зношення наведені на рисунку 2.35. По осі абсцис вказана відносна довжина печі (масштабність на врахована).

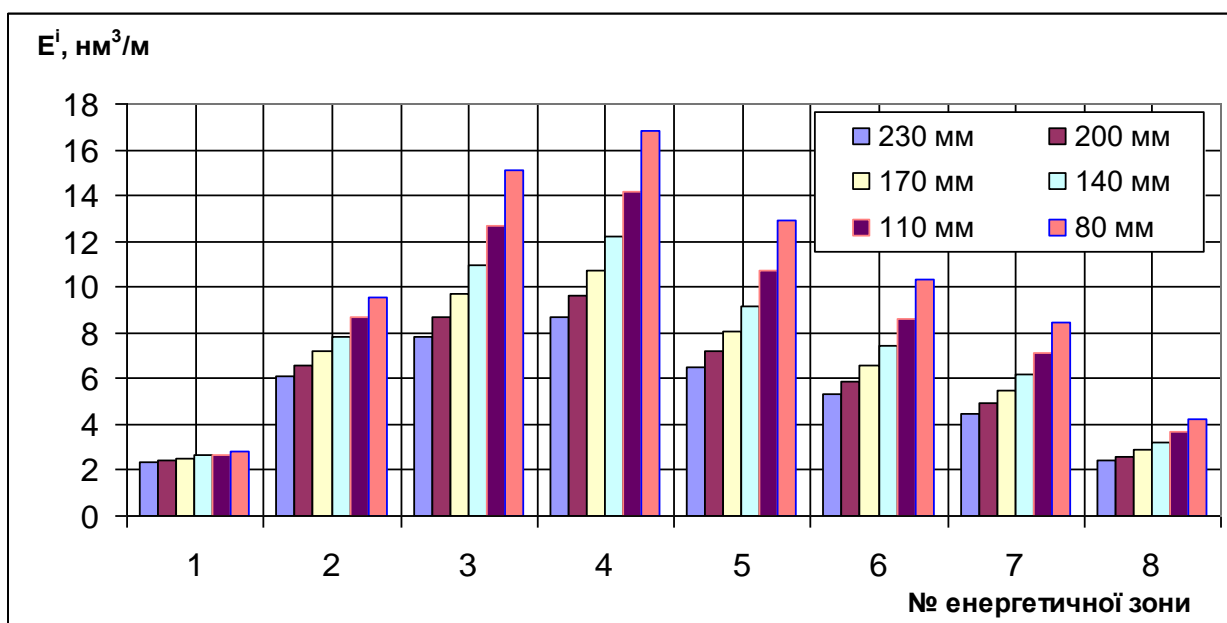


Рисунок 2.35 – Гістограми витрати палива на 1 м футерівки при її різних товщинах в енергетичних зонах печі

Розрахунок виконувався для товщини футерівки 230 мм, 200 мм, 170 мм, 140 мм, 110 мм, 80 мм. Як видно з графіка найбільший ефект дає встановлення додаткової теплоізоляції у п'ята та шоста високотемпературних зонах. Максимальне зменшення витрат палива відбувається в зонах декарбонізації 5 та екзотермічних реакцій зоні 6. Так при встановленні теплоізоляції в зоні

декарбонізації економія палива становить $7.85 \text{ нм}^3/\text{м}$ на 1 погонний метр укладеної футерівки, а при 80 мм вона підвищується до $16,8 \text{ нм}^3/\text{м}$. Вказане пов'язане насамперед зі зменшенням теплових втрат в навколишнє середовище за рахунок теплоізоляції корпусу та зменшення втрат тепла з газами, що відходять. Варто зауважити, що при зменшенні теплових втрат можливе збільшення продуктивності обертового агрегату.

На рисунку 2.36 показані зміна витрат палива при додатковій теплоізоляції в залежності від ступеню зношеності футерівки в різних енергетичних зонах.

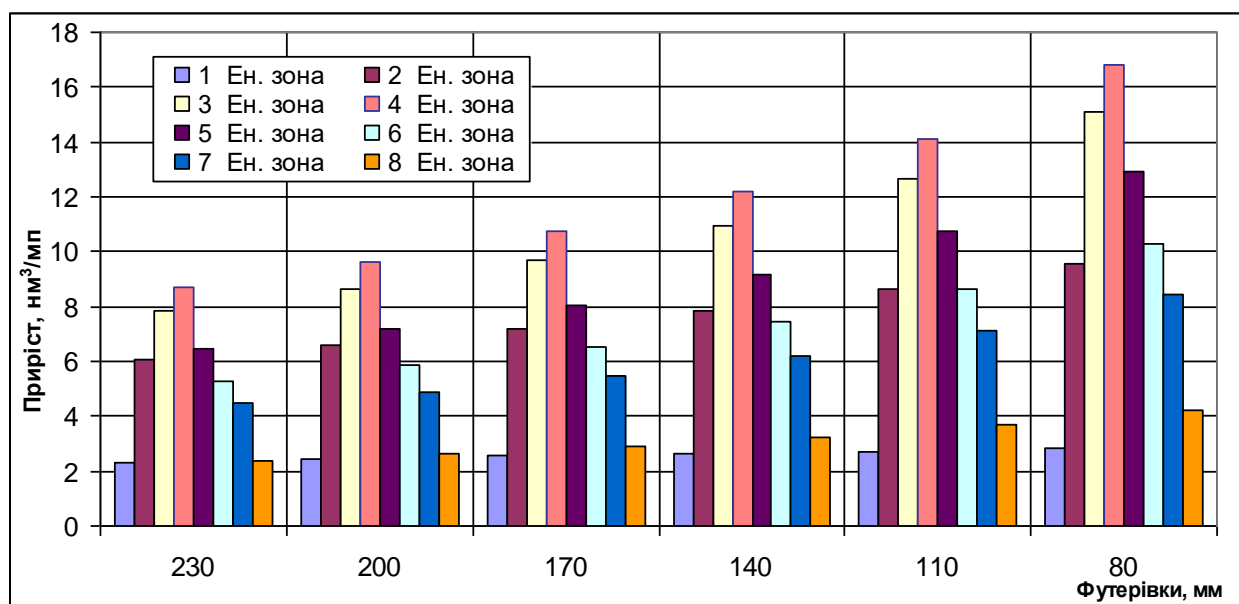


Рисунок 2.36 – Гістограми зміни витрати палива в енергетичних зонах печі при різних товщинах футерівки

З отриманих графіків видно, що ефективність додаткової теплової ізоляції збільшується при зменшенні товщини футерівки.

При встановленні теплоізоляції у високотемпературних зонах ефективність її використання становить приблизно 8.0 нм^3 на погонний метр при товщині 230 мм та 15.3 нм^3 при найбільшому зношенні футерівки до 80 мм.

При встановленні в низькотемпературних зонах ефективність її використання зменшується. Наприклад в восьмій зоні максимальне значення економії палива складає 2.4 нм^3 при товщині 230 мм та 4.2 нм^3 при зношенні футерівки до 80 мм. Низька енергоефективність низькотемпературних зон пояснюється низькою працездатністю, ексергією палива у вказаних зонах. Останнє пояснюється

підтриманням у високотемпературній зоні нормального теплового режиму, який вимагає збільшення витрат палива при зменшенні термоопору футерівки. За рахунок цього на виході з зони ентальпія газового потоку збільшується, проте додатково отримане тепло, у підготовчих зонах використовується не досить ефективно.

Найбільший ефект, відносно збільшення продуктивності, виникає при встановленні додаткової теплоізоляції в високотемпературних зонах. Так при незношеній футеровці і встановленні теплоізоляції в зоні максимальних температур (3,4, 5 зони), приріст продуктивності сягає 600 кг/год. А при зношеній футеровці він може сягати до 1300 кг/год. Це пов'язане насамперед зі зменшенням теплових втрат в навколишнє середовище і тим самим зменшенням витрат палива і витрат тепла на випал матеріалу. Як було вказано вище теплоізоляція більш ефективна при зменшенні висоти вогнетриву.

Температура газового потоку при моделюванні витрат палива і не суттєво впливає на температуру газів, що відходять з печі. Порівнюючи дані тільки по газам що відходять, отримані при розрахунку теплового балансу для 4 енергетичної зони можливо відзначити, що при футерівці 230 мм температура газів зменшується не суттєво, і змінюється від 268.3 °C до 266.3 °C. При цьому зменшення втрат теплоти складає 1503.8 МДж/год. Для футерівки товщиною 80 мм температура газів змінюється з 264,9 °C до 293,1 °C, що дає економію теплоти 2941.9 МДж/год. Суттєва економія теплової енергії з газами, що відходять, пов'язана з незначним зменшенням кількості газу та головним чином зі зменшенням кількості первинного та вторинного повітря кількість якого у даному випадку становить 11.02 м^3 .

Таким чином найбільш ефективною є встановлення теплоізоляції в 3, 4, 5 енергетичних зонах. Потрібно зазначити, що для обертових печей які працюють по «сухому» способу, тобто мають в пічному агрегаті 1–4 енергетичні зони, використання теплоізоляції буде ефективною при повній теплоізоляції всієї печі за винятком зони охолодження.

2.5 Висновки до розділу 2

Доповнена та реалізована більш повна математична модель для дослідження енергоємних високотемпературних теплових агрегатів з числовим визначенням таких факторів як температура газів, що відходять, та зміна товщини і теплового опору футерівки, що дає змогу визначити вплив додаткової теплоізоляції на продуктивність обертової печі. Вказана модель дозволяє проводити більш повні розрахунки та визначати теплову ефективність печі в комплексній постановці. Числовий аналіз дає можливість визначити вплив додаткової теплоізоляції на тепловий процес при роботі обертової печі.

1. Як показують розрахунки використання додаткової теплоізоляції футерівки дає можливість зменшити температуру газів, що виходять з теплового агрегату та збільшити кількість теплоти, що потрапляє в запічний теплообмінник. Загалом це сприяє зменшенню втрат теплоти та більш ефективному використанню теплоти газового потоку. Кількість тепла, що втрачається через корпус печі та з газовим потоком при встановленні футерівки з додатковою теплоізоляцією суттєво зменшується;
2. При дослідженні ефективності використання печі з додатковою теплоізоляцією було встановлено, що її застосування дає можливість зменшити витрати палива в середньому на 7.0 % в печах «сухого» способу виробництва клінкеру та 9.0 % при «мокрому», що дає можливість зменшити витрати газу на 3750 нм³/год та 2292 нм³/год. Також можливе збільшення продуктивності печі – на 8.0 %, або 10.03 т/год при «сухому» та на 10.0 % при «мокрому» – 7.34 т/год. Причому найбільша ефективність теплоізоляції спостерігається при максимальному зношенні футерівки. Також з отриманих даних можливо зробити висновок, що з точки зору енергозбереження обертової печі збільшенні продуктивності теплового агрегату є більш ефективним ніж економія палива;
3. Суттєвою перевагою засобу є те, що збільшення продуктивності печі не

вимагає підвищення температури горіння полум'я і збільшення ентальпії продуктів горіння. У зв'язку з цим актуальним є питання вибору такої конструкції футеровки, що при збереженні таких властивостей як товщина, вага на погонний метр печі, хімічний склад вогнетриву мала б більш високий термоопір;

4. Для вирішення цього питання необхідно дослідити весь комплекс умов, в яких знаходиться вогнетриви футерівки при роботі обертової печі, і врахувати ті фактори, які на нього впливають в процесі роботи. Тому наступний розділ буде присвячений вивченню теплових полів і температурних напружень, що виникають вогнетриві при роботі печі;

3 ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ РОБОТИ ФУТЕРІВКИ ПЕЧЕЙ

Обертові термічні агрегати (ротаційні печі) широко застосовуються в багатьох галузях промисловості і зазвичай використовуються для термічної обробки сипучих матеріалів [2,6,18,20,22]. Багато з цих пристроїв потребують спеціальних заходів для підвищення надійності, безпеки та довговічності. Особливо це стосується футерування печей, яке призначене для зменшення втрат тепла в навколишнє середовище, захисту металевого корпусу від абразивних матеріалів та ефективного використання теплоти в робочому просторі печі. Футерування і його сировина, вогнетрив, є ключовими елементами обертової печі, і їх надійність має значний вплив на продуктивність, безпеку і довгострокову надійну експлуатацію пічного обладнання.

Футерівка виконує захисні функції, зокрема знижує теплові втрати в зовнішнє середовище, а також бере активну участь в тепловій роботі печі. Так під час роботи футерівка нагрівається гарячими газами до високих температур і контактує з матеріалом, що оброблюється. Це дозволяє передавати теплоти матеріалу, прискорюючи процес теплообміну. Теплові втрати залежать від теплопровідності і товщини вогнетриву, з яких виконується футерівка. Також футерівка виконує функцію регенератора теплоти, сприймаючи теплоти від газового потоку та передаючи його матеріалу.

3.1 Вплив теплової ізоляції футеровки на теплообмін у високотемпературній зоні обертової печі

3.1.1 Математична модель дослідження теплообміну в футерівці

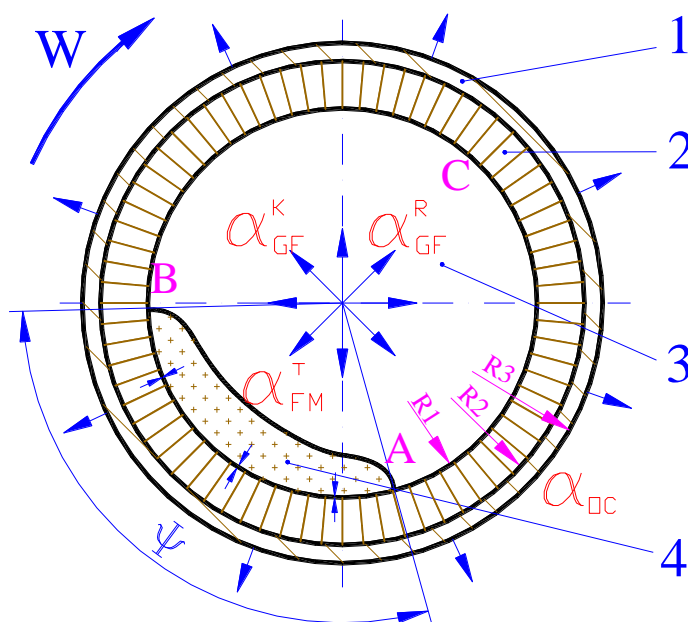
Питання про стан обертових печей і перспективах їхнього розвитку є на сьогоднішній день важливою науковою і виробничою задачею. Однак їх не можна ефективно вирішувати не розв'язуючи питання про стан футерівки і методів покращення її використання.

Для рішення цих питань ставиться задача визначення температурних умов, при яких працює вогнетрив у високотемпературній зоні обертової печі з врахуванням умов її обертання. Дослідження температурних ефектів і періодичності зміни температури в футерівках обертових печей з формованих вогнетривких матеріалів з метою зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище і підвищення експлуатаційної ефективності за рахунок підвищення термічного опору футерівки, з використанням математичних моделей, що дозволяють прогнозувати зміни і розподіл температури і теплового потоку в футерівці обертових печей, заповнених матеріалом. Використовуємо розрахунок температурного режиму у вогнетривах футерівки при обертанні печі та враховуючи заповнення сировинним матеріалом.

Футерівку обертової печі можна класифікувати як елемент з внутрішнім обігрівом, що є сполученим теплообміном, який вимагає спільного вирішення зовнішніх і внутрішніх проблем, що підлягають визначенню температури. Крім того, під час обертання печі відбувається досить складний процес теплообміну, особливо всередині, де теплообмін відбувається одночасно шляхом випромінювання і конвекції від газу до футерівки і матеріалу, а також шляхом теплопровідності між шаром сипучого матеріалу і футерівкою.

Після виходу печі на квазістаціонарний режим зміна температури внутрішньої поверхні футерівки в часі має циклічний характер. У перший період вогнетрив футерування контактує з газовим потоком і поступово нагрівається, отримуючи теплоту від газового потоку шляхом випромінювання і конвекції. У другому випадку вогнетрив знаходиться в контакті з матеріалом, що нагрівається. В цей час температура поверхні вогнетривкового матеріалу знижується. Коливання температури, що досягають на внутрішній поверхні вогнетривів футерівки, при вході і виході їх з-під шару матеріалу може досягати $100\text{ }^{\circ}\text{C} - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2,18,89,92], в залежності від швидкості обертання, кількості матеріалу, розташування енергетичної зони печі та інших факторів.

На рисунку 3.1 показана схема перерізу печі з умовними позначеннями, що використовуються для моделювання теплообміну.



1 – металевий корпус печі; 2 – вогнетриви футерівки; 3 – газований потік; 4 – матеріал;

Рисунок 3.1 – Передача теплоти в обертовій печі

Визначення температур футерівки вирішується відповідно умовам теплообміну між сировинним матеріалом, теплоносієм і футерівкою у робочому просторі печі та теплообміном металевому корпусу з оточуючим середовищем. Сировинний матеріал покриває футерівку від впливу газового потоку на дузі АВ, що відповідає куту заповнення Ψ . Точки А та В є ключовими точками теплообміну, температура в яких на діючих печах зазвичай контролюється з допомогою пірометрів, особливо у високотемпературних зонах. В точці А матеріал потрапляє на футерівку, в точці В футерівка виходить з під матеріалу. Відкрита поверхня знаходиться на дузі АСВ. В подальших розрахунках точки А, В та С використовуються як контрольні для порівняння результатів розрахунку. Початок відліку знаходиться в центрі печі на перетині осей симетрії. Процес теплообміну розглядається до тих пір, доки піч не виходить на квазістаціонарний тепловий режим.

При вирішенні вказаної задачі використовується відоме диференціальне рівняння в частинних похідних для нестационарної теплопровідності в

циліндричній системі координат у двовимірній постановці [68]. Осьова теплопровідність уздовж печі, не враховується, оскільки довжина обертової печі значно перевищує діаметр. Рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) \quad (3.1)$$

де

T – температура, °С;

a – коефіцієнт теплопровідності, м²/с;

τ – час, с;

φ – кут відносно центру печі;

r – радіальна координата.

Граничні умови для рішення рівняння (3.1), задаються виходячи наступних припущень:

- контакт між футерівкою і матеріалом визначається кутом Ψ , величина якого залежить від кількості матеріалу та кута природного укосу сипкого матеріалу в динамічному стані;

- теплофізичні властивості вогнетриву, теплоізоляційного матеріалу та металевго корпусу густина, теплоємність, теплопровідність, ступінь чорноти) є постійними в даному перетині печі і не залежать від температури, але вони можуть змінюватись відповідно до довжини енергетичних зон та печі в цілому;

- температура газового потоку (T_G) приймається постійною по перетину;
- температура матеріалу, що оброблюється T_M приймається сталою по перетину (без підігріву), в зв'язку з його постійним оновленням за рахунок надходження із сусідніх енергетичних зон;

- в зоні замикання кільця футерівки по кутовому напрямку діють наступні умови

$$T|_{\varphi=0} = T|_{\varphi=2\pi}; \quad \frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0} = \frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=2\pi} \quad (3.2)$$

- в місці контакту металевго корпусу та футерівки використовуються граничні умови 4 роду:

$$T_F|_{r=R_2} = T_{K1}|_{r=R_2}; \lambda_F \frac{\partial T_F}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \lambda_K \frac{\partial T_{K1}}{\partial r} \Big|_{r=R_2} \quad (3.3)$$

де

λ_F, λ_K – коефіцієнт теплопровідності футерівки та внутрішньої металевої оболонки корпусу;

T_F, T_{K1} – температура поверхні футерівки та корпусу;

• на зовнішній поверхні металевого корпусу ($r=R_3$) граничні умови записується у вигляді:

$$-\lambda_K \frac{\partial T_{KZ}}{\partial r} = \alpha_{ef} (T_{KZ} - T_{OC}) \quad (3.4)$$

де

T_{KZ} – температура зовнішньої поверхні корпусу;

T_{OC} – температура навколишнього середовища;

$\alpha_{ef} = 3.5 + 0.062 \cdot T_K$ – ефективний коефіцієнт тепловіддачі від корпусу печі та навколишнім середовищем, що враховує конвективну складову та складову випромінювання [68].

• густина теплового потоку на поверхні футерівки, Вт/м², відповідно закону Фур'є, визначається з виразу:

$$q = -\lambda_F \frac{\partial T_{FV}}{\partial n} \quad (3.5)$$

де

T_{FV} – температура внутрішньої поверхні футерівки;

n – нормаль.

Коефіцієнт тепловіддачі від газового потоку до внутрішньої поверхні футерівки, не покритої матеріалом, Вт/(м²·К), визначають за формулою:

$$\alpha_{GF}^{KR} = \alpha_{GF}^K + \alpha_{GF}^R \quad (3.6)$$

де

$\alpha_{GF}^K, \alpha_{GF}^R$ – складові теплообміну: конвективна та випромінювання.

Складову випромінювання коефіцієнта тепловіддачі від газу до футерівки, при умові $T_G > T_F$ знаходять з наступного виразу [2,68]

$$\alpha_{GF}^R = \frac{5.68\varepsilon_F}{T_G - T_F} \left[\varepsilon'_G \left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - \varepsilon''_G \left(\frac{T_F}{100} \right)^4 \right] \quad (3.7)$$

де

T_G и T_F – температура газу та футерівки;

ε_F – ступінь чорноти футерівки при $T=T_F$;

ε_G , ε_G – ступінь чорноти газу при $T= T_G$.

Ступінь чорноти газового потоку при середній температурі газу:

$$\varepsilon'_2 = (\varepsilon_{CO_2} + \beta\varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon) + \varepsilon_T - (\varepsilon_{CO_2} + \beta\varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon)\varepsilon_T. \quad (3.8)$$

де

$\Delta\varepsilon$ – поправка на взаємне перекриття полос;

ε_T – ступінь чорноти пилу в потоці;

ε_{CO_2} , $\beta\varepsilon_{H_2O}$ – коефіцієнт випромінювання CO_2 і H_2O при середній температурі газів з урахуванням поправки на парціальний тиск H_2O .

Ступінь чорноти твердих пилу в газовому потоці:

$$\varepsilon_T = 1 - e^{-\frac{\gamma^* \tau^* T_G}{0.75 \cdot 273 \cdot \mu^* S}} \quad (3.9)$$

де

μ – концентрація твердих частинок в газах;

γ – густина частинок пилу в потоці;

$S=0.9D$ – довжина шляху, що проходить енергія випромінювання.

Ступінь чорноти газового потоку при середній температурі футерівки:

$$\varepsilon''_2 = (\varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}) + \varepsilon_T - (\varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}) \cdot \varepsilon_T \quad (3.10)$$

Конвективну складову коефіцієнта тепловіддачі від газу до футерівки знаходять з наступного виразу [68]

$$\alpha_{GF}^K = \frac{Nu \cdot \lambda_G}{D_p} = \frac{0.418 \cdot Re^{0.67} \cdot \lambda_G}{D_p} = \frac{0.418 \cdot \lambda_G}{D_p} \left(\frac{\omega_G D_p}{\nu_G} \right)^{0.67} \quad (3.11)$$

де

ω_G – швидкість газового потоку у вільному перерізі печі;

D_P – внутрішній діаметр печі;

V_G, λ_G – в'язкість та теплопровідність газів.

Швидкість газів у вільному перерізі, м/с:

$$\omega_G = \frac{V_G B_M}{D_P^2 (1 - F_M / F_P)} \frac{T_G}{273} \quad (3.12)$$

де

F_M, F_P – площа поверхні матеріалу та печі в перерізі;

V_G – кількість газів на кг клінкера;

B_M – продуктивність.

В'язкість та теплопровідність газів у вільному перерізі печі:

$$\nu_G(t) = V_G \left(\frac{V_{CO_2}}{\nu_{CO_2}} + \frac{V_{O_2}}{\nu_{O_2}} + \frac{V_{N_2}}{\nu_{N_2}} + \frac{V_{H_2O}}{\nu_{H_2O}} \right)^{-1} \quad (3.13)$$

$$\lambda_G(t) = \frac{V_{CO_2} \lambda_{CO_2} + V_{O_2} \lambda_{O_2} + V_{N_2} \lambda_{N_2} + V_{H_2O} \lambda_{H_2O}}{V_G} \quad (3.14)$$

Математична модель руху матеріалу вимагає окремого пояснення. Матеріал моделюється зміною значення коефіцієнту тепловіддачі до внутрішньої поверхні футерівки в місці його розташування:

$$-\lambda_F \frac{\partial T_{FV}}{\partial r} = \alpha_{FM} (T_{FV} - T_M) \quad (3.15)$$

де

T_{FV} – температура внутрішньої поверхні футерівки;

T_M – температура матеріалу;

α_{FM} – коефіцієнт тепловіддачі між футерівкою та матеріалом.

Коефіцієнт тепловіддачі між футерівкою та матеріалом визначається з залежності [2, 68, 93]

$$\alpha_{FM}^T = \sqrt{60n\lambda_F C_F \gamma_F} \cdot I \cdot (L_{DF} + L_{DM}) \frac{T_G - T_M}{T_F - T_M} \quad (3.16)$$

де

λ_F, C_F, γ_F – теплопровідність, теплоємність та щільність вогнетривів футерівки;

n – число обертів печі в хвилину;

I – конструктивний параметр (для печі $D=4.0 - 4.5$ м, $I=0.135$);

L_{DF}, L_{DM} – довжина вільної дуги футерівки та матеріалу.

При розрахунках враховується переміщення матеріалу вздовж внутрішньої поверхні футерівки. Зміна положення залежить від швидкості обертання та кількості матеріалу. Зміщення на кут $\Delta\varphi$ відбувається після визначення по ітераціям сумарного проміжку часу, за який відбувається вказане переміщення.

При визначенні інтенсивності теплового потоку в зоні точки А, приведеної на Рисунок 3.1, зазначимо, що досліджуючи рух сипкого матеріалу в обертових апаратах на фізичних моделях [29–27] можливо спостерігати, що матеріал в цій точці не повністю прилягає до футерівки, а «перекочується» залишаючи шпарини, які дозволяють футерівці одночасно контактувати з газовим потоком та частинками матеріалу. Тому для визначення тепловіддачі на інтервалі 0.1, від довжини дуги АВ, використовується коефіцієнт тепловіддачі який отримують апроксимуючи значення α_{GF}^R та α_{FM}^T . Тобто від зони відкритої футерівки до зони повного заповнення матеріалом.

Початкові умови, при $\tau = 0$, задаються температурою по товщині вогнетривів футерівки та корпусу, визначені з рішення стаціонарного рівняння теплопровідності, яка описує теплопередачу з граничними умовами приведеними вище без врахування матеріалу, тобто:

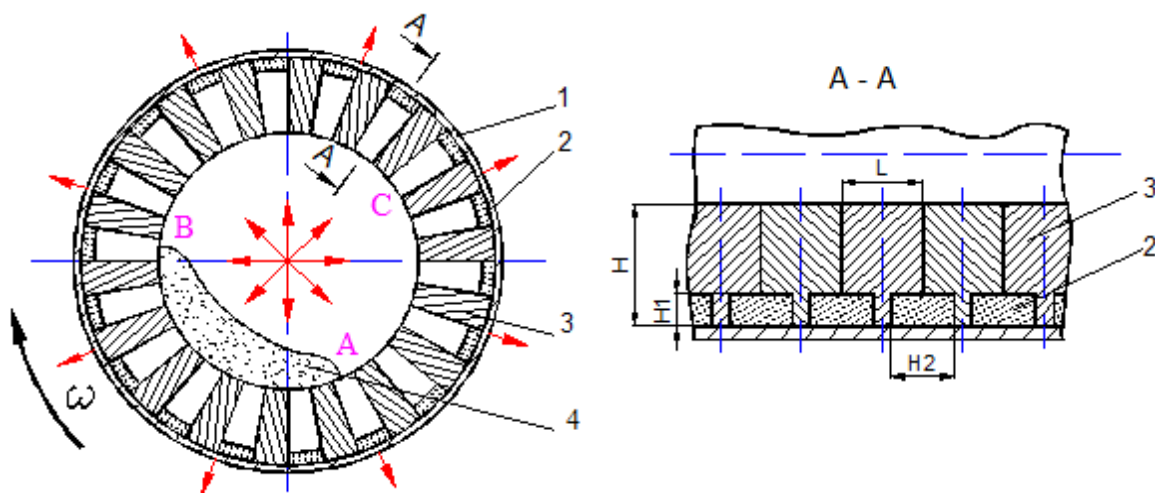
$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (3.17)$$

Найбільш дієвим вирішенням питання підвищення енергоефективності обертових печей є збільшення теплового опору футерівки. Збільшення опору досягається за рахунок зміни форми вогнетриву – створення відповідних комірок і введення в них додаткового волокнистого теплоізоляційного матеріалу [26]. Вказане технічне рішення має ряд переваг – зменшення втрат тепла через корпус, збільшення

передачі тепла матеріалу, зменшення в цілому маси футерівки та печі. Максимального зменшення теплових втрат можливо досягти при встановленні фасонних вогнетривів у найбільш високотемпературних зонах печі.

Для дослідження еволюції та зміни температур в футерівці обертової печі, виконаної з фасонних вогнетривів, доповнимо математичну модель розглянуту вище, коміркою волокнистим теплоізоляційним матеріалом.

На рисунку 3.2 приведений переріз печі, виконаний у високотемпературній зоні та вказані умовні позначення для моделювання теплообміну.



1 – металевий корпус печі; 2 – комірка з теплоізоляцією;

3 – вогнетриви футерівки; 4 – матеріал;

H – висота вогнетриву; H1 – висота комірки; H2 – ширина комірки;

L – ширина вогнетриву.

Рисунок 3.2 – Схема теплообміну при футерівці з фасонними вогнетривами

Граничні умови, при наявності комірки з теплоізоляцією, доповнюються наступними рівняннями:

- на ділянці контакту теплоізоляційного матеріалу та металевого корпусу:

$$T_{TZ}|_{H1=0} = T_K|_{r=R2}; \lambda_{TZ} \frac{\partial T_{TZ}}{\partial r} \Big|_{H1=0} = \lambda_K \frac{\partial T_K}{\partial r} \Big|_{r=R2} \quad (3.18)$$

де

λ_{TZ}, λ_k – теплопровідність теплоізоляційного матеріалу та металевої оболонки корпусу, Вт/(м·К);

T_{TZ}, T_K – температура поверхні теплоізоляційного матеріалу та корпусу, К;

- на ділянці контакту футерівки та теплоізоляційного матеріалу:

$$T_F|_{r=H1,H2} = T_{IZ}|_{r=H1,H2}; \lambda_F \frac{\partial T_F}{\partial r} \bigg|_{r=H1,H2} = \lambda_{IZ} \frac{\partial T_{IZ}}{\partial r} \bigg|_{r=H1,H2} \quad (3.19)$$

де

λ_F – коефіцієнт теплопровідності футерівки, Вт/кг·К;

T_F – температура поверхні футерівки, Вт/кг·К;

На основі викладених методів розроблений пакет програм, призначений для визначення температур та величини теплового потоку в футерівці обертової печі.

Розрахунок рівнянь виконувався ітераційним методом скінчених різниць з застосуванням явної схеми. В програмних модулях виконаних та алгоритмічній мові програмування C++ реалізовані числові моделі, а програми для візуалізації і виведення графічної інформації виконані на функціональній мові AutoLisp в середовищі AutoCAD. При порівнянні результатів розрахунків з фактичними й дослідними даними [2,18, 27,29,30,33], отримані результати не дають суттєвих відхилень, які виходять за межі допустимих при практичному застосуванні.

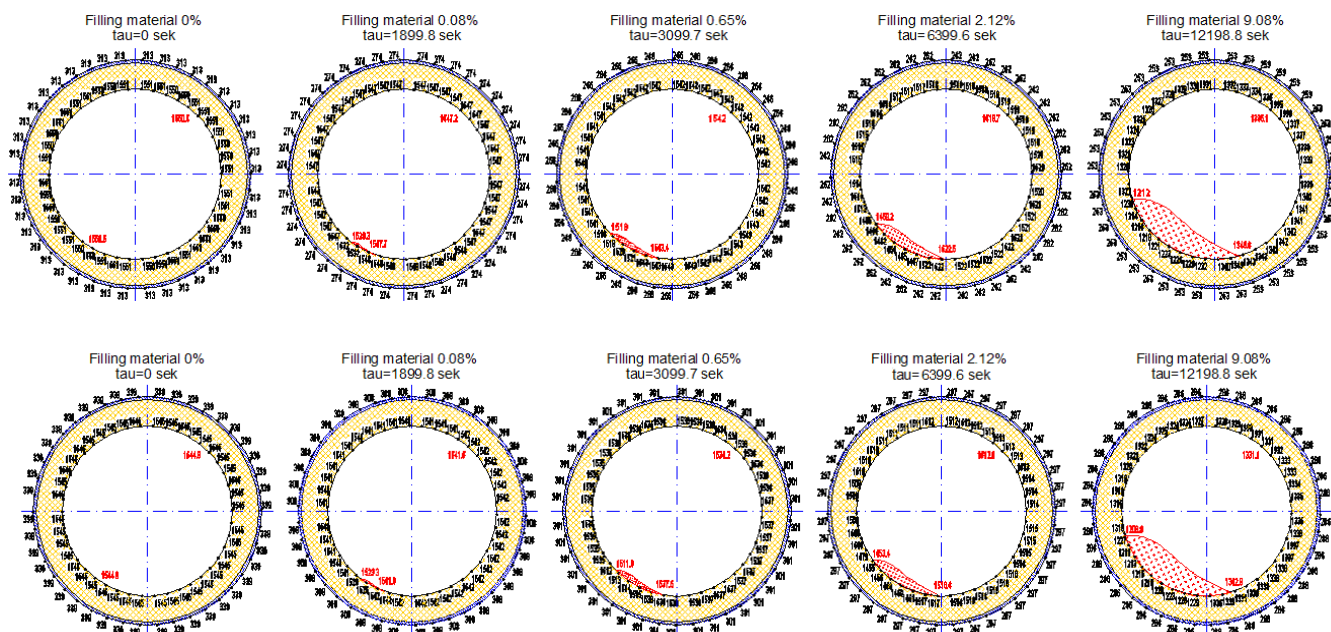
3.1.2 Моделювання процесу заповнення печі матеріалом

Теплообмін у обертових печах має свою специфіку, а саме нестационарний процес теплової роботи футерівки. При кожному оберті печі футерівка спочатку сприймає тепло від газового потоку, а потім передає його матеріалу, виконуючи функцію регенератора теплоти. Температура футерівки змінюється під час цього процесу: спочатку підвищується, а потім зменшується. У більшості енергетичних зон середня температура футерівки нижча середньої температури газу, але вища за середню температуру матеріалу. Таким чином футерівка передає отримане тепло від факела до

матеріалу виконуючи функцію регенератора теплоти. Передача теплоти здійснюється за рахунок випромінювання та теплопровідності. Крім цього потрібно враховувати втрати теплоти в навколишнє середовище випромінюванням та конвекцією.

При моделюванні процесу заповнення печі матеріалом розглядався пічний агрегат Криворізького цементного заводу з обертовою піччю 4,5х80м. Температура газового потоку становить $T_G=1650\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура оброблюваного матеріалу $T_M=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає зоні декарбонізації. Швидкість обертання печі становить 3.5 об/хв. Комірка з теплоізоляцією (див. рис. 3.2) має наступні розміри – висота комірки $H_1=40\text{ мм}$, ширина $H_2=90\text{ мм}$. Для футерівки використовується шамотний вогнетрив ШБ-5 з теплофізичними характеристиками $\lambda_F=1.26\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, $c_F=1.09\text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$, $\rho_F=1090\text{ кг/м}^3$ [119]. Ширина шамотного вогнетриву $L=150\text{ мм}$. При роботі печі вогнетрив зношується. В якості теплоізоляційного матеріалу використовувалась мулітокремнеземна вата МКРР-130 з наступними теплофізичними характеристиками: $\lambda_{IZ}=0.18\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, $c_{IZ}=1.047\text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$, $\rho_{IZ}=130\text{ кг/м}^3$. Металевий корпус печі являє собою сталеву оболонку з товщиною 0.03 м. Ступінь заповнення матеріалом становить 0–9,0 %, що враховуючи сипкість матеріалу та інші фактори відповідає куту $\Psi=72^{\circ}$ (див. рис. 3.1). При розрахунках використовувалась сітка, що включає 836 вузлів вздовж кола та 180 вузлів відносно загальної товщини корпусу.

Подача матеріалу відбувається на протязі 10 годин до 9.0 % заповнення печі, при стандартній роботі теплового агрегату. Інтенсивність заповнення виконувалась з кроком 0.01 %. Вибіркові результати розрахунку температури корпусу для базової конструкції футерівки та футерівки з теплоізоляцією, відносно часу заповнення наведені на рисунку 3.3.



а) – час 0 хв; б) – час 30 хв; в) – час 52 хв; г) – час 106 хв; з) – час 204 хв;

Рисунок 3.3 – Температура футерівки та корпусу

На рисунку 3.4 приведені значення температур та теплового потоку корпусу печі впродовж часу завантаження теплового агрегату.

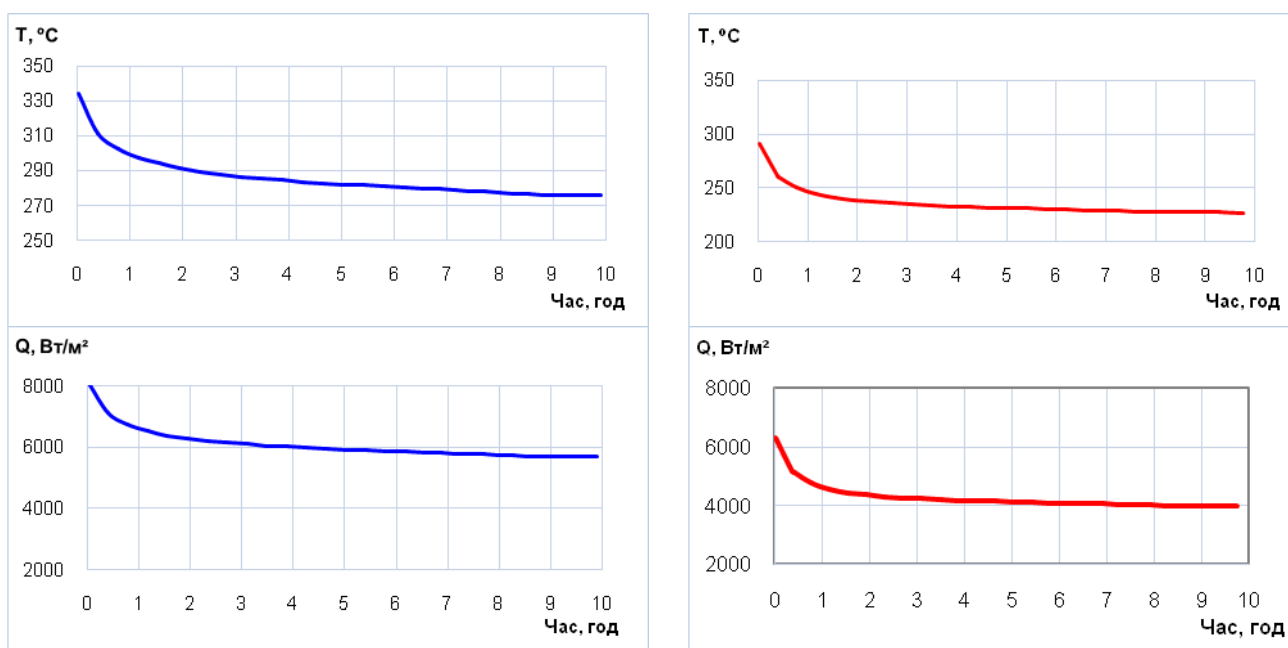


Рисунок 3.4 – Температура та густини теплового потоку від корпусу в зовнішнє середовище

З графіків температури видно, що температура корпусу (див. рис. 3.4а) та тепловий потік рисунку 3.4б в навколишнє середовище зменшується. Дане явище пояснюється тим, що частина теплоти передається матеріалу. Причому

чим більше сировинного матеріалу оброблюється, тим меншою буде температура корпусу печі. З графіків також видно, що після виходу печі на стандартний рівень завантаження, температура корпусу стабілізується і теплообмін переходить в квазістаціонарний режим. При базовій конструкції футерівки середні втрати теплоти в зовнішнє середовище складають 6078 Вт/м². За наявності теплоізоляції – 4585 Вт/м². Тобто зменшення теплових втрат в режимі завантаження становить 24.6 %.

Теплообмін в печі характеризується за температурою в контрольних точках А та В. На рисунку 3.5 приведені значення зміни температури у вказаних точках в процесі завантаження печі та відмінність цих температур рисунку 3.5б.

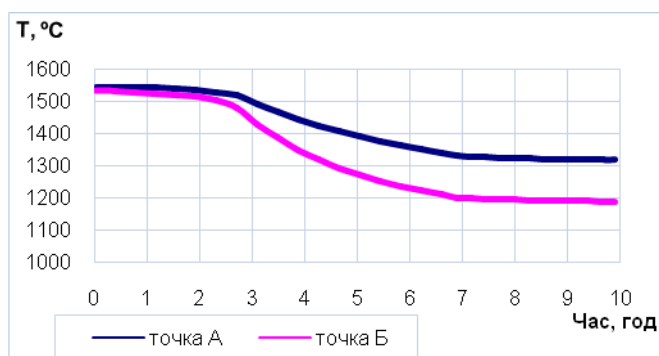


Рисунок 3.5а– Зміна температур в точках А та Б.

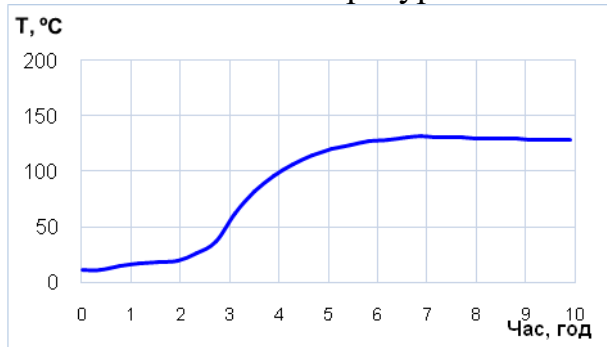


Рисунок 3.6б – Різниця температур між точках А та Б.

Як видно з приведених графіків по мірі завантаження різниця температур збільшується за рахунок поглинання тепла матеріалом. Причому наявність теплоізоляції не суттєво впливає на загальний тепловий режим в зоні обробки матеріала. Наявність теплоізоляції не суттєво впливає на температурне поле всередині печі в режимі завантаження, тому дані

розрахунку не приведені. Більш детально розглянемо цей вплив при зміні товщини футерівки в наступному підрозділі.

Дані по значенням температур в контрольних точках А та В та значення теплового потоку для різного числа обертів наочно показують, яким чином піч виходить на квазістаціонарний режим, тобто виникає стаціонарне поле температур, де температурний градієнт в даній точці не змінюється з часом. Аналіз даних температурних полів та теплового потоку показує, що вихід на режим, включаючи період завантаження становить 6-8 годин.

Розглянемо зміну температури та теплових потоків в футерівці та корпусі печі після завантаження матеріалом більш детально.

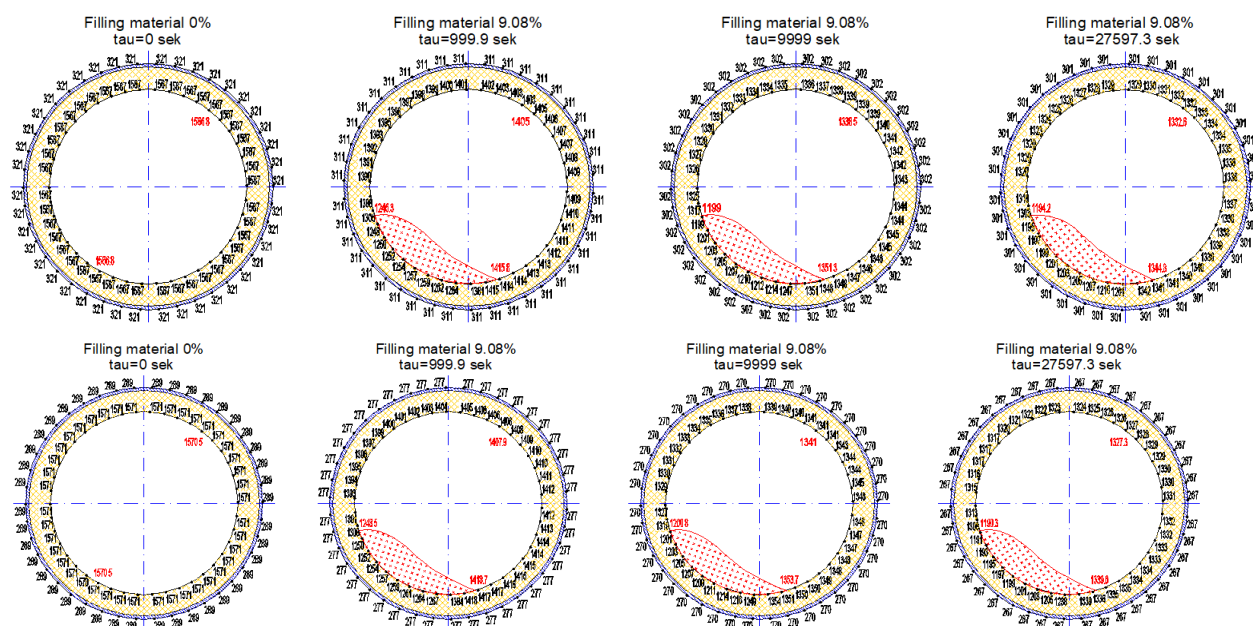
3.1.3 Теплообмін та процес регенерації теплоти з врахуванням стирання

Футерівка, разом з захисною функцією, бере участь у тепловій роботі печі і зменшує втрати тепла в навколишнє середовище. Під час роботи футерівка нагрівається гарячими газами вище температури оброблюваного матеріалу, і за один оберт печі вся поверхня футерівки контактує з шаром матеріалу. Таким чином, футерівка є теплообмінником-регенератором, передаючи частину тепла матеріалу шляхом випромінювання і теплопровідності [22,23,42]. Також при обертанні печі матеріал безперервно переміщується і тепло, що передається, сприймається більшою поверхнею, ніж у випадку нерухомого шару. При цьому футерівка піддається агресивним впливам, до яких входять постійне стирання нагрітим матеріалом, хімічна та термічний вплив при кожному оберті печі.

Розглянемо зміну температур футерівки безпосередньо в робочій зоні печі. Використовуємо похідні дані наведені в попередньому розділі. В подальшому, для врахування фактору стирання вогнетривів нагрітим матеріалом розглядається футерівка товщиною $H=230, 190, 150, 110, 80$ мм.

На рисунку 3.7 наведені результати розрахунку температури внутрішньої поверхні футерівки та металевому корпусу печі впродовж виходу

теплового агрегату на стаціонарний режим роботи. Порівнюються температури для базової футерівки та футерівки з теплоізоляційною коміркою.

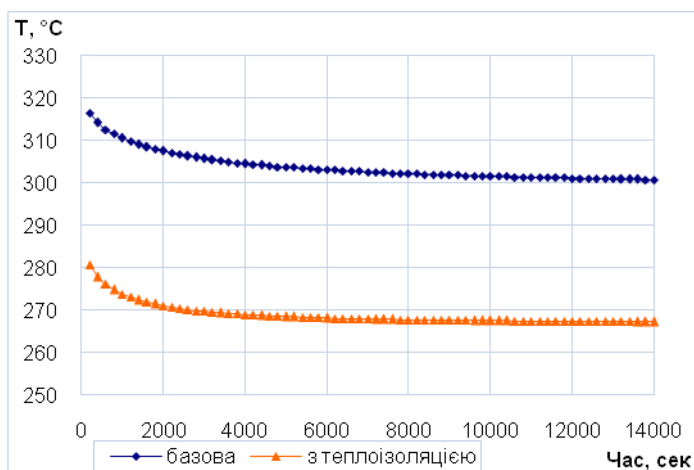


а) – термін роботи 0 хв; б) – термін роботи 166 хв; в) – термін роботи 400 хв; г) – термін роботи 460 хв;

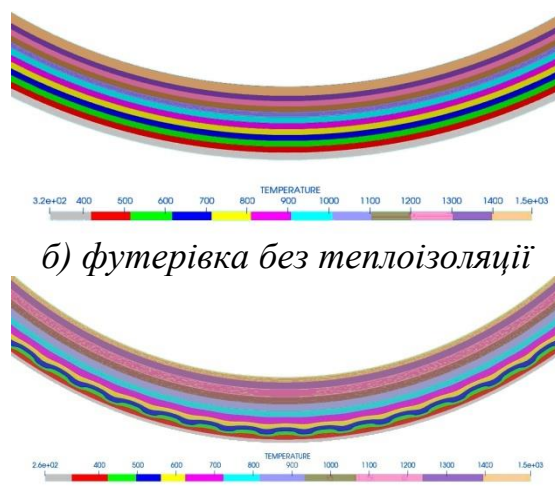
Рисунок 3.7 – Зміна температури футерівки впродовж часу

З наведених даних видно, що відповідно початковим умовам внутрішня поверхня футерівки прогрівається без матеріалу, отримуючи теплоти від газового потоку. При цьому температура футерівки становить $T_{\text{ф}}=1567^{\circ}\text{C}$, зовнішнього корпусу $T_{\text{кр}}=321^{\circ}\text{C}$. Для теплоізольованої футерівки $T_{\text{ф}}=1571^{\circ}\text{C}$ корпусу $T_{\text{кр}}=289^{\circ}\text{C}$ відповідно. Після потрапляння матеріалу відбуваються зміни теплових полів і температура футерівки та корпусу печі зменшується за рахунок передачі частини тепла матеріалу. За деякий термін часу, при якому відбувається перехід на квазістаціонарний режим, температура внутрішнього шару футерівки зменшується до $T_{\text{ф}}=1194.2-1344.8^{\circ}\text{C}$, корпусу $T_{\text{кр}}=301^{\circ}\text{C}$, для футерівки з теплоізоляцією $T_{\text{ф}}=1190.3-1339.6^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{кр}}=267^{\circ}\text{C}$.

На рисунку 3.8а зображена еволюційна зміна температури зовнішнього металевого корпусу та поле температур після виходу на квазістаціонарний режим в звичайній – рисунку 3.8б і теплоізольованій футерівці рисунку 3.8в.



а) зміна температури корпусу печі



в) футерівка з теплоізоляцією

Рисунок 3.8 – Розподіл температур в стінці корпусу (сітка спрощена)

З отриманих результатів розрахунку можливо зробити висновок, що перехід на квазістаціонарний режим відбувається приблизно через 2.5-3.0 годин роботи, що відповідає експериментальним дослідженням, при обертанні 3.5 об/хв та кількості матеріалу, що становить 9% від живого простору печі.

В наступних розрахунках будемо аналізувати дані, отримані після виходу печі на квазістаціонарний режим роботи.

Загальний характер розподілу температур в стінці обертової печі з базовими вогнетривами приведено на рисунку 3.9.

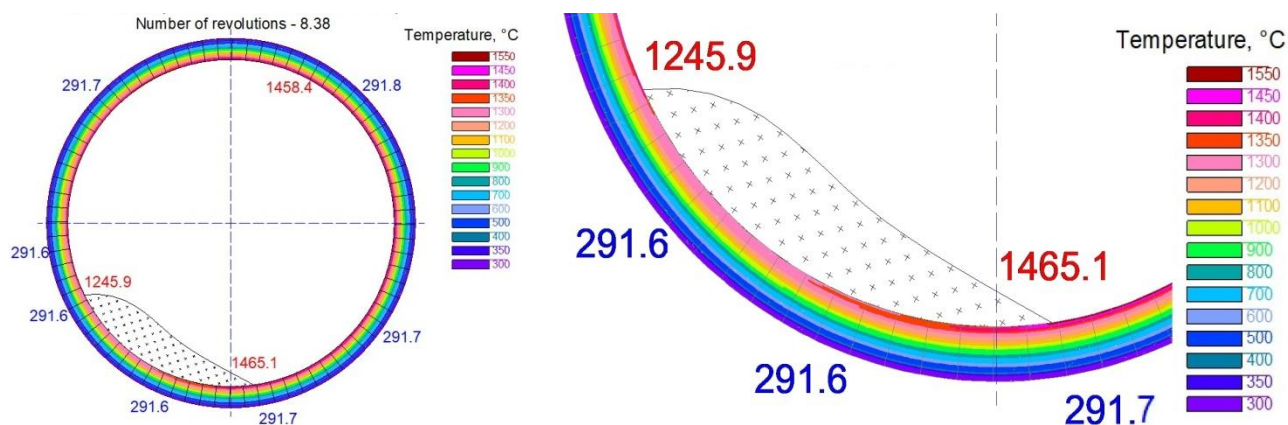


Рисунок 3.9 – Розподіл температур в стінці корпусу (сітка спрощена)

Наведені дані показують, що внутрішня поверхня футерівки отримує тепло від газового потоку і нагрівається. З рисунку 3.9а видно, що температура на внутрішній поверхні футерівки вища, і зменшується у напрямку до зовнішньої поверхні корпусу. На ділянці футерівка-матеріал частина тепла від футерівки потрапляє в

матеріал який має меншу температуру. Тому температура на поверхні футерівки зменшується, а на початку контакту знову починає прогріватись, що відображено на рисунку 3.9б. Тобто футерівка виконує роль регенератора теплоти. Шар футерівки, який знаходиться на певній відстані від поверхні не так інтенсивно реагує на наявність матеріалу, і деякий час частково зберігає попередню температуру.

Відносно **вибору теплоізоляційного матеріалу** в комірці з теплоізоляцією потрібно вказати наступне. Відсутність міцного термостійкого матеріалу з ефективними теплоізоляційними властивостями значною мірою визначало напрям робіт зі створення футерівки з підвищеним тепловим опором шляхом уведення в неї додаткового волокнистого теплоізоляційного матеріалу, що досягається за рахунок зміни форми вогнетриву. Застосування додаткового теплоізоляційного шару накладає на теплоізоляційний матеріал ряд вимог. Він повинен поєднувати високу термостійкість, низьку теплопровідність, здатність компенсувати напруження від термічного розширення кладки. Всім цим вимогам відповідають муліткремнеземисті волокнисті матеріали [73-77], які випускаються промисловістю, що дозволяє застосовувати їх у конструкціях теплових агрегатів

На рисунку 3.10 приведені ізолінії полів температур для вогнетривів різного ступеня механічного стирання H , визначені по границі контакту вогнетрив – теплоізоляція. На рисунку 3.11 вказані значення максимальної температури.

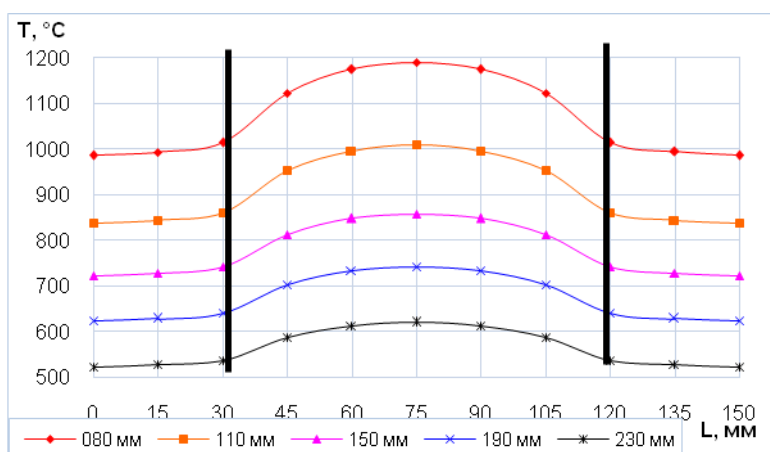


Рисунок 3.10 – Розподіл температури в комірці з різним ступенем зношення

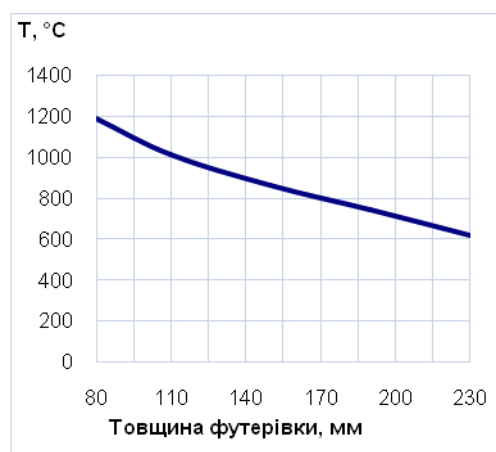


Рисунок 3.11 – Зміна температури в залежності від висоти вогнетриву

Відповідно геометрії футерівки (див. рис. 3.2) вогнетрив має розмір $L=150$ мм. Комірка з теплоізоляцією $H_2=90$ мм, $H_1=40$ мм. З рисунку 3.10 видно, що на ділянці з

теплоізоляцією температура, за рахунок теплового опору футерівки підвищується та має максимальне значення в центрі комірки. У вогнетриві значення температури зменшується. Максимальні температури, в залежності від висоти вогнетриву (див.рис. 3.11) змінюються від 619.3 °С на початку кампанії печі до 1190.6 °С в кінці кампанії. Для вибору ефективного теплоізоляційного матеріалу потрібно враховувати, що базальтове волокно має температуру експлуатації близько $T_E=700$ °С, супертонке базальтове волокно – $T_E=900$ °С, мулітокремнеземна вата МКРР-130 – $T_E=1100-1200$ °С, мулітокремнеземну вату з неорганічними добавками можливо використовувати при температурі до $T_E=1600$ °С. В даному випадку можливе використання теплоізоляції МКРР-130. Слід зазначити, що в енергетичних зонах з меншою температурою більш доцільно, виходячи з економічних показників, застосовувати інший волокнистий теплоізоляційний матеріал, наприклад базальтове волокно.

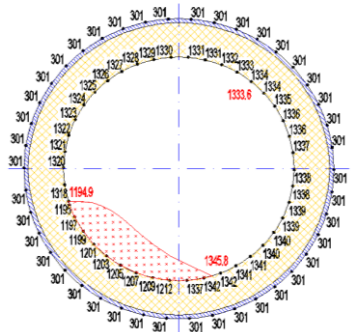
Характер розподілу температур в робочій зоні обертової печі, при наявності оброблюваного матеріалу, приведено на рисунку 3.12. Для порівняння теплового режиму показані результати розрахунку температур в футерівці базової печі та печі футерівка якої виконана фасонним вогнетривом з теплоізоляцією. Вздовж осі ординат приведена температура °С, вздовж вісі абсцис кут в градусах відносно центру печі.

З приведених даних видно, що в процесі обертання печі, ділянка футерівки яка виходить з-під шару матеріалу (точка В на рисунку 3.1) починає контактувати з газовим потоком, що призводить до послідовного підвищення температури. В момент виходу температура футерівки зростає досить інтенсивно, після чого приріст температури сповільнюється. Потрапляючи в точку А температура її поверхні зменшується, що свідчить про те, що вона передає частину свого тепла матеріалу, що обробляється. Амплітуда температурних коливань становить 116 – 160 °С, в залежності від ступеня зношення футерівки. Найбільші, за значенням коливання, знаходяться на зовнішній поверхні футерівки, що показано на графіках. Вказане явище пояснює сутність процесу рекуперації теплоти футерівкою де футерівка відіграє ключову роль. Вагомою частиною регенераційного процесу є передача нагрітого тепла з футерівки сировинному матеріалу збільшуючи його температуру і загалом зменшуючи споживання палива забезпечуючи

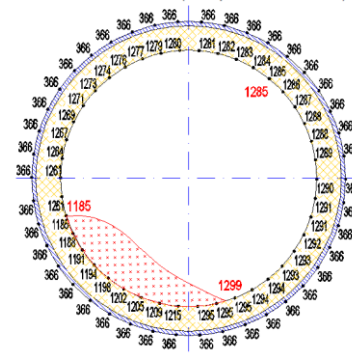
більш рівномірний і ефективний процес випалювання, зберігаючи його енергетичну ефективність.

Температура поверхні

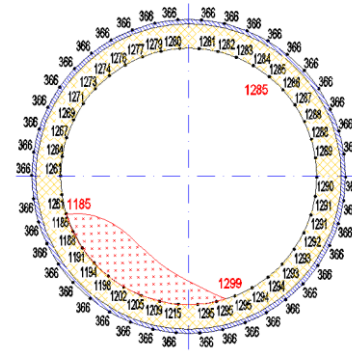
Заповнення 9.08% (0.25 д.к.)
 $\tau = 14000.1$ сек (обертів - 3999.36)



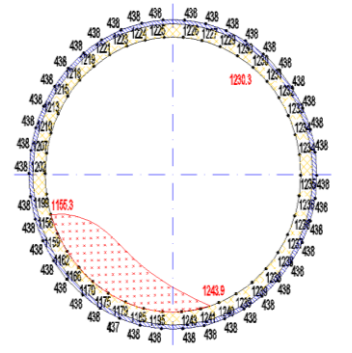
Заповнення 9.08% (0.25 д.к.)
 $\tau = 14000.1$ сек (обертів - 3999.36)



Заповнення 9.08% (0.25 д.к.)
 $\tau = 14000.1$ сек (обертів - 3999.36)



Заповнення 9.08% (0.25 д.к.)
 $\tau = 14000.1$ сек (обертів - 3999.36)



Температура в робочій зоні

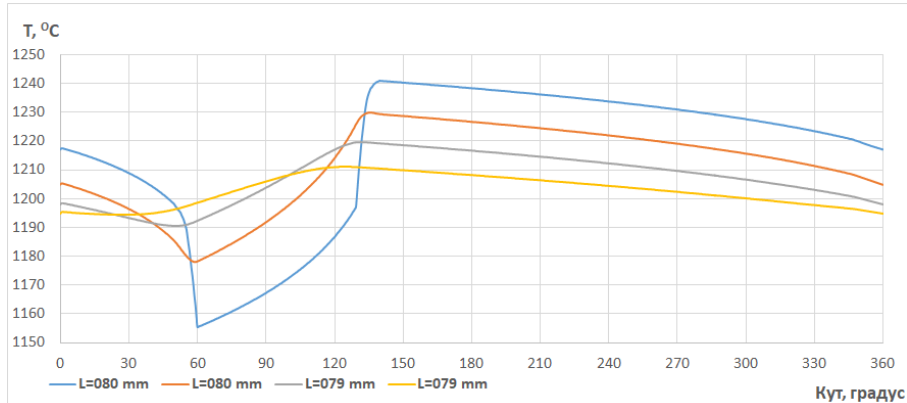
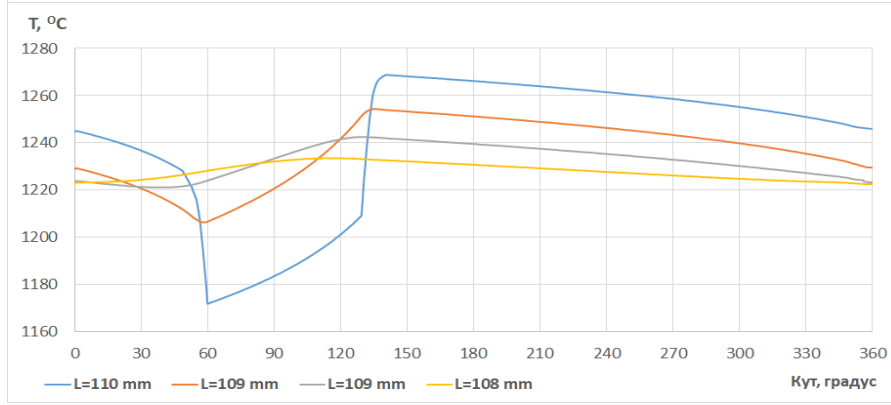
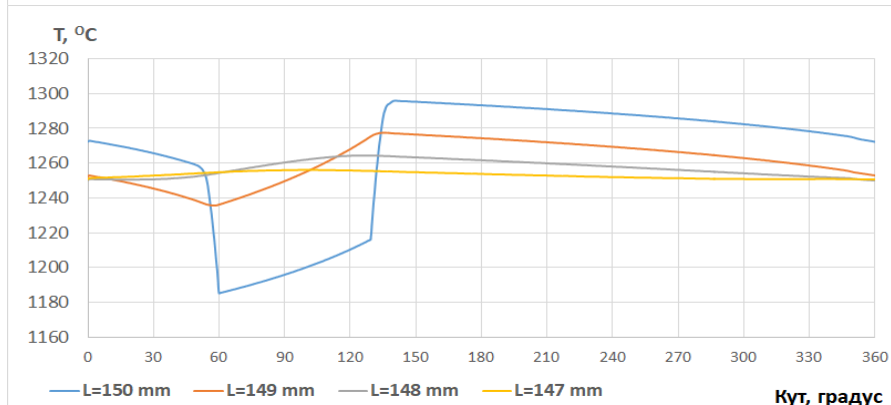
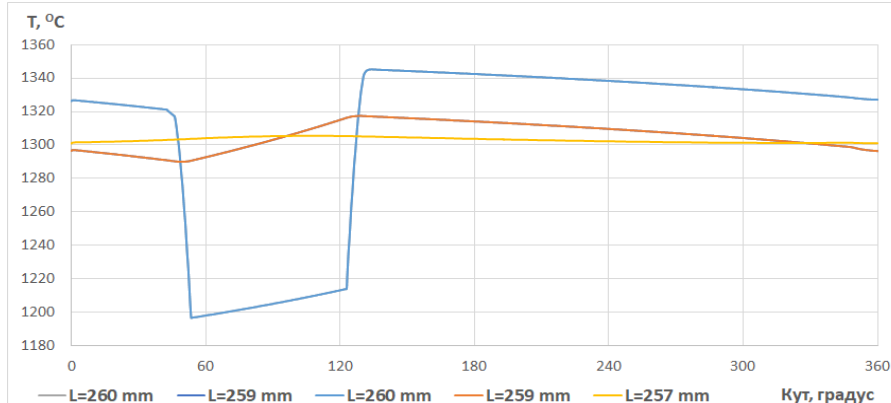
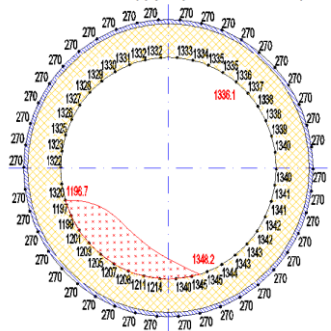


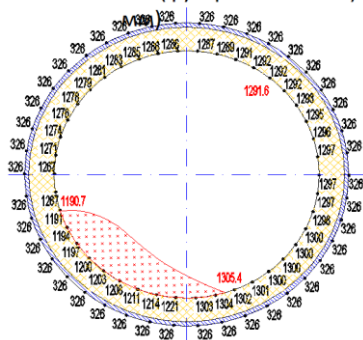
Рисунок 3.11а – Розподіл температур обертової печі з базовою футерівкою.

Температура поверхні

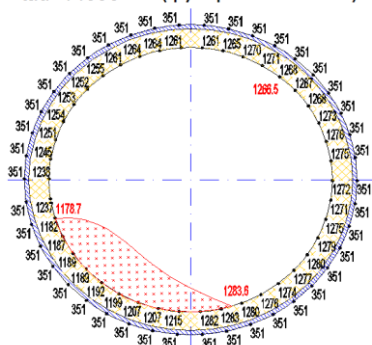
Заповнення 9.08% (0.25 д.к.)
 $\tau=14000$ сек (футерівка 260 мм)



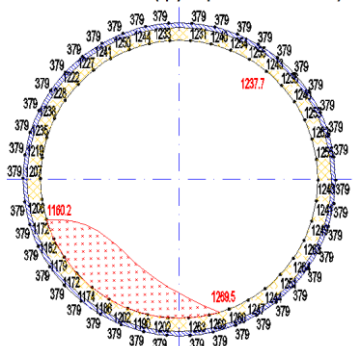
Заповнення 9.08% (0.25 д.к.)
 $\tau=14000$ сек (футерівка 150 мм)



Заповнення 9.08% (0.25 д.к.)
 $\tau=14000$ сек (футерівка 110 мм)



Заповнення 9.08% (0.25 д.к.)
 $\tau=14000$ сек (футерівка 080 мм)



Температура в робочій зоні

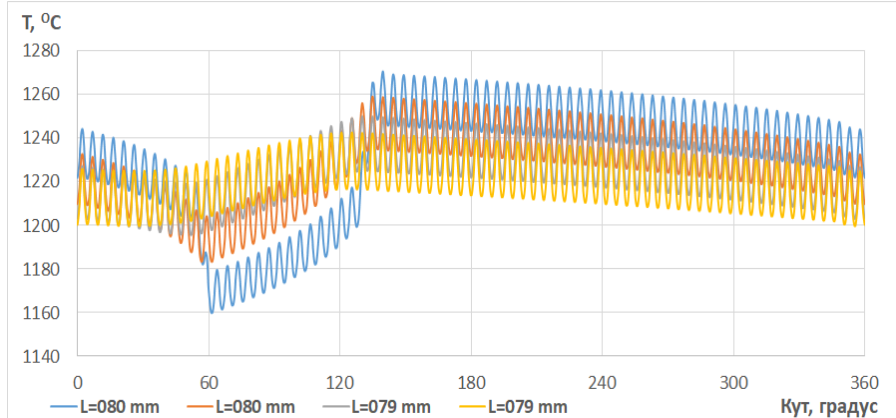
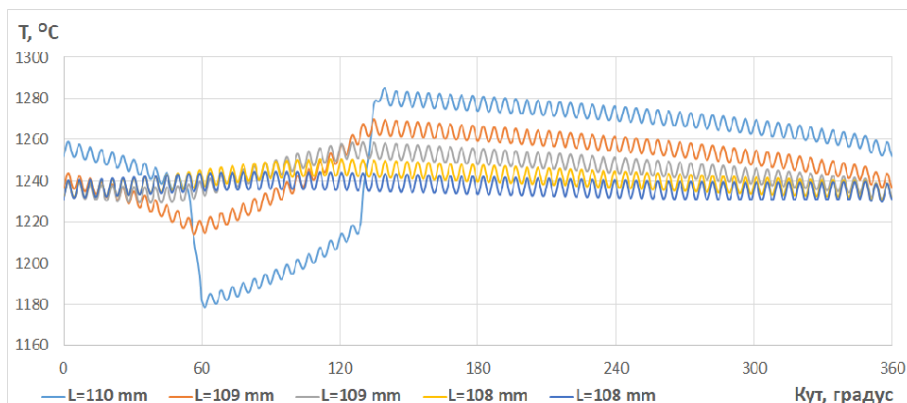
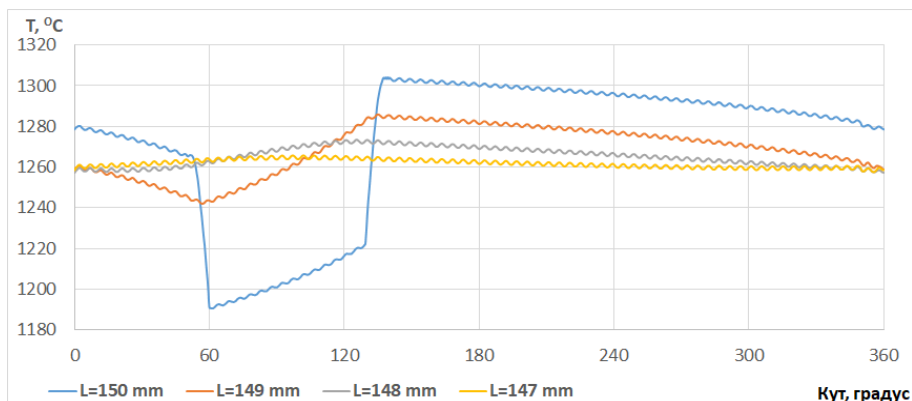
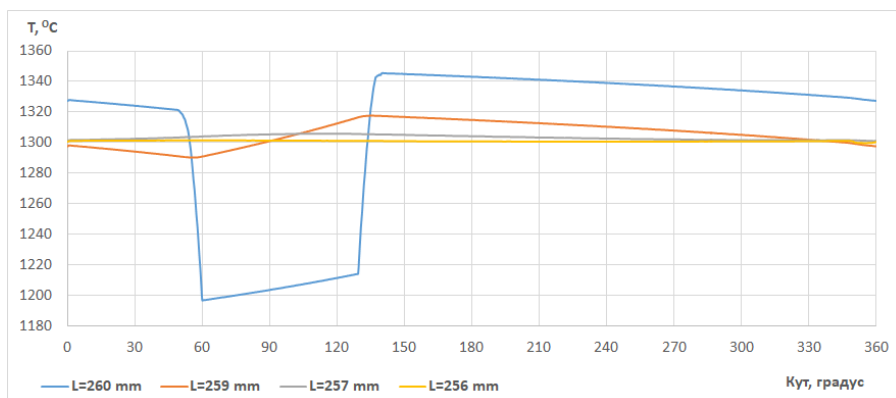


Рисунок 3.12 б - Розподіл температур обертової печі з додатковою теплоізоляцією

Значення інтенсивності теплового потоку, приведені на рисунку 3.12, дозволяє характеризувати вплив технологічних параметрів роботи агрегату на температурний та тепловий режим футерівки та обертової печі в цілому та може слугувати характеристикою режиму експлуатації та терміну роботи футерівки і продовжувати термін служби.

Глибина шару проникнення змінної температури в футерівку визначається як відношення, на якому амплітуда коливань температури становить 0.01 від амплітуди коливання на поверхні. Можливо визначити, що в цьому випадку зміна температури відбувається на глибині до 70 мм, при загальній товщині футерівки 230 мм. Шари футерівки, що знаходяться глибше, мають суттєво менші коливання температури.

З даних, приведених на рисунку 3.12 видно, що у футерівці з вогнетривом з комірками теплоізоляції виникають **температурні пульсації**. При зменшенні товщини футерівки величина пульсацій збільшується і вони набувають осцилюючий характер, істотно впливаючи на інтенсифікацію тепло- та масообмінних процесів [121,122]. У розглянутому випадку, при значній кількості пульсацій, коли матеріал постійно зазнає зміни температури, цей процес може стати значущим. Максимальна амплітуда температурних пульсацій на поверхні футерівки при $H=80$ мм, становить 23 °С.

Складові клінкеру – вапно, крейда та мергель містять велику кількість карбонату кальцію (CaCO_3), який має достатню твердість та тенденцію змінювати свій об'єм при зміні температури. Тому пульсації призводять до появи температурних напружень, що в свою чергу сприяє утворенню мікротріщин, деформацій або руйнування матеріалу в результаті термального циклу. Поява мікротріщин та руйнування частинок матеріалу приводить до збільшення питомої поверхні контакту з реагентами, чим пришвидчує протікання хімічних реакцій шляхом розширення можливостей хімічних взаємодій. Таким чином, швидкість хімічних реакцій збільшується, оскільки зростання питомої поверхні забезпечує збільшення кількості активних центрів для молекулярних взаємодій.

Також температурні пульсації впливають на зміну взаємодій між компонентами суміші, що приводить до зміни стабільності дисперсії або розпаду суміші, стимулюючи рух часток речовини активуючи переміщення та зіткнення часток.

Крім того температурні пульсації впливають на фізичні властивості сировинного матеріалу, такі як міцність, пористість, гранулометричний склад тощо, що загалом покращує якість та характеристики отриманого клінкеру.

Однак більш детальний аналіз питання ефективності процесу теплових пульсацій виходить за рамки даної роботи.

Використання теплоізоляції викликає зміни в значеннях теплових потоків в робочому просторі печі. На рисунку 3.13 приведені значення зміни теплового потоку до відкритої поверхні футерівки, на рисунку 3.14 з поверні футерівки до матеріалу, що підлягає обробленню. Для порівняння показані дані для стандартної футерівки та футерівки з теплоізоляцією.

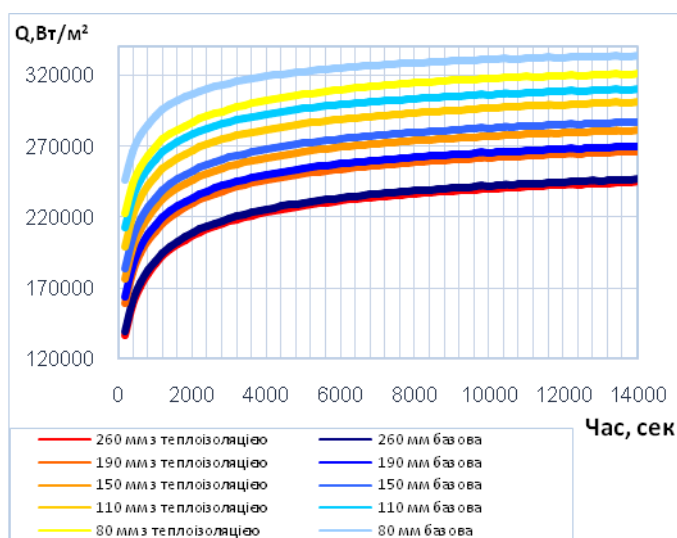


Рисунок 3.13 – Теплообмін з відкритою поверхньою футерівки

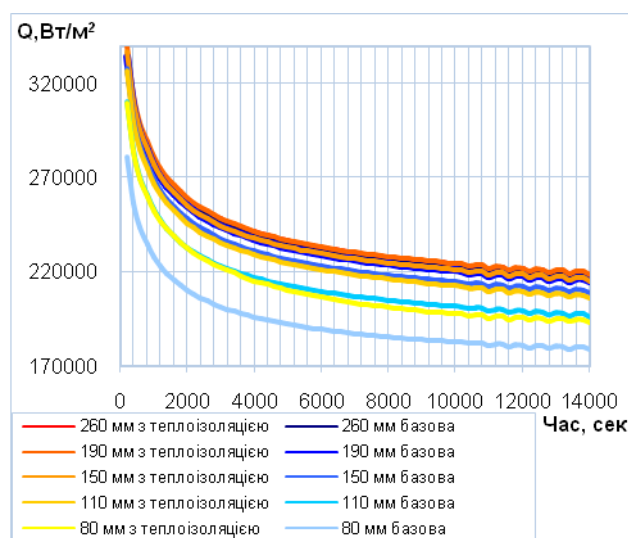
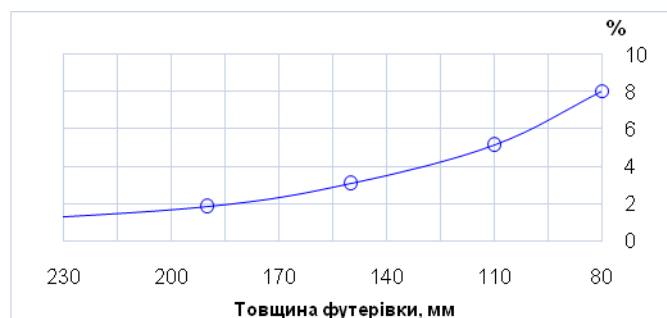
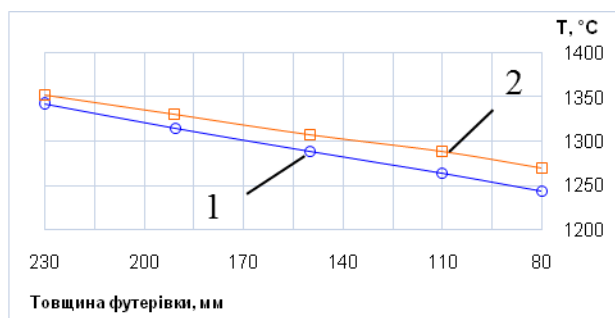


Рисунок 3.14 – Теплообмін футерівки з матеріалом

З графіків видно, що наявність теплоізоляції зменшує тепловий потік до відкритої поверхні футерівки. При цьому тепловий потік до матеріалу збільшується, особливо в процесі зношення футерівки. Дане явище пояснюється збільшенням теплового опору футерівки особливо при зменшенні товщини вогнетриву.

Значення температур в контрольній точці А футерівки печі показані на рисунку 3.15.



1-базова; 2 - з теплоізоляцією.

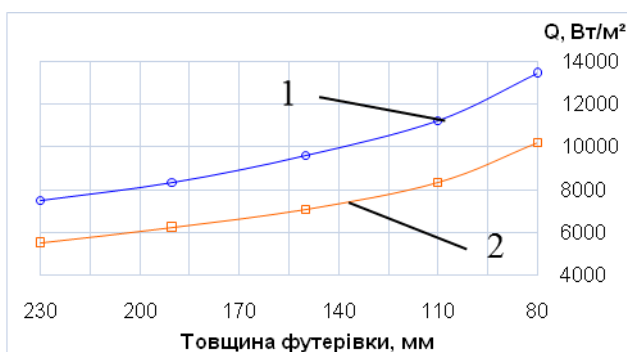
теплоізоляцією

Рисунок 3.15 – Зміна температура т.А при різних футерівках

Рисунок 3.16 – Ефективність теплопередачі до матеріалу

У вказаній позиції відбувається повний прогрів футерівки за час оберту і сировинний матеріал покриває футерівку та починається теплообмін між вогнетривами і матеріалом. По мірі механічного стирання футерівки температура в т.А зменшується в зв'язку із загальним зменшенням теплового опору. З графіка видно, що температура в точці А має більші значення при наявності футерівки з теплоізоляцією. Різниця температур становить від 14 до 26 °C в залежності від міри стирання футерівки. За рахунок цього, при використанні футерівки з теплоізоляцією, тепловий потік до матеріалу зростає на 1.5-8%, що показано на рисунку 3.16. Таким чином додаткова теплоізоляція дає можливість не тільки зменшити втрати теплоти в навколишнє середовище через корпус печі але і інтенсифікувати процес передачі тепла матеріалу за рахунок створення відповідного температурного поля в робочому об'ємі печі шляхом збільшення теплового потоку з напрямку нагрітої кладки до матеріалу на ділянці контакту [120]. Крім того, завдяки радіаційному теплообміну, збільшується тепловий потік до відкритої поверхні матеріалу від більш нагрітої футерівки.

Втрати теплоти через корпус печі в зовнішнє середовище представлено на рисунку 3.17.



1-базова; 2 - з теплоізоляцією.

Рисунок 3.17 – Зміна теплового потоку від корпусу в зовнішнє середовище при зношенні футерівки

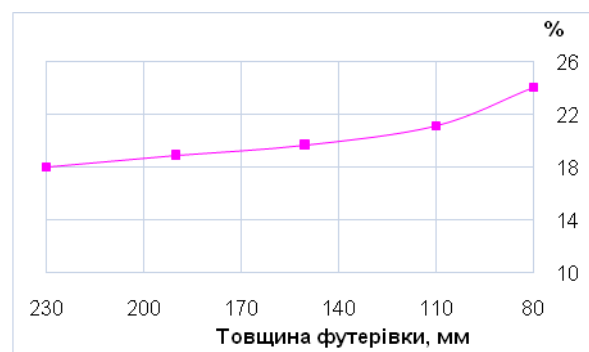


Рисунок 3.18 – Ефективність застосування футерівки з додатковою теплоізоляцією

З графіків видно, що теплові втрати від корпусу печі суттєво збільшуються у міру зношування вогнетриву. Так при товщині футерівки 230 мм (початок кампанії печі) вона становить 7500 Вт/м², після зношування до 80 мм (кінець кампанії) підвищується до 13410 Вт/м². Встановлення футерівки з фасонним вогнетривом сприяє зменшенню теплових втрат до 5457 Вт/м² та 10183 Вт/м² відповідно.

Ефективність застосування вогнетривів з додатковою теплоізоляцією, відносно зменшення теплових втрат в навколишнє середовище показана на рисунку 3.18. Зіставлення проводилося для базової футерівки зі стандартною конструкцією вогнетриву. Отримані значення наочно показують, що використання вогнетривів з теплоізоляцією у високотемпературній зоні зменшує теплові витрати в зовнішнє середовище на 18–24%.

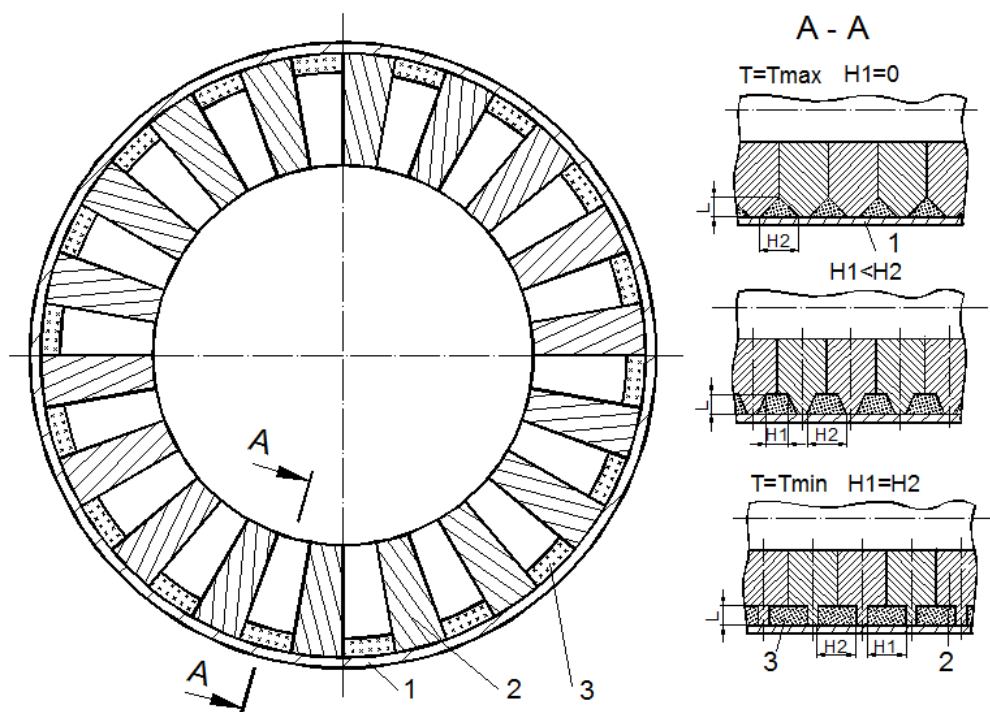
Розглянемо можливу конструкцію вогнетриву, що має комірку з теплоізоляцією, для визначення найбільш ефективної форми з точки зору зменшення теплових витрат.

3.2 Теплова ефективність футерівки з фасонним вогнетривом

3.2.1 Постановка задачі

У використовуваних обертових печах втрати теплоти через корпус в навколишнє середовище досягають 20-25% від загальної підведеної теплоти при спалюванні

палива. Одним з основних факторів, що визначають теплову ефективність оберткових печей, є термічний опір футерівки. Відсутність міцного термостійкого матеріалу з хорошими теплоізоляційними властивостями значною мірою визначала напрям робіт по створення футерівки з підвищеним тепловим опором шляхом введення у неї додаткового волокнистого теплоізоляційного матеріалу, що досягається за рахунок зміни форми вогнетриву [65,73]. Такою теплоізоляцією може бути мулітокремнеземна вата з неорганічними добавками, яку можна використовувати при температурі до 1600°C . В цьому випадку між вогнетривом і корпусом печі утворюється комірка, заповнена теплоізоляційним матеріалом, чим також забезпечується більша передача теплоти оброблюваному матеріалу й зменшення маси теплового апарата. Комірки мають форму трапеції та заповнюються теплоізоляційним матеріалом. При цьому величина верхньої основи трапеції збільшується по довжині печі в напрямку зниження температури. Для цього у вогнетривкій цеглі, зі сторони корпусу, виконують комірки, які мають форму трапеції та заповнюються теплоізоляційним матеріалом. Форма комірок наведена на Рисунок 3.19 відносно довжини печі.



1 - корпус печі; 2 - вогнетрив; 3 - комірка з додатковою теплоізоляцією;

L - висота комірки; $H1$ - ширина верхньої основи комірки ($0 \dots H2$ мм);

$H2$ - ширина нижньої основи комірки.

Рисунок 3.19 – Розташування комірок з теплоізоляцією в футерівці печі

На рисунку 3.18 наведена футерівка з вогнетривкої цегли вогнетривка цегла, що опирається на корпус за допомогою ніжки утвореної за рахунок комірок. При механічних і теплових навантаженнях, які виникають під час роботи, наведена форма дає можливість, краще зберегти механічну стійкість вогнетривкої цегли забезпечуючи високу теплову ефективність.

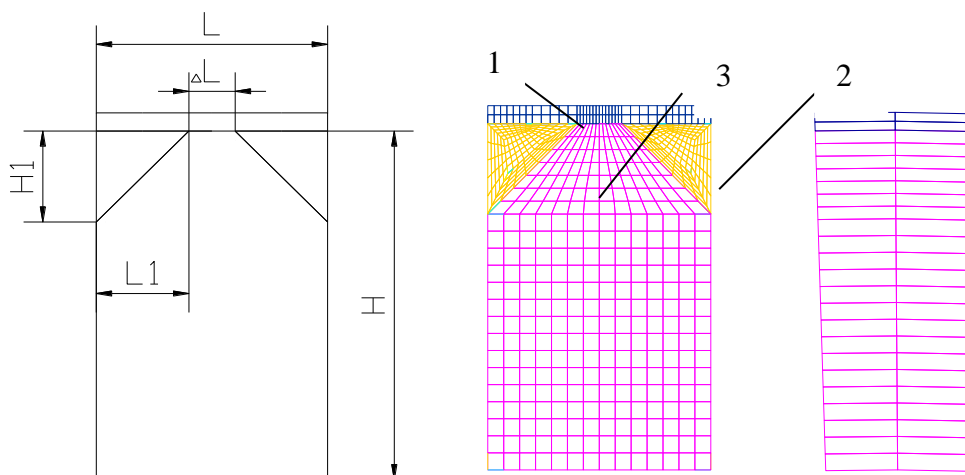
У ніжці вогнетриву з комірками, за рахунок збільшення градієнта температур збільшуються температурні навантаження. Тому довжина верхньої основи трапеції H_1 змінюється по довжині печі для виключення можливостей виникнення критичних температурних навантажень. У зоні максимальних температур футерівки вона мінімальна й при цьому $H_1=0$, а комірка набуває трикутну форму. В інших зонах, при зменшенні температур по довжині печі, комірка збільшується і в кінці печі, де температура газового потоку зазвичай найбільш низька, приймає прямокутну форму $H_1=H_2$. У цьому випадку тепла ефективність футерівки збільшується, а підвищення термічних навантажень не є критичним і не призводить до руйнування вогнетриву.

Для рішення задачі використовувалась інтегрована система VESNA, розроблена на кафедрі ХПСМ КПІ імені Ігоря Сікорського [70,80]. Система призначена для моделювання гідродинамічних, теплових процесів і розрахунків на міцність та дослідження методом скінчених елементів замінити слово, тому що вище таке є в реченні лінійного і нелінійного деформування просторових комбінованих систем.

Досліджувалась футерівка обертової пічі 4,5х80м. Аналізується максимальна температура в комірці з теплоізоляцією при зменшенні товщини вогнетриву для вибору ефективного теплоізоляційного матеріалу.

3.2.2 Розрахунок комірки трикутної форми.

При розрахунках температур вогнетривкої цегли з коміркою трикутної форми для використання у високотемпературних зонах печі застосовувалась розрахункова схема, яка представлена на рисунку 3.20.



1 – корпус печі; 2 – комірка з додатковою теплоізоляцією; 3 – вогнетрив.

Рисунок 3.20 – Розрахункова схема комірки трикутної форми

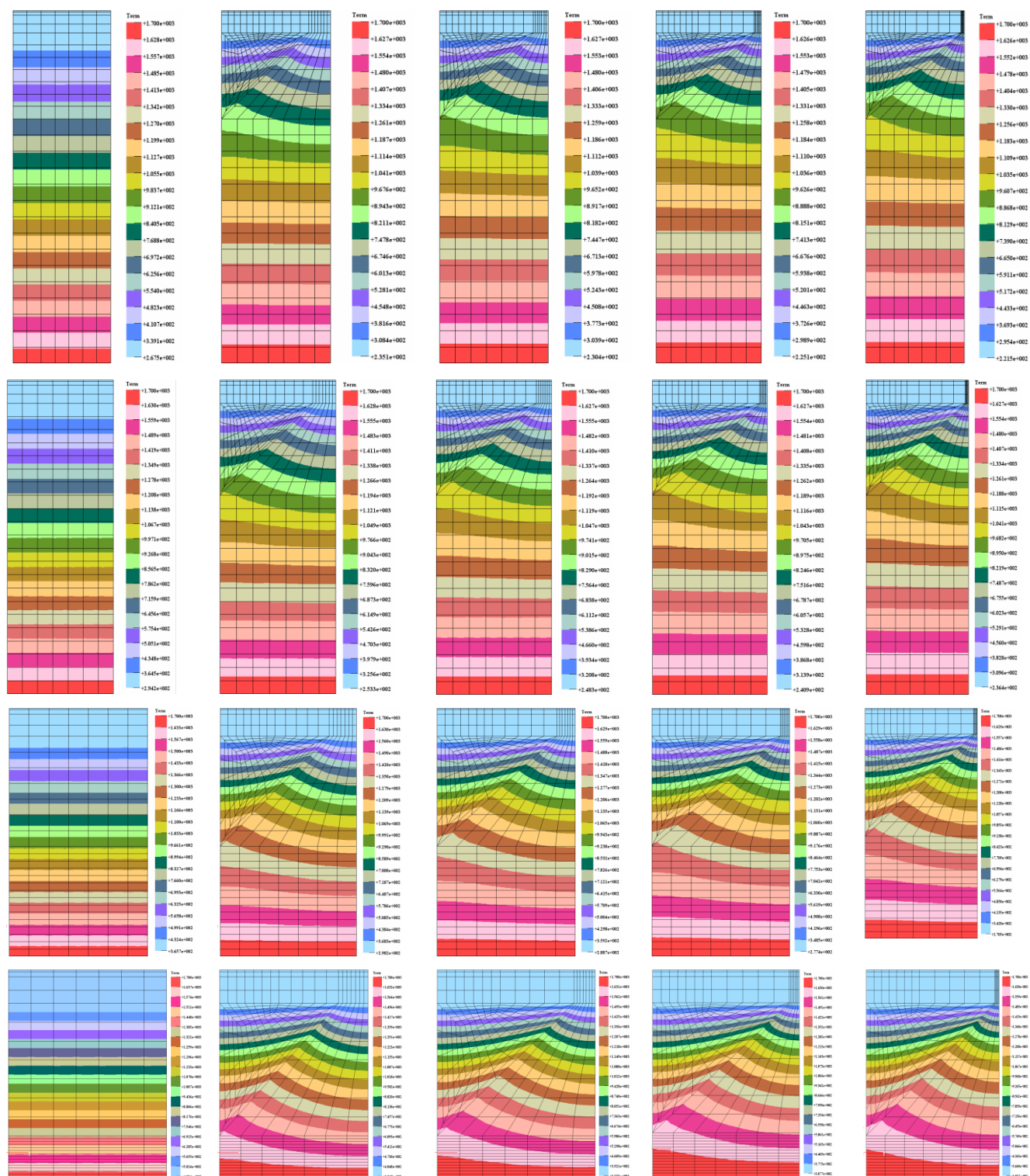
Досліджувались варіанти використання фасонного вогнетриву з наступними розмірами комірки: $L_1=0, 60, 65, 70, 72.5$ мм; $\Delta L=150, 30, 20, 10, 5$ мм. Товщина футерівки, або висота вогнетриву $H=230, 190, 120, 80$ мм. Вважаємо, що вогнетрив може бути розташований в зоні максимальних температур, яка становить 1700°C . Коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище від корпусу, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$, визначається за емпіричною залежністю

$$\alpha_{o.c.} = 3.5 + 0.062t_K \quad (3.20)$$

t_K - температура комірки, К

Результат теплового розрахунку вогнетривкої цегли з комірками трикутної форми приведені на рисунку 3.21.

Аналізуючи результати приведених вище розрахунків визначимо залежності температурних полів, максимальних температур в комірці з теплоізоляцією, теплового потоку від корпусу до навколишнього середовища, зменшення теплового потоку.



а)

б)

в)

г)

д)

а) стандартний вогнетрив (0x0) мм; б) комірка (60x60) мм;
 в) комірка (65x60) мм; г) комірка (70x60) мм; д) комірка (72,5x60) мм

Рисунок 3.21 – Температурні поля у футерівці з вогнетривкої цегли з комірками трикутної форми

Залежність температури корпусу печі від зносу вогнетриву приведена на рисунку 3.22. Із графіка видно, що в міру зношування вогнетриву температура корпусу підвищується, при товщині футерівки 230 мм (початок компанії печі) вона становить 270°C , після зношування до 80 мм (кінець компанії) підвищується до 450°C . При установці футерівки з фасонним вогнетривом з теплоізоляцією початкова температура становить 240°C , кінцева не перевищує 350°C .

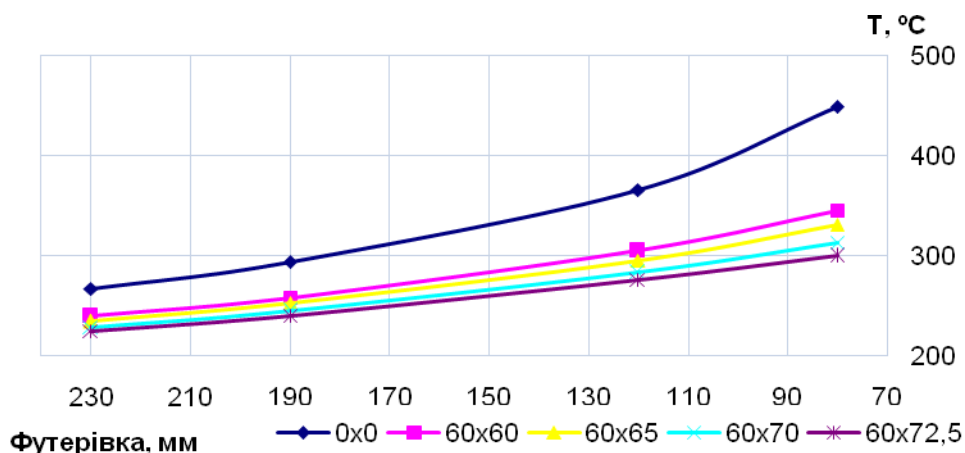


Рисунок 3.22 – Температура корпусу печі

Залежність максимальної температури вогнетрива від величини комірки приведена на рисунку 3.23. Із графіка видно, що на початку компанії печі температури для різних комірок незначні, і не перевищує 1000°C . В міру зношування вогнетриву вона підвищується й відповідно становить – 1552°C для комірки (60x60) мм, 1567°C для комірки (60x65) мм, 1584°C для комірки (60x70) мм, 1602°C для комірки (60x72,5) мм.

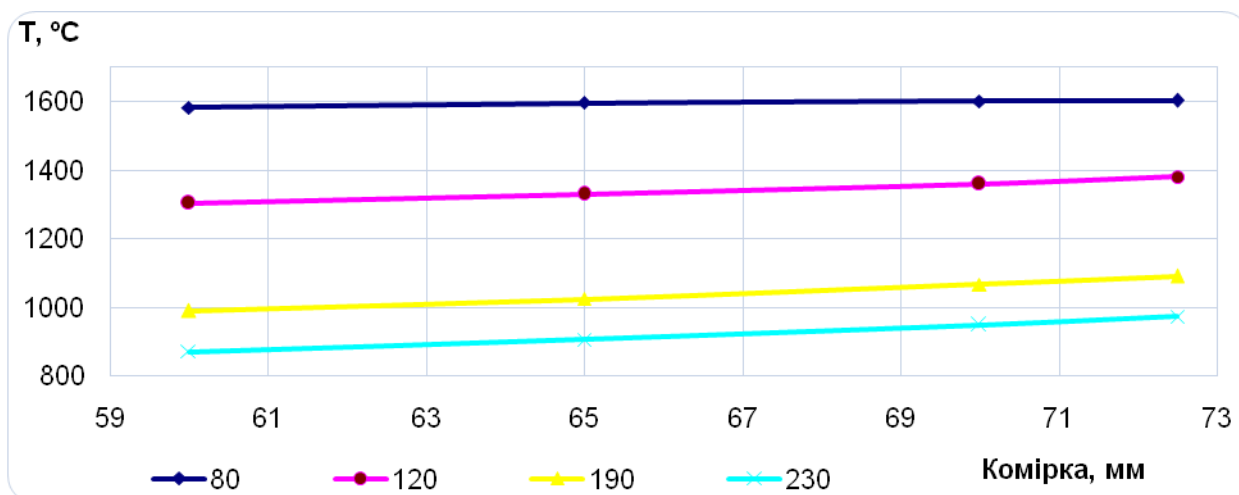


Рисунок 3.23 – Максимальна температура в комірці з теплоізоляцією

Залежність втрат теплового потоку від зносу вогнетриву представлена на рисунку 3.24. Із графіків видно, що теплові втрати від корпусу печі істотно збільшуються в міру зношування вогнетриву. Для звичайного вогнетриву вони змінюються від 5480 Вт/м^2 до 1350 Вт/м^2 . При використанні фасонного вогнетриву вони істотно менше особливо наприкінці компанії печі й становлять – 8300 Вт/м^2 для комірки $(60 \times 60) \text{ мм}$, 7630 Вт/м^2 для комірки $(60 \times 65) \text{ мм}$, 6920 Вт/м^2 для комірки $(60 \times 70) \text{ мм}$ і 6530 Вт/м^2 для комірки $(60 \times 72,5) \text{ мм}$.

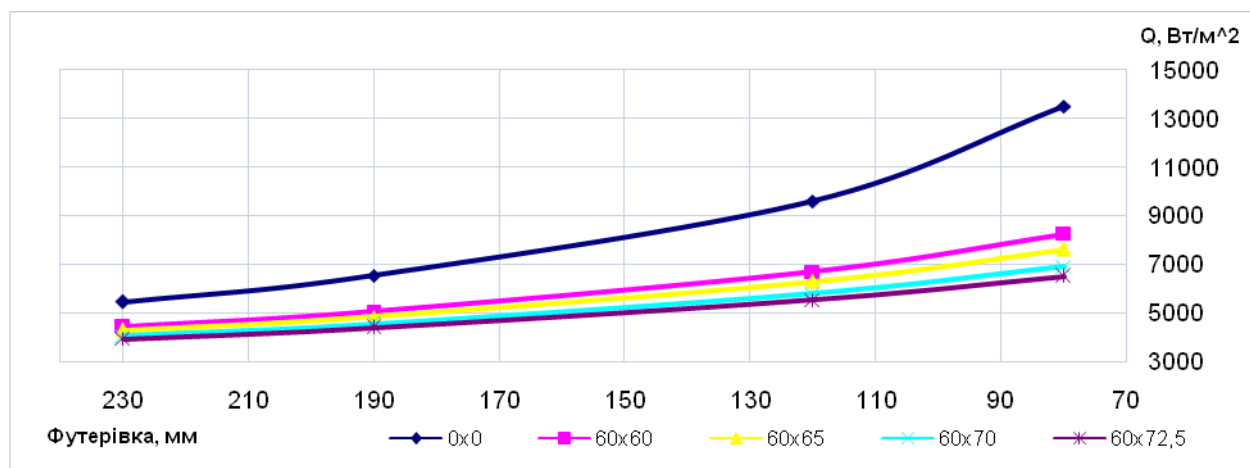


Рисунок 3.24 – Втрати потоку теплоти в навколишнє середовище

Залежність зменшення теплового потоку від зносу вогнетриву приведена на рисунку 3.25.

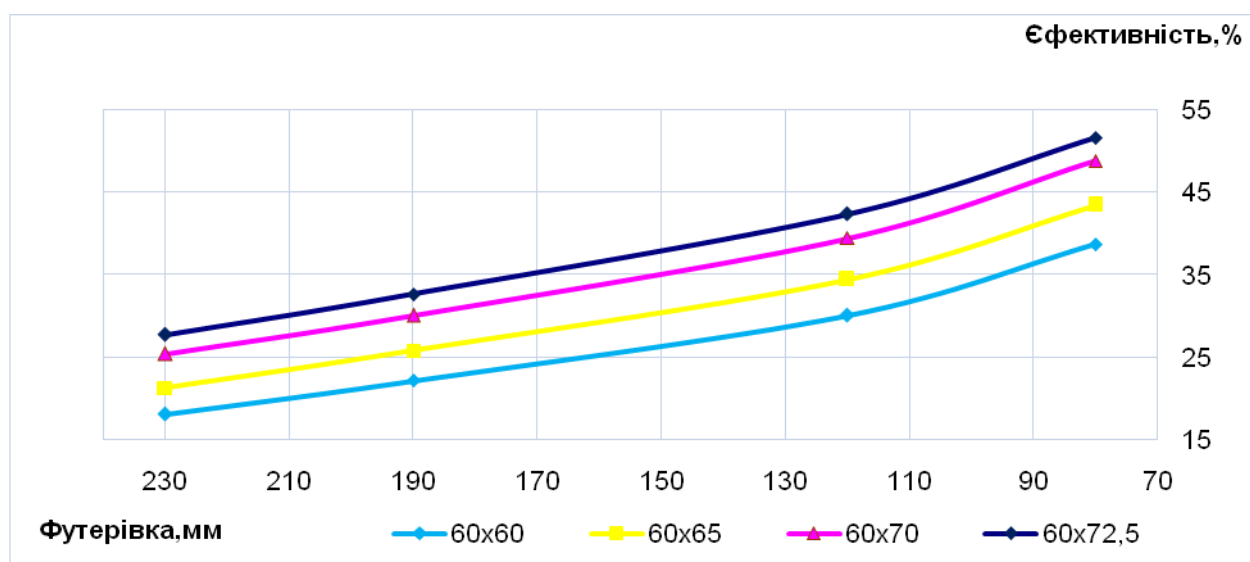


Рисунок 3.25 – Зменшення теплового потоку для футерівки з теплоізоляцією

Наведено результати зменшення теплового потоку від корпусу печі в навколишнє середовище у відсотковому відношенні з використанням футерівки з додатковою теплоізоляцією. Порівняння проводилося з базовою футерівкою зі стандартною конструкцією вогнетриву по висоті вогнетриву. Із графіка видно, що використання фасонного вогнетриву досягає найбільшої ефективності в порівнянні зі стандартною наприкінці компанії печі й становить – 39% для комірки (60x60) мм, 44% для комірки (60x65) мм, 49% для комірки (60x70) мм і 52% для комірки (60x72,5) мм.

Зменшення теплового потоку від величини комірки приведена на рисунку 3.26. Порівняння проводилося з базовою футерівкою зі стандартною конструкцією вогнетриву по ширині комірки.

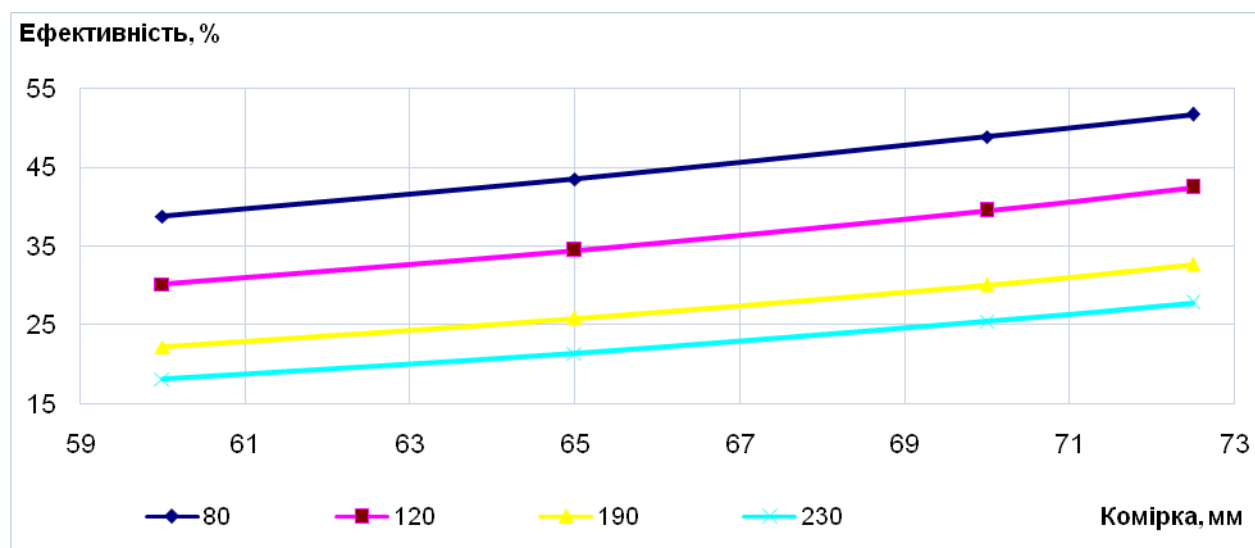


Рисунок 3.26 – Зменшення теплового потоку

Із графіка видно, що використання фасонного вогнетриву досягає найбільшої ефективності наприкінці компанії печі, а саме тоді, коли ширина комірки вогнетриву збільшується й становить – 38% для комірки (60x60) мм, 44% для комірки (60x65) мм, 49% для комірки (60x70) мм і 52% для комірки (60x72,5) мм.

На рисунку 3.27 наведено результати інтегрального розрахунку ефективності використання футерівки з додатковою теплоізоляцією за рахунок зменшення теплового потоку від корпусу печі в навколишнє середовище.

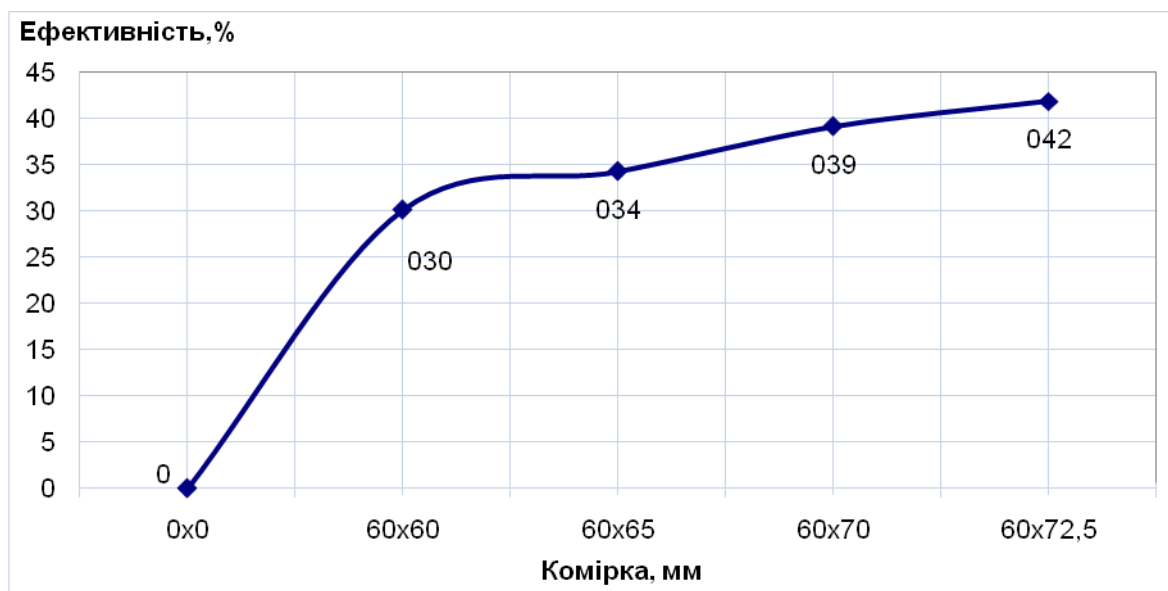


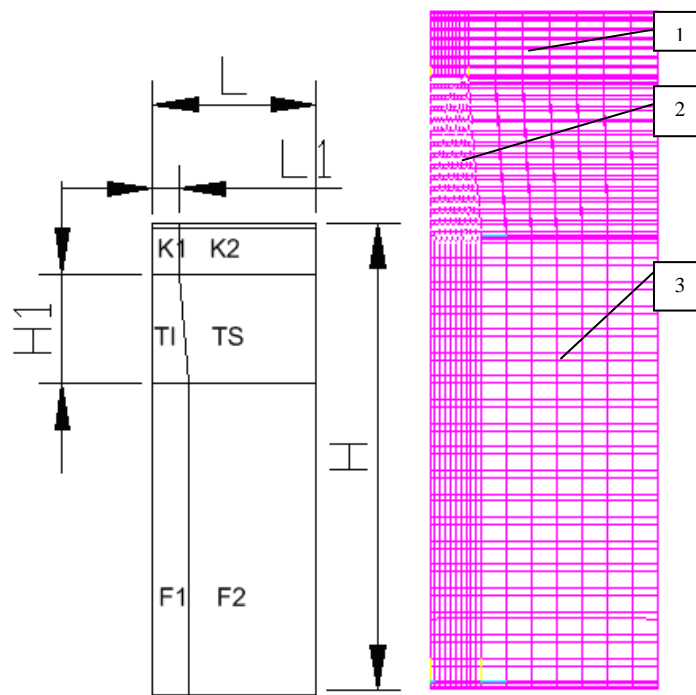
Рисунок 3.27 – Ефективність використання вогнетриву трикутної форми

Порівняння проводилося з базовою футерівкою зі стандартною конструкцією вогнетриву. Як видно із графіка установка вогнетривів з теплоізоляцією в зоні максимальних температур дозволить зменшити тепловий потік у навколишнє середовище на 30-42 %.

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок про доцільність застосування футерівки з використанням фасонного вогнетриву для зменшення теплових втрат. З отриманих даних видно, що зі зміною товщини футерівки температури у вогнетривах суттєво змінюється. Найбільш ефективною для використання є конструкція вогнетриву в якому використовуються комірки з теплоізоляцією розміром 60х72,5 мм. Однак отримані результати дозволяють зробити висновок про неможливість використання конструкції вогнетриву з коміркою (72.5х60)мм, тому що при цьому у комірці з теплоізоляцією виникають температури, які перевищують допустимі (1600°C). Слід зазначити, що звичайно в зоні максимальних температур цементної печі (зона спікання) на футерівці виникає захисний теплоізоляційний шар обмазки, що захищає футерівку від впливу високих температур. Однак у даній роботі досліджується найбільш несприятливий варіант. Тому в подальших розрахунках конструктивний варіант вогнетриву (72.5х60) мм не розглядається.

3.2.3 Розрахунок комірки прямокутної форми

Для футерування енергетичних зон з нижчою температурою газового потоку використовується вогнетривка цегла з коміркою прямокутної форми на рисунку 3.19, конструкція, якої приведена на рисунку 3.28.



1 – корпус печі; 2 – комірка з додатковою теплоізоляцією; 3 – вогнетрив.

Рисунок 3.28 – Конструкція комірки прямокутної форми

Поставлена задача вирішується тим, що в обертовій печі, яка футерована вогнетривкою цеглою, комірки, виконані на повернутому до корпусу торці, мають форму трапеції зі сторонами H_1 та H_2 висоту L і заповнені теплоізоляційним матеріалом. При розрахунках висота становить $H=230, 190, 120, 80$ мм. Розміри комірки: $H_2=62$ мм, $H_1=0, 13, 40, 58$ мм. Температура внутрішньої поверхні футерівки 1400°C . Коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище від корпусу (3.1).

Результат теплового розрахунку вогнетривкої цегли з комірками чотирикутної форми наведені на Рисунок 3.29.

Результати розрахунків дають можливість визначити значення температурних полів, максимальних температур в комірці з теплоізоляцією, теплового потоку від корпусу до навколишнього середовища та теплову ефективність футерівки з теплоізоляцією в порівнянні з базовою.

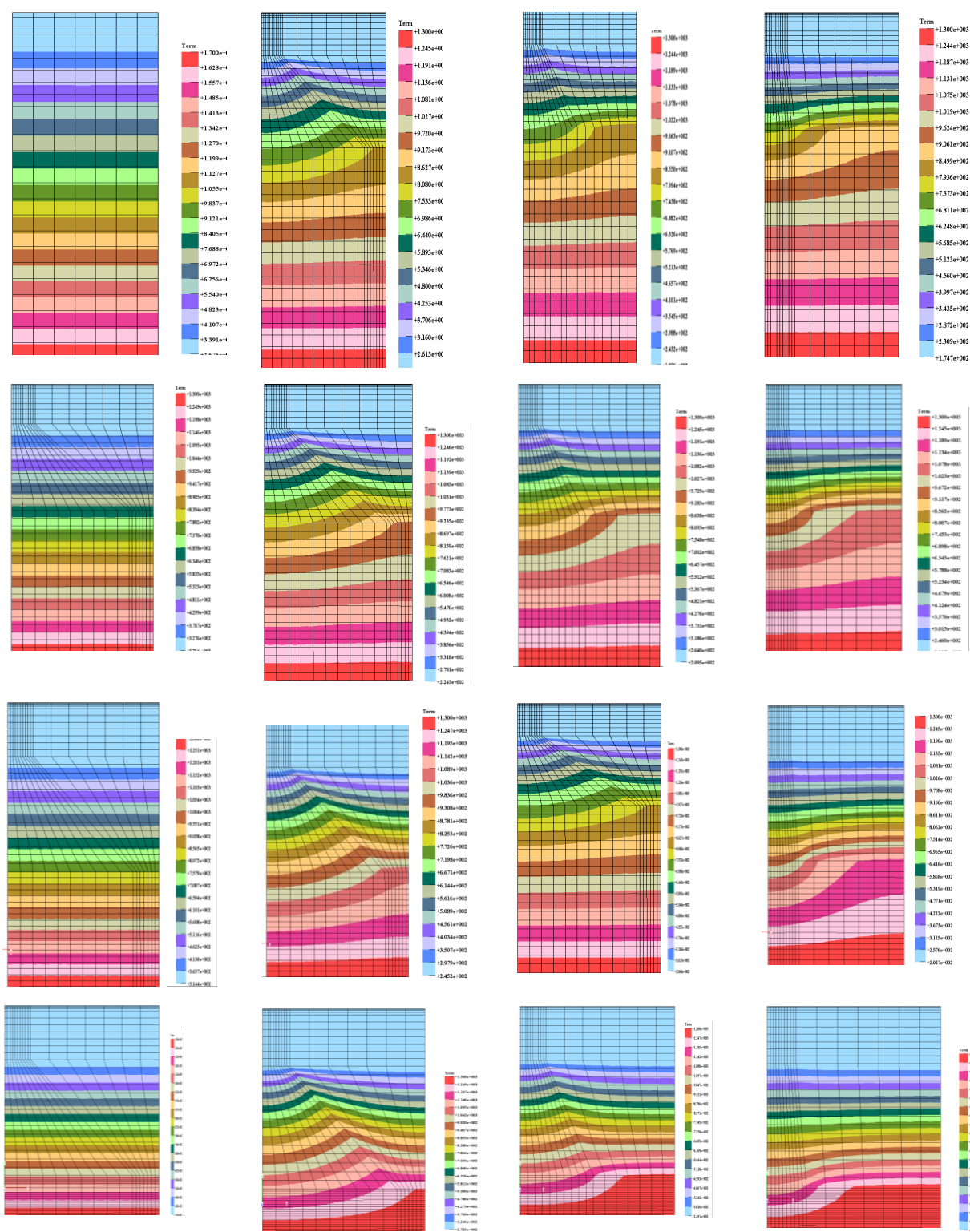


Рисунок 3.29 – Розрахунок вогнетривкої цегли з коміркою чотирикутної форми

Залежність температури корпусу печі від зносу вогнетриву приведена на рисунку 3.30. Із графіка видно, що в міру зношування вогнетриву температура корпусу підвищується, при товщині футерівки 230 мм (початок компанії печі) вона становить 258 °С, після зношування до 80 мм (кінець компанії) підвищується до 375 °С. При установці комірки з теплоізоляцією початкова температура становить 220 °С, а кінцева не перевищує 250° °С.

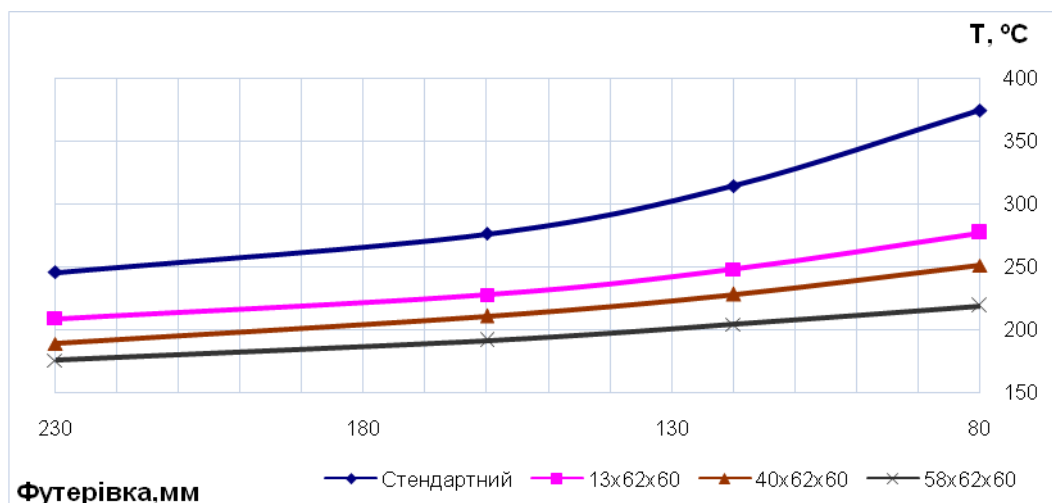


Рисунок 3.30 – Температура корпусу печі

Залежність максимальної температури футерівки від величини комірки приведена на рисунку 3.31. Із графіка видно, що на початку компанії печі температури для різних комірок незначні, і не перевищує 900 °С. В міру зношування вогнетриву вона підвищується й становить – 1281 °С.

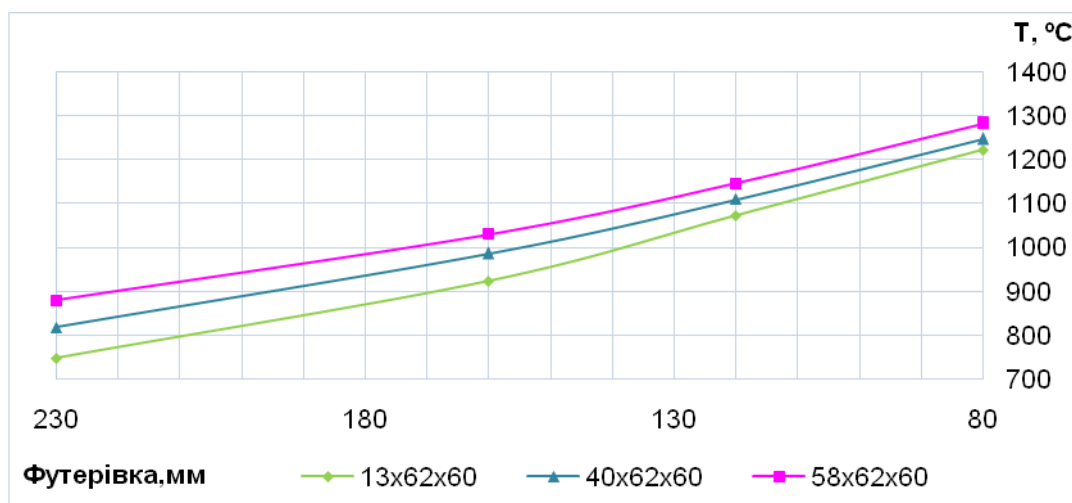


Рисунок 3.31 – Максимальна температура в футерівці.

На рисунку 3.32 представлена залежність теплового потоку від зносу вогнетриву. Із графіків видно, що теплові втрати від корпусу печі збільшуються в міру зношування вогнетриву. Для стандартної футеровки вони змінюються від 4200 Вт/м² до 9500 Вт/м². При використанні комірок з теплоізоляцією вона змінюється від 3800 Вт/м² до 5860 Вт/м². При зміні конфігурації комірки спостерігається незначне збільшення.

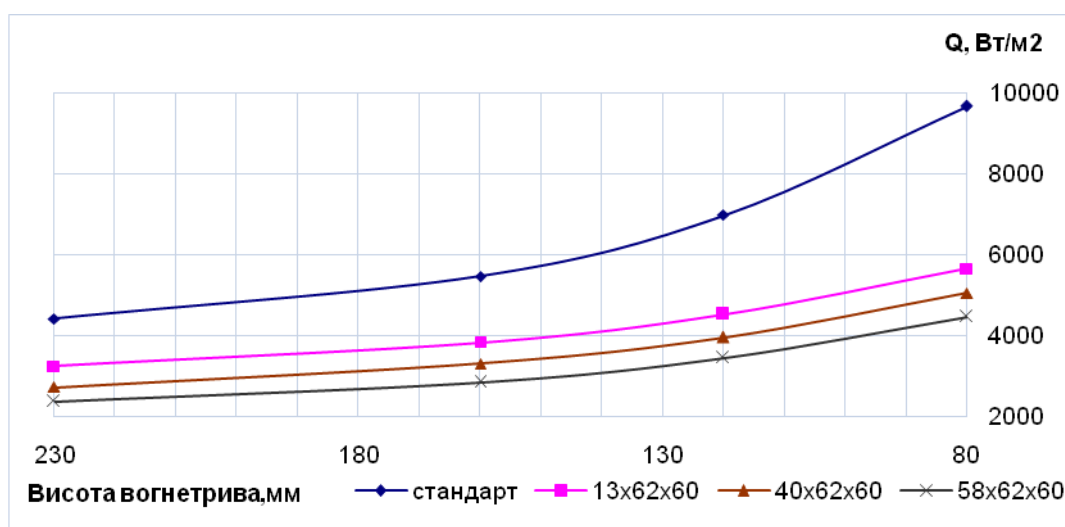


Рисунок 3.32 – Тепловий потік.

На рисунку 3.33. Наведено результати зменшення теплового потоку від корпусу печі в навколишнє середовище у відсотковому відношенні з використанням футерівки з додатковою теплоізоляцією.

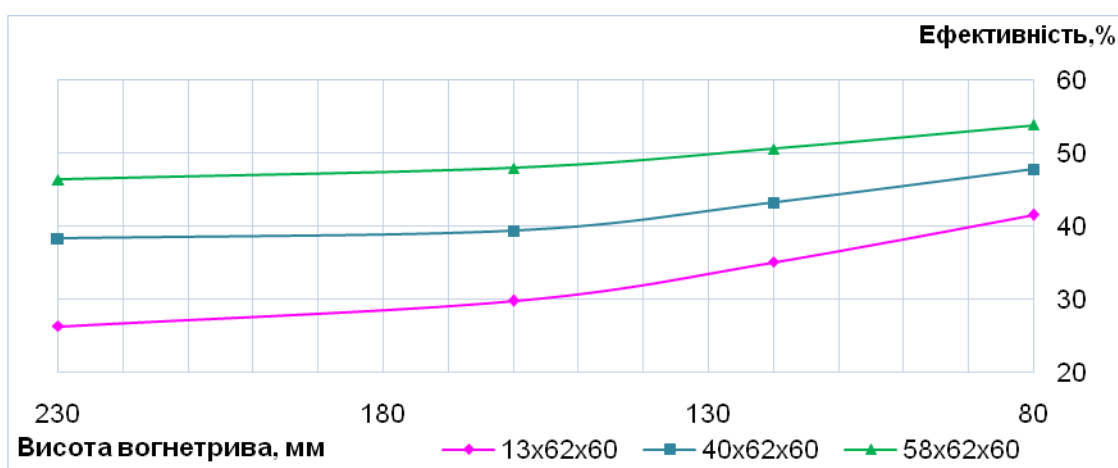


Рисунок 3.33 – Ефективність використання вогнетриву чотирикутної форми

Порівняння проводилося з базовою футерівкою зі стандартною конструкцією вогнетриву по висоті вогнетриву. Із графіка видно, що використання фасонного вогнетриву досягає найбільшої ефективності в порівнянні з стандартною в кінці компанії печі й становить – 41% для комірки 13х62х60 мм, 48% для комірки 40х62х60 мм, 54% для комірки 58х62х60 мм. Пояснюється інтенсивним збільшенням питомого теплового опору вогнетриву. Середні значення ефективності використання футерівки з теплоізоляцією за період компанії печі становлять – 33,2%, 42,2% та 49,7% відповідно.

Для вибору раціональної форми комірки з теплоізоляцією крім теплової ефективності необхідно розглянути та проаналізувати напружено-деформований стан вогнетриву при комплексному врахуванні термосилових та інших факторів навантаження, що розглядається в наступному підрозділі.

3.3 Визначення форми теплоізоляційної комірки з врахуванням термосилових навантажень

3.3.1 Постановка задачі при розрахунку на міцність

У роботі досліджувалась обертова піч 4,5х80 м із ввареним бандажем. Основними навантаженнями є власна вага корпусу печі, футерівки, бандажів і ведучого зубчастого колеса. Значно меншу частину становить вага оброблюваного матеріалу, яка в розрахунках зазвичай не враховується. При визначенні зусиль, які діють на піч, вплив її поздовжнього нахилу на величину зусиль також не враховується, так як він незначний і становить 3 - 4 %. Конструктивні елементи печі, які включають елементи корпусу, наведені на рисунку 3.34.

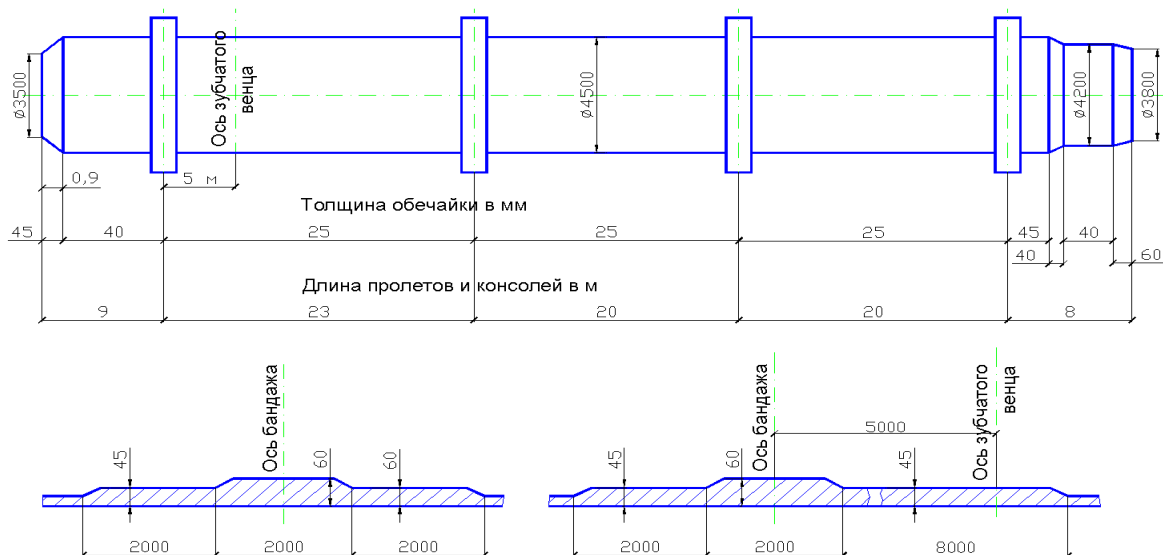


Рисунок 3.34 – Схема корпусу печі

Піч футерована переклазохромітовим вогнетривом ПХЦ-28,29 розмірами 230*150*84*65 мм. Температура футерівки всередині печі задається з експериментальних залежностей графіком, наведеним на рисунку 3.35.

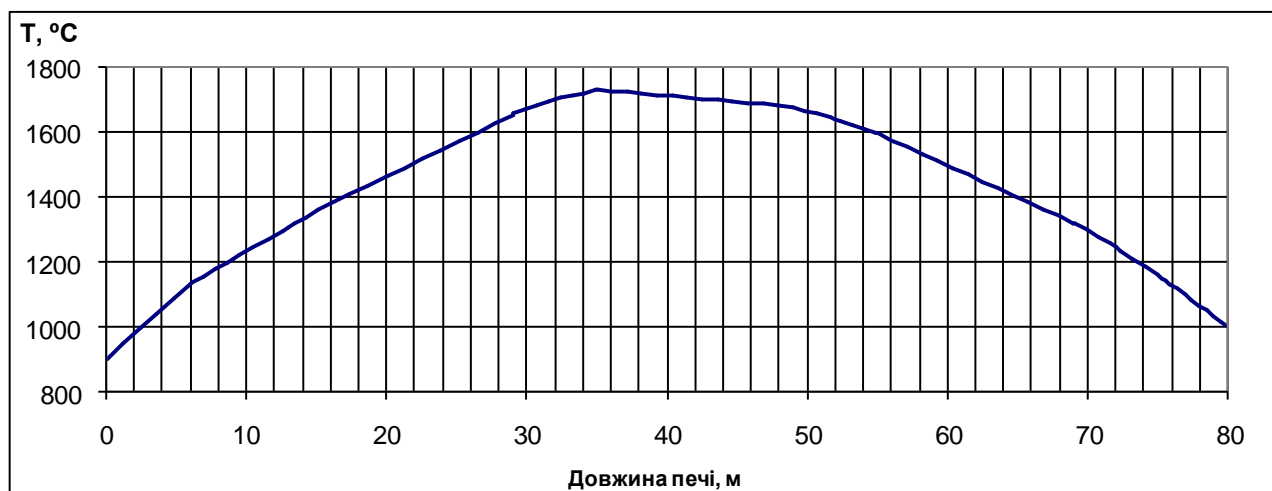


Рисунок 3.35 – Температура поверхні футерівки всередині печі

Вибір розрахункової схеми. Конструкція печі є симетричною, тому для зведення до мінімуму машинного часу та розміру матриці жорсткості розглянута половина печі, отримана шляхом його розділу вертикальною площиною симетрії. При цьому в скінчених елементах, що знаходяться в площині симетрії встановлюють зв'язки перпендикулярні цьому напрямку. Розрахункова схема обертової печі приведені на рисунку 3.36. Моделювання вогнетривів з комірками теплоізоляції показано спрощено.

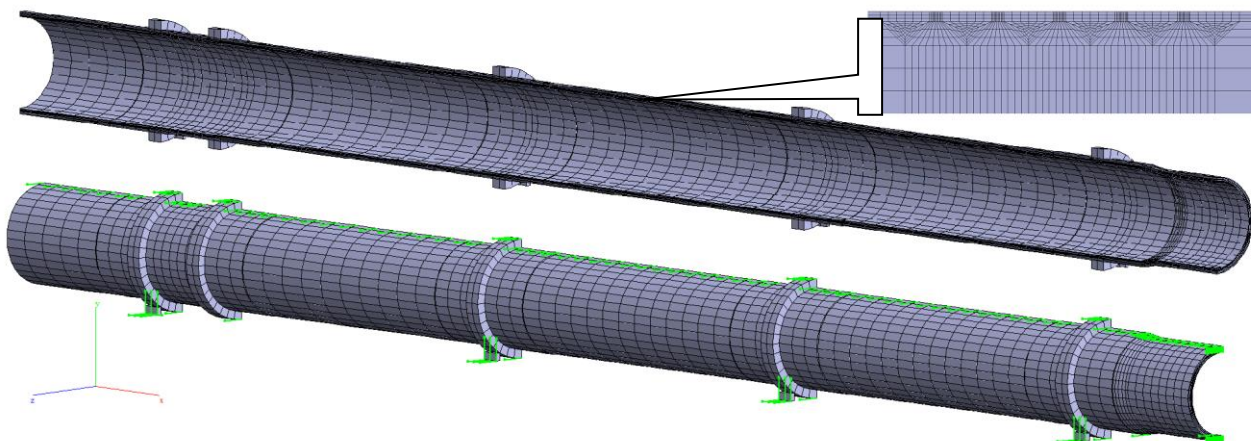


Рисунок 3.36 – Розрахункова схема обертової печі (вогнетриви не вказані)

Досліджувалася робота обертової печі при товщині футерівки 230 мм і 80 мм, з комірками для теплоізоляції розміром: (60x60) мм, (60x65) мм, (60x70) мм. Схеми комірок з теплоізоляцією представлено на рисунку 3.37.

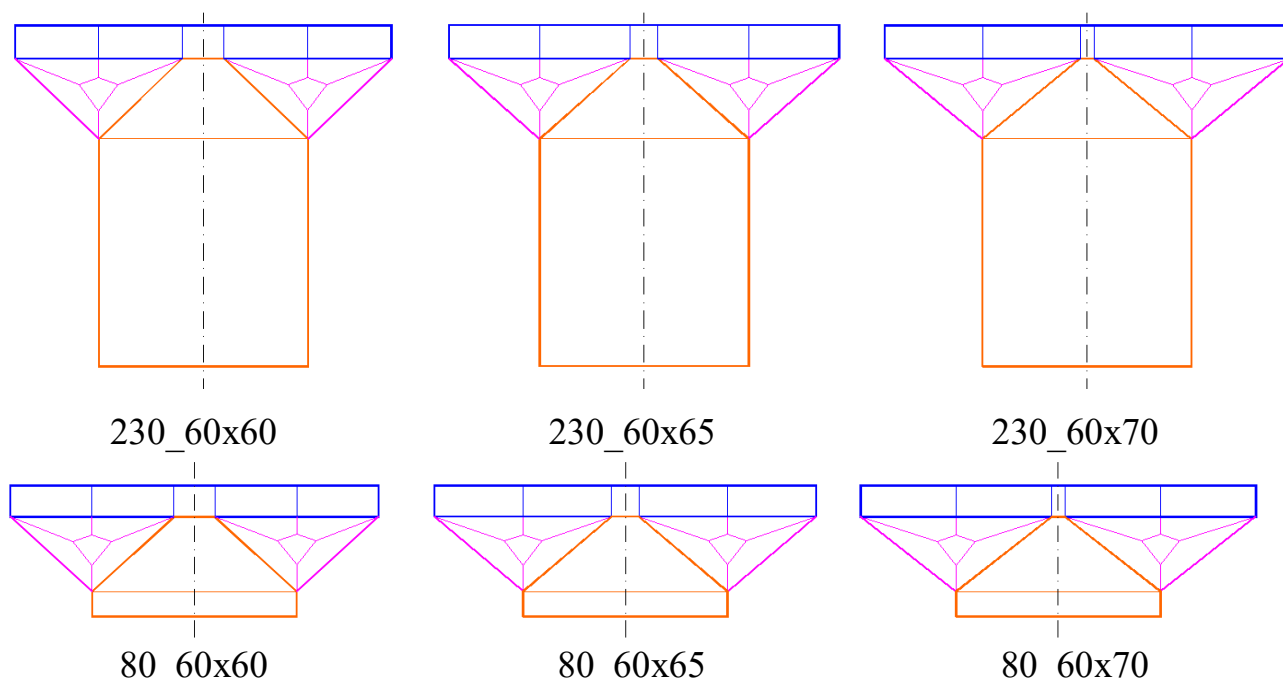


Рисунок 3.37 – Схеми комірок з теплоізоляцією а печі

При розрахунках обертових теплових агрегатів особливим питанням є визначення фізико-механічних властивостей футерівки, зокрема модуля пружності, коефіцієнт термічного розширення та коефіцієнт Пуассона. Потрібно враховувати, що модуль пружності арочної конструкції відрізняється від монолітної і в значній мірі залежить від початкових напружень, що виникли

при укладанні вогнетривів. В цьому випадку, при виконанні розрахункових робіт, рекомендується використовувати модуль пружності футерівки на два порядки менше ніж модуль пружності корпусу [68,70,]. В розрахунках використані фізично-механічні властивості футерівки наведені в [74,75,76,]
 $\sigma_m = 3100 \text{ МПа}$, $\mu = 0.3$, $\alpha = 3.5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

При визначенні критеріїв міцності вогнетривів враховується, що це крихке тіло, яке знаходиться в умовах складного напружено – деформованого стану. На сьогоднішній день відома доволі велика кількість теорій, які призначені для моделювання руйнування крихких тіл, але в загальному випадку вони не є універсальними, тобто з достатньою точністю описуючи процес руйнування деяких вогнетривів, для інших, що відрізняються структурою, дають помилкові результати.

Однією з теорій міцності, яка дає адекватні результати для виробів з вогнетривів, є теорія П. П. Баландіна, яка базується на результатах дослідів для крихкого матеріалу при одноосному розтягу і стисканні. Для цього складний напружений стан (для випадку, коли $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) приводиться до простого одноосного. Формула та має вигляд:

$$\sigma_{\text{екв}} = \frac{(1-\psi)(\sigma_1 + 2\sigma_3) - \sqrt{(1-\psi)^2(\sigma_1 + 2\sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi} \leq R_c \quad (3.21)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження;

$\sigma_{\text{екв}}$ – напруження еквівалентне одноосному напруженому стану;

$\psi = R_p / R_c$ – показник крихкості;

R_τ – межа міцності на зсув;

R_p – межа міцності на одноосний розтяг;

R_c – межа міцності на одноосне стискання.

Відповідно (3.21) міцність крихкого матеріалу, наприклад вогнетриву, оцінюється трьома основними показниками: R_c , R_p і R_τ . Ця обставина, та точність отриманих результатів, пояснює широке розповсюдження даної теорії.

Вищевказане дозволяє виділити межу міцності на одноосне стискування як основну характеристику міцності при описі руйнування.

Характеристики міцності вогнетривів залежать від імовірності тріщин у зразку і носять статистичний характер. Цим пояснюється розбіжність значень по міцності у літературі [74,75,76,77,82]. В роботі використовуються наступні значення міцності. При стисканні не нижче 30 – 35 МПа, розтягу 6,5 – 10.2 МПа, при вигині 5,5 – 7.1 МПа.

3.3.2 Алгоритм рішення завдання

Для моделювання НДС теплового агрегату, що знаходяться під дією нерівномірних температурних полів і зовнішніх сил використовуються співвідношення механіки деформованого твердого тіла, а саме рівняння руху і збереження енергії.

Алгоритм для розв'язання задачі наступний. З допомогою методу скінчених елементів (МСЕ) система диференціальних рівнянь дискретизується і розглядається як системи алгебраїчних рівнянь теплопровідності та термомеханіки. Матричне рівняння теплопровідності має вигляд:

$$[\Lambda]\{T\}=\{Q\} \quad (3.22)$$

де $[\Lambda]$ – матриця теплопровідності, що враховує властивості теплопровідності матеріалу й нелінійні граничні умови теплообміну (3.20);

$\{T\}$ – вектор невідомих вузлових температур;

$\{Q\}$ – вектор внутрішніх і граничних теплових джерел.

Завдання термомеханіки формулюється щодо вузлових переміщень у вигляді рівняння

$$[K]\{U\}=\{P\} \quad (3.23)$$

де $[K]$ – матриця твердості, що враховує пружні властивості матеріалу й граничні умови;

$\{U\}$ – вектор невідомих вузлових переміщень;

$\{P\}$ – вектор еквівалентних вузових термосилових навантажень, які обумовлені дією зовнішніх сил і градієнтами температури внутрішніх і граничних теплових джерел.

Процес моделювання термонавантаженого стану конструкцій виконується у два етапи. На першому вирішується завдання теплопровідності. Оскільки система рівнянь (3.22) є нелінійною, то використовується ітераційний алгоритм в наступній послідовності:

1) На першій ітерації коефіцієнт тепловіддачі визначається за температурою навколишнього середовища θ , в результаті чого формується вектор $\{Q\}$ та лінеаризована матриця $[\Lambda]$, значення яких залежить від температури;

2) Вирішується система лінеаризованих рівнянь і визначається чергове наближення значення вектора $\{T\}$,

3) За знайденими температурами уточнюється значення коефіцієнту тепловіддачі й обчислюється нова матриця $[\Lambda]$ й вектор $\{Q\}$. Визначається похибка лінеаризованого рівняння (3.22) і якщо вона перебуває в припустимих межах, то останнє значення $\{T\}$ приймається як рішення завдання теплопровідності. В іншому випадку виконується перехід до п. 2.

Другий етап полягає у формуванні матриці жорсткості та вектора еквівалентних вузових термосилових навантажень (3.23) з врахуванням отриманого температурного поля. Після рішення (3.23) по отриманим значенням вузових переміщень обчислюються деформації і напруження в елементах кінцевоелементної моделі при аналізі загального напружено-деформованого стану конструкції.

3.3.3 Визначення НДС фасонного вогнетрива

Перший етап вирішення задачі полягає у визначенні температурних полів у футерівці. Конструктивні елементи печі наведені на рисунку 3.34. Досліджувалася

робота обертової печі при товщині футерівки 230 мм і 80 мм, з комірками для теплоізоляції розміром: (60x60) мм, (60x65) мм, (60x70) мм.

На рисунку 3.37 приведені значення температур на поверхні футерівки та корпусу печі з висотою вогнетриву 230 мм. Використовується базовий варіант футерівки без комірок та теплоізоляції.

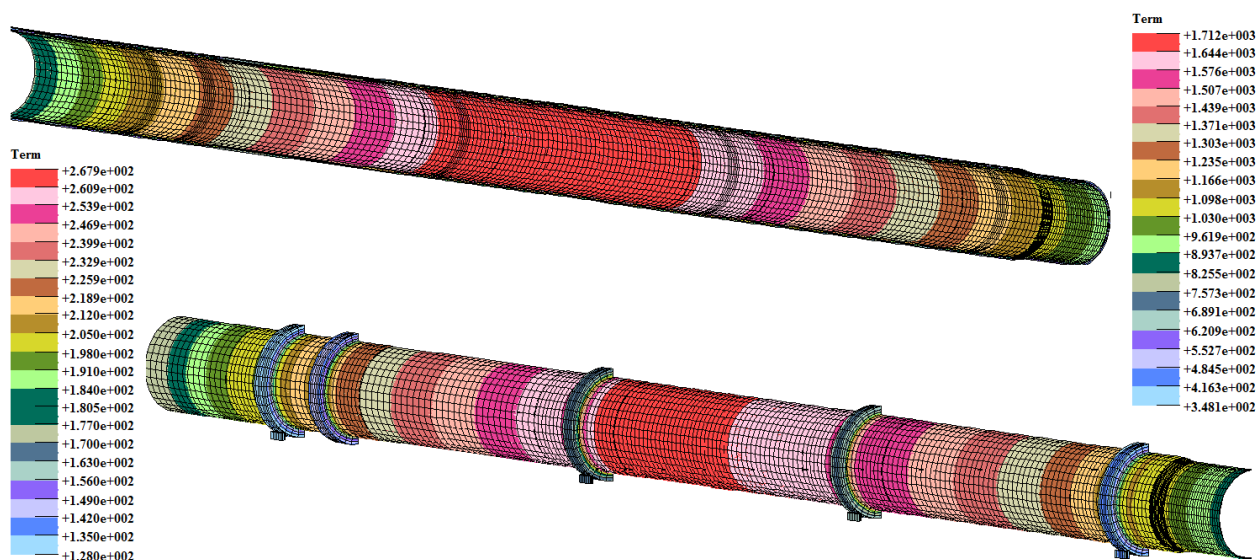


Рисунок 3.38 – Розподіл температур в печі та по корпусу 230 мм

З рисунку 3.38 видно, що температура футерівки в середині печі не перевищує 1730°C , а температура корпусу печі змінюється від 190°C у зонах охолодження й екзотермічних реакцій до 270°C у зоні спікання. Деяке зниження температури спостерігається в зоні установки бандажів і вінцевої шестірні за рахунок більш інтенсивного охолодження.

Аналізуючи результати розрахунків визначимо залежності температур корпусу від довжини печі (на початку і в кінці компанії печі з фасонним вогнетривом). Для цього на рисунку 3.39 наведено результати розрахунку температури корпусу печі при товщині футерівки 230 мм зі стандартною футерівкою та футерівкою виконаною фасонним вогнетривом з теплоізоляцією. Із графіків видно, що температура корпусу при стандартній футерівці змінюється від 190°C у зонах охолодження й екзотермічних реакцій до 270°C у зоні спікання.

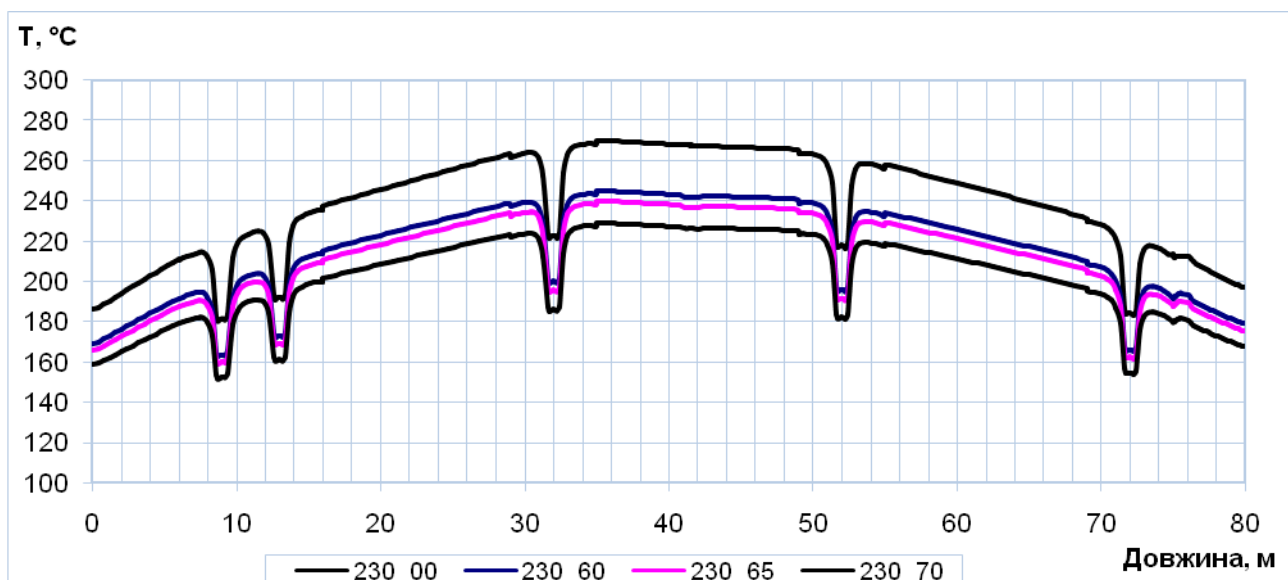


Рисунок 3.39 – Температура корпусу печі при товщині футеровки 230 мм

З графіків видно, що встановлення теплоізоляції суттєво зменшує корпусу. Як і очікувалось максимально ефективний вогнетрив, з точки зору теплової ефективності має комірку 70х60 мм. Температура корпусу знижується й становить – від 160 °С у зонах охолодження й екзотермічних реакцій до 230 °С у зоні спікання. Деяке зменшення температури спостерігається в зоні установки бандажів і вінцевої шестірні за рахунок більш інтенсивного охолодження. Спостерігаються незначні перегони температур у зоні установки підбандажних обічайок.

На рисунку 3.40 наведено результати розрахунку температури корпусу печі при товщині футерівки 80 мм зі стандартною футерівкою та футерівкою виконаною фасонним вогнетривом з теплоізоляцією. Із графіків видно, що температура корпусу при стандартній футерівці змінюється від 300 °С у зонах охолодження й екзотермічних реакцій до 450 °С у зоні спікання. Скачки температури на графіку також пояснюються більш інтенсивним охолодження виступаючих частин корпусу. При використанні вогнетривів з теплоізоляційними комірками (60х70) мм температура корпусу знижується й становить – від 220 °С у зонах охолодження й екзотермічних реакцій до 315 °С у зоні спікання. Більш істотний розподіл температур у цьому випадку

пов'язане з більшим впливом теплоізоляційних комірок на тепловий опір футерівки печі.

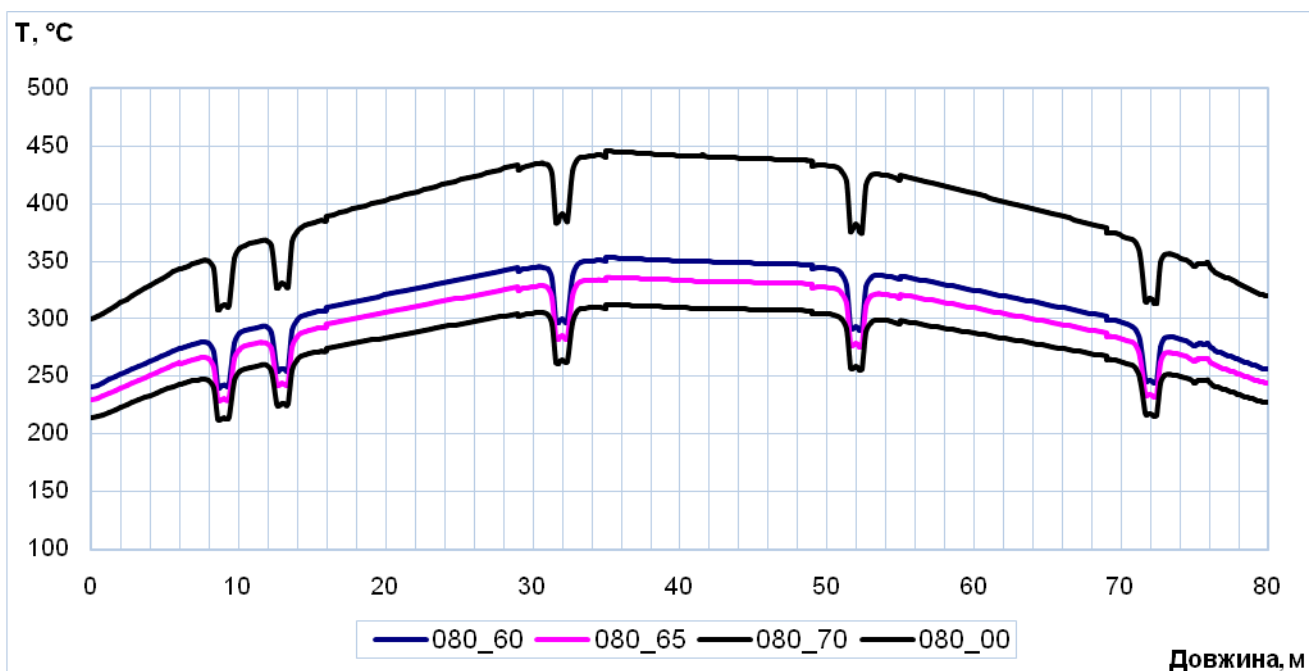


Рисунок 3.40 – Температура корпусу печі при товщині футерівки 80 мм

З Рисунок 3.39 – Рисунок 3.40 видно, що зі зміною товщини футерівки змінюється температура корпусу печі. В процесі зношення футерівки температура корпусу печі збільшується. Тому найбільш ефективною для використання конструкції вогнетриву з коміркою в цьому випадку є схема з комірками для теплоізоляції розміром (60x70)мм.

Наступний етап рішення, після визначення розподілу температур, полягає в розрахунку на міцність з врахуванням термосилових навантажень, які включають градієнт температур і дію гравітаційних сил. Розрахункова схема й деформована модель печі зі базовою футерівкою товщиною 230 мм представлена на Рисунок 3.41. Для ілюстрації отриманих даних використаний коефіцієнт масштабування деформацій $K_m=1000$.

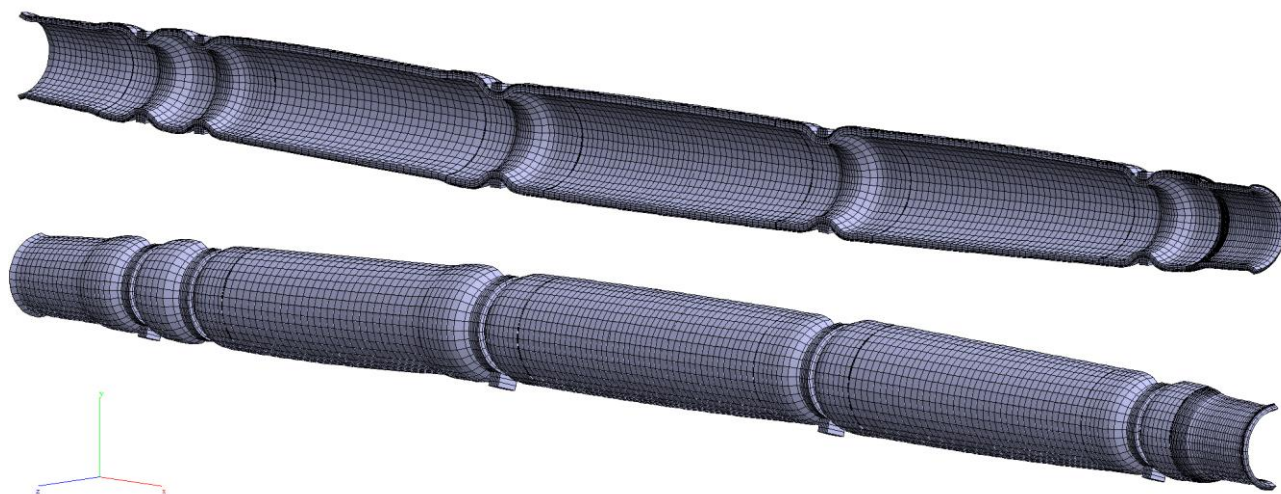


Рисунок 3.41 – Деформація корпусу печі ($K_m=1000$)

По отриманих результатах НДС проведений аналіз напруження, що виникають у футерівці для різного ступеню зношення та величини комірки з теплоізоляцією. При цьому визначалися приведені напруження по скінчених елементах (СЕ) з використанням критерію Баландіна $K_{БЛ}$. Відповідно до теорії міцності в місцях, де критерій $K_{БЛ}$ перевищує 1.0, виникають руйнування вогнетривів. Отримані данні для різних варіантів вогнетриву розташованих у зоні спікання наведені на рисунку 3.42 – рисунку 3.43.

На рисунку 3.42 показано значення критерію можливого руйнування (3.21) для печі з товщиною футерівки печі $L=230$ мм.

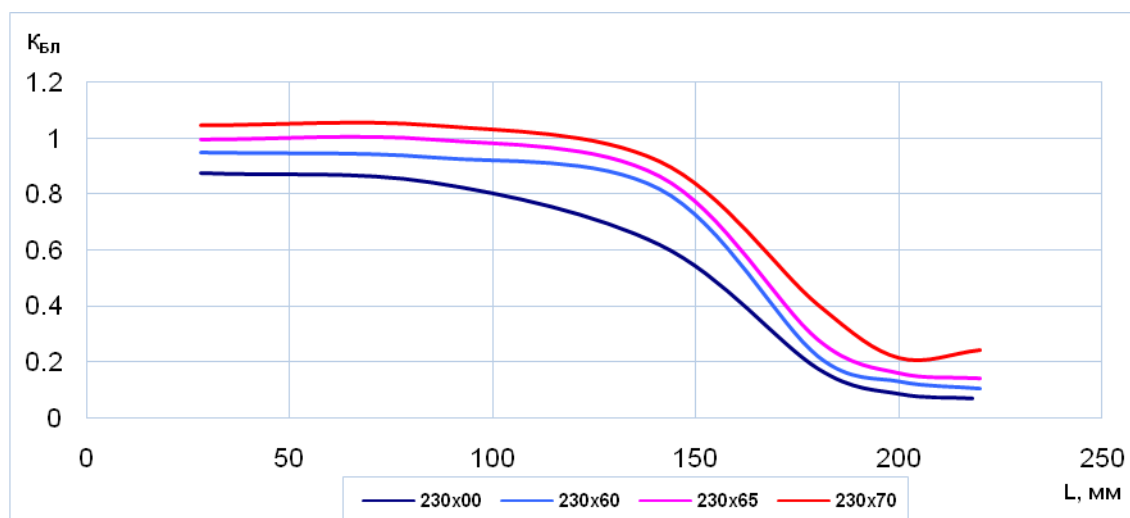


Рисунок 3.42 – Критерій міцності для вогнетривів $L=230$ мм

З наведених даних видно, що найбільше значення критерію має в зоні робочої поверхні футерівки. Як видно із графіка при стандартній футерівці, виконаної звичайним вогнетривом, значення критерію $K_{БЛ}$ не перевищує 0,874. При

використанні фасонного вогнетриву з теплоізоляційним шаром значення $K_{БЛ}$ збільшується. Так для комірки 60x60 мм $K_{БЛ}$ становить 0,93, для 60x65 мм $K_{БЛ} = 1,01$, комірки 60x70 мм $K_{БЛ} = 1,05$. Дане збільшення критерію пов'язане зі зростанням температури вогнетривів і відповідно розширенням матеріалу визначеного коефіцієнтом теплового розширення, що призводить до збільшення термосилових напружень. Максимальна температура в цій зоні, яка складає 1730 °С (див.рис. 3.38). Причому для розміру комірки 60x65 мм та 60x70 мм $K_{БЛ}$ має критичні значення в розглянутій зоні високих температур. З графіків видно, що інтенсивність критерію руйнування, при введенні теплоізоляційного шару змінюється. Зі збільшенням теплоізоляційного шару $K_{БЛ}$ зростає більш інтенсивно. Напруження викликані градієнтом температур в «ніжці» вогнетрива компенсується вільною боковою поверхнею, яка зумовлена наявністю волокнистого матеріалу.

На рисунку 3.43 показано значення критерію міцності для футерівки товщиною $L=80$ мм.

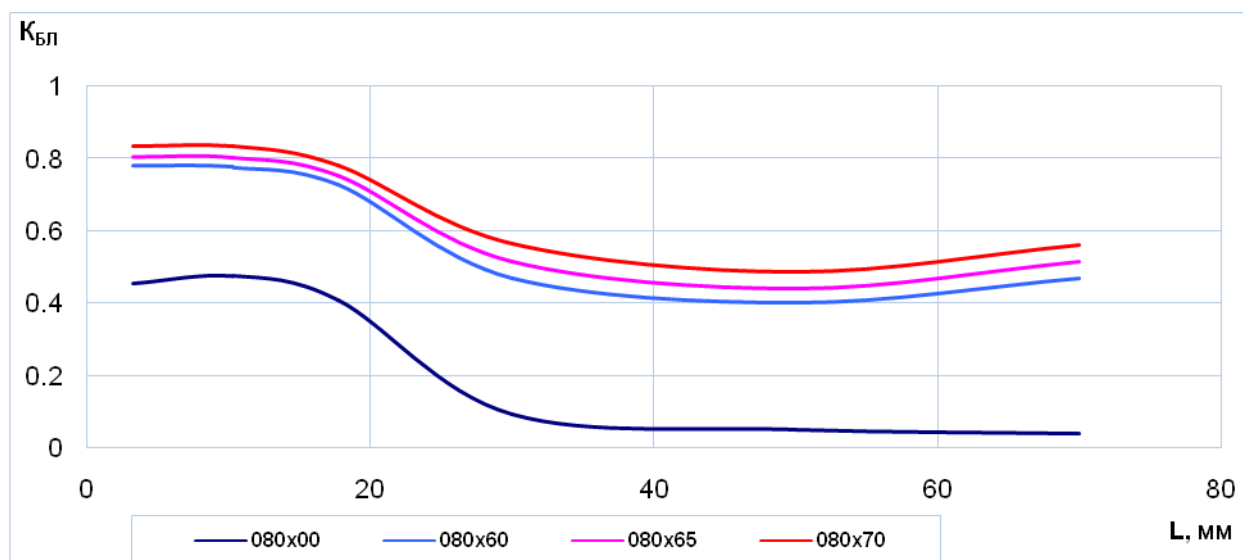


Рисунок 3.43 – Критерій міцності для вогнетривів $L=80$ мм

Як видно із графіка при стандартній футерівці, виконаній звичайним вогнетривом, значення $K_{БЛ}$ не перевищують 0,47. При використанні фасонного вогнетриву з теплоізоляційним шаром критерій $K_{БЛ}$ зростає та становить 0,78, 0,805 та 0,83 відповідно для комірок розміром 60x60 мм, 60x65 мм і 60x70 мм. Відмітимо, що дані значення знаходяться в межах допустимого, тобто менше 1,0. Збільшення відбувається на ділянці більш високої температури вогнетриву і

викликане розширення матеріалу. Помітне зростання критерію руйнування для вогнетривів в зоні комірки з теплоізоляцією яке викликане зростанням температурного градієнта в «ніжці» вогнетрива.

Слід зазначити, що при зменшенні вогнетриву ширина зони та величина $K_{\text{БЛ}}$ зменшується у порівнянні з футерівкою товщиною 230 мм. Це показує, що зношені вогнетриви менш чутливі до виникнення тріщини і можливостей руйнування. Вказані дані слід брати до уваги при виборі геометричних форм вогнетривів для футерівки обертових печей.

3.4 Висновки до розділу 3

У розділі розглядається теплові режими роботи футерівки з порівнянням базового варіанту та футерівкою з додатковою теплоізоляцією.

Для моделювання процесу теплообміну розроблено методики, алгоритми та програмне забезпечення для вирішення задачі нестационарної теплопровідності в циліндричних системах координат для розрахунку теплового режиму печі на основі яких виконані числові розрахунки з визначенням еволюції та розподілу температури і теплового потоку в футерівці обертової печі

1. Встановлено, що втрати тепла від корпусу печі в навколишнє середовище знижуються на 22-54%. Підвищений термічний опір футерування може також посилити процес передачі тепла матеріалу на 1,5-8% за рахунок збільшення теплового потоку в зоні безпосереднього контакту з матеріалом, створюючи відповідне температурне поле в робочому об'ємі. Також за рахунок радіаційного теплообміну збільшує тепловий потік від нагрітої футеровки до відкритої поверхні матеріалу;

2. Наявність комірок з додатковою теплоізоляцією сприяє виникненню теплових пульсацій, що мають осцилюючий характер та викликають інтенсифікацію теплових та масообмінних процесів, що в загальному випадку сприяє підвищенню продуктивності теплового агрегату;

3. Виконані розрахунки температурних коливань у високотемпературних зонах обертової печі, дають можливість визначити глибину проникнення теплового

потоків в вогнетривих і зробити висновки про вплив режимних параметрів роботи обладнання на температуру і тепловий режим служби футерування;

4. Визначено НДС обертової печі та футерівки з урахуванням дії гравітаційних сил і термосилових навантажень у комплексній постановці. Отримані дані дають можливість аналізувати умови роботи футерівки та визначати ефективність використання вогнетривів при зміні конструктивних розмірів і фізично-механічних властивостей;

5. Розмір комірки з додатковою теплоізоляцією розміром 60х60 мм є найбільш ефективними так як дозволяють зменшити теплові втрати на 40%, а напруження, що виникають у периклазохромитових вогнетривах, не перевищують допустимих. Даний вогнетрив, з комірками заповненими мулітокремнеземистою ватою з не органічними вставками (температура використання до 1600 °С), може бути рекомендований для роботи в діючих теплових агрегатах;

6. Визначено, що використання комірки з теплоізоляцією в формі прямокутника більш ефективне. Однак потрібно враховувати, що комірка трикутної форми розраховувалась для максимальної температури у високотемпературних зонах яка становить 1700 °С (критичний випадок). Комірка прямокутної форми для максимальної температури поверхні 1400 °С, що є базовою робочою температурою при експлуатації печі. Тому комірку трикутної форми доцільно встановлювати в зоні спікання, а прямокутної в зонах екзотермічних реакцій та декарбонізації де вони будуть найбільш ефективними;

7. Використання футерівки з додатковою теплоізоляцією дозволяє зменшити споживання палива забезпечуючи більш рівномірний і ефективний процес випалювання та енергетичну ефективність обертової печі;

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ В ФУТЕРІВЦІ З ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЄЮ

4.1 Постановка задачі дослідження

Метою експериментальної частини роботи є дослідження можливостей встановлення футерівки з фасонним вогнетривом, та врахуванням, як теплової ефективності, так і конструктивної надійності, обумовленої величиною виникаючих у вогнетриві термомеханических напружень.

Завдання проведення експериментальних досліджень пов'язана з необхідністю отримати температурні поля і оцінити правильності математичної моделі й методики розрахунку температурних полів у тілі вогнетриву. Дані про температурне поле у вогнетриві й теплоізоляції отримані на спеціально створеній експериментальній установці.

4.2 Опис експериментальної установки.

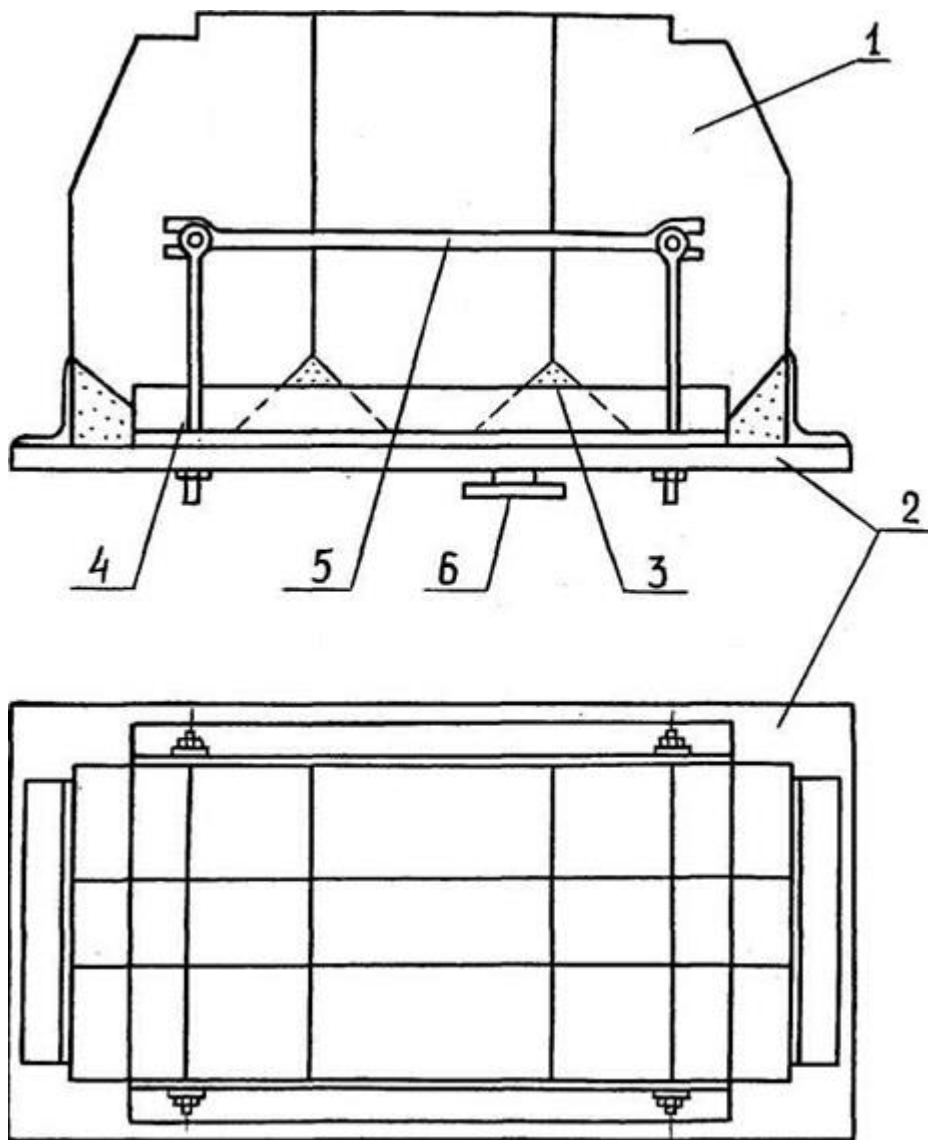
Експеримент був проведений на базі лабораторій ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва».

На рисунку 4.1 зображено експериментальну установку та обладнання на якому було проведено експеримент.



Рисунок 4.1 – Фотографія фрагменту футерівки печі

Експериментальна установка представлена на рисунку 4.2 й являє собою наступну конструкцію. До сталевого листа 2 (матеріал Ст.3) товщиною 14 мм, що імітує корпус печі, за допомогою відкидних болтів 4 кріпляться фасонні вогнетриви, що скріплені між собою стяжками 5. В комірки покладений теплоізоляційний матеріал 3 - мулітокремнеземистая вата (МКРР – 130). Щільність укладання складала 300 кг/м³.

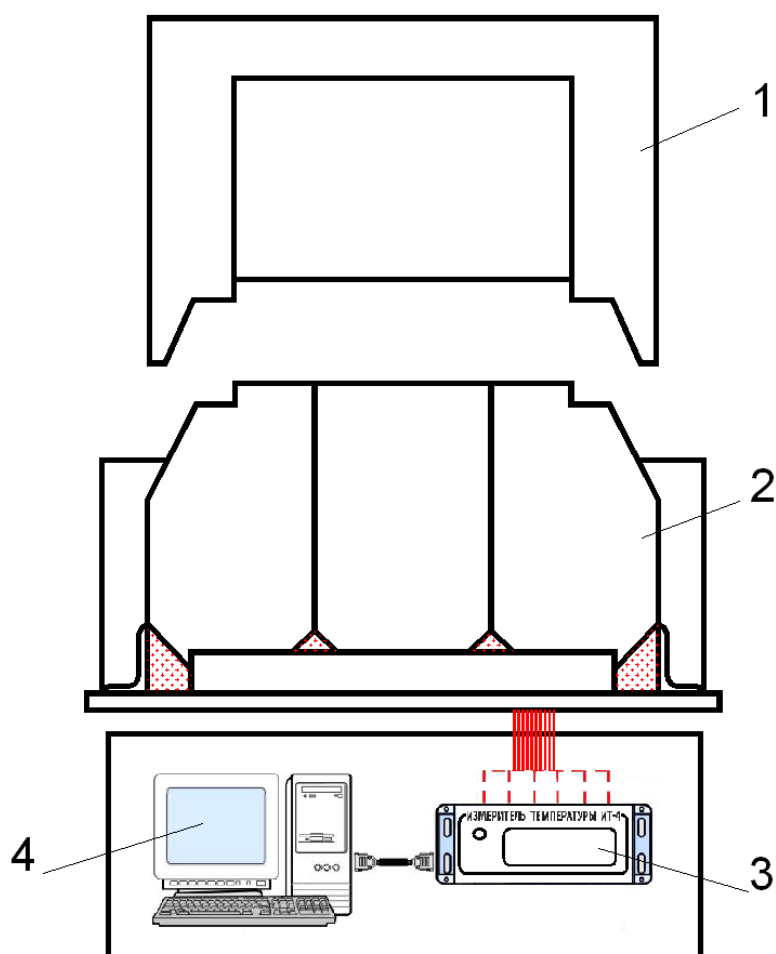


1 - вогнетрив ПХЦ-28; 2 - металева плита; 3 - комірка з мулітокремнеземною ватою; 4 - відкидні болти; 5 - стяжка; 6 - роз'єм для термопар

Рисунок 4.2 – Фрагмент футерівки з теплоізоляцією;

Для зменшення впливу зовнішніх умов теплообміну на проведення експерименту дослідний зразок вогнетриву містився в центрі фрагмента футеровки. Крім того, для виключення ефекту стоку тепла з бічних поверхонь зовнішніх вогнетривів ці поверхні були закриті шаром теплоізоляційного матеріалу.

Випробування проводилися в електричній нагрівальній печі типу СНО-34,5-2/16. Під час випробувань піч працювала в автономному режимі. Контроль температури здійснювався за допомогою встановленої в піч термопари. Схема експериментальної установки наведена на рисунку 4.3.



1 - Нагрівальну піч СНО-34,5-2/16; 2 - фрагмент футерівки;
3 - вимірник температури ИТ-4; 4 - комп'ютер.

Рисунок 4.3 – Експериментальна установка

Температура в робочій камері підтримувалася постійної й становила 1200°C. Стационарний тепловий потік через вогнетриви встановлювався через 12 годин після

включення печі. Фрагмент футеровки оберткової печі був основною частиною експериментальної установки, у якому досліджувався процес розподілу температур в осередках з теплоізоляцією й у тілі вогнетриву. Фасонні периклазохромитовий вогнетриви, що становлять фрагмент, являють собою стандартні вогнетриви марки ПХЦ-28, виготовлені на Пантелеймоновском вогнетривковому заводі для футеровки оберткових цементних печей.

Методика випробування полягала у вимірі температур у тілі вогнетриву. Виміри вироблялися за допомогою 20 хромель-алюмелевих термопар діаметром 0,5 мм за ДСТ 3044-84. З них 13 установлено у вогнетриві, 6 - у мулітокремнеземистій ваті, 1 - у корпусі.

Корольки термопар були впресовані у вогнетрив на глибину 3-6 мм. Показання термопар знімалися з розйому, до якого підключений комутатор для передачі показань термопар на вимірник температури ИТ-4. Схема розміщення термопар продемонстровано на рисунку 4.4.

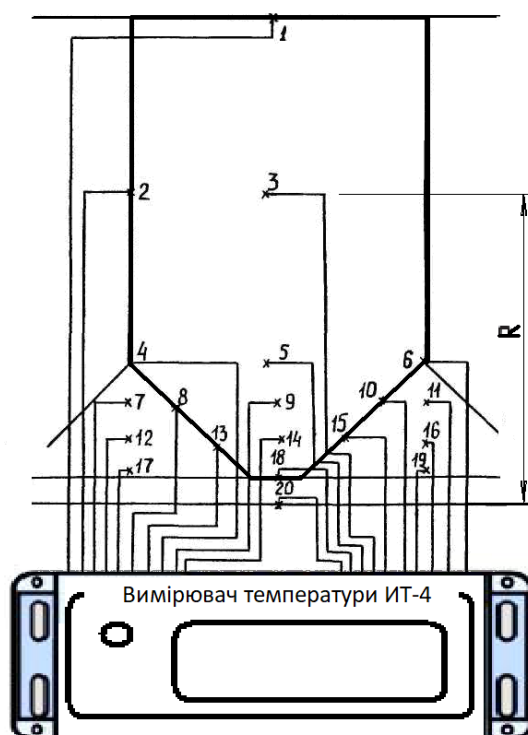


Рисунок 4.4 – Схема розміщення термопар у вогнетриві
1-20 Місця встановлення термопар

Точність виміру вимірника ИТ-4 0,1%, максимальна похибка термопар хромель–алюмель становить – 0,75%. З вимірника ИТ-4 дані надходять на комп'ютер для запису й обробки отриманих даних.

Результати вимірів температур за встановленими термопарами наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

№	Заміри температур						
	R	Номера замірів (T ⁰ C)					
	мм	1	2	3	4	5	6
		T ⁰ C	T ⁰ C	T ⁰ C	T ⁰ C	T ⁰ C	T ⁰ C
1	241	1193,0	1190,0	1193	1193,0	1192,0	1192,0
2	153	957,0	955,0	956	957,0	958,0	957,0
3	157	964,0	965,0	960	963,0	962,0	962,0
4	71	773,0	773,0	769	771,0	772,0	773
5	71	746,0	747,0	744	746,0	744,0	745
6	68	764,0	764,0	760	763,0	763,0	765
7	54	721,0	720,0	721	721,0	722,0	721
8	51	707,0	706,0	705	706,0	705,0	706
9	51	673,0	671,0	669	670,0	670,0	671
10	50	701,0	700,0	699	701,0	700,0	701
11	51	718,0	717,0	715	717	716,0	717
12	32	626,0	625,0	621	624	626,0	628
13	32	563,0	560,0	559	561	562,0	563
14	32	554	557,0	556	556	557,0	558,0
15	30	573	575,0	575	572	574,0	577,0
16	30	619	619,0	619,0	617	618,0	616,0
17	16	412	413,0	413,0	414	412,0	410,0
18	13	334	335,0	335,0	334	333,0	332,0
19	17	420,0	422,0	422,0	421	421,0	422,0
20	2	305,0	308,0	308,0	307	306,0	307,0

Виміри температур екстраполювалися по лінійній залежності між значеннями, отриманими в точках установки термопар. Розподіл температур у фасонному вогнетриві й комірках з теплоізоляцією показані на рисунку 4.5. Розподіл температур по центру вогнетриву на рисунку 4.6.

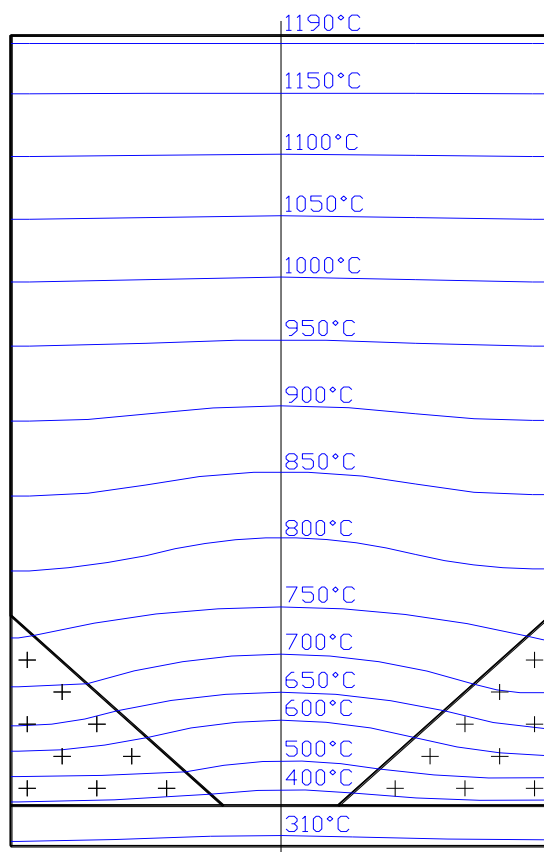


Рисунок 4.5 – Розподіл температур у фасонному вогнетриві й комірках з теплоізоляцією (дослідні дані)

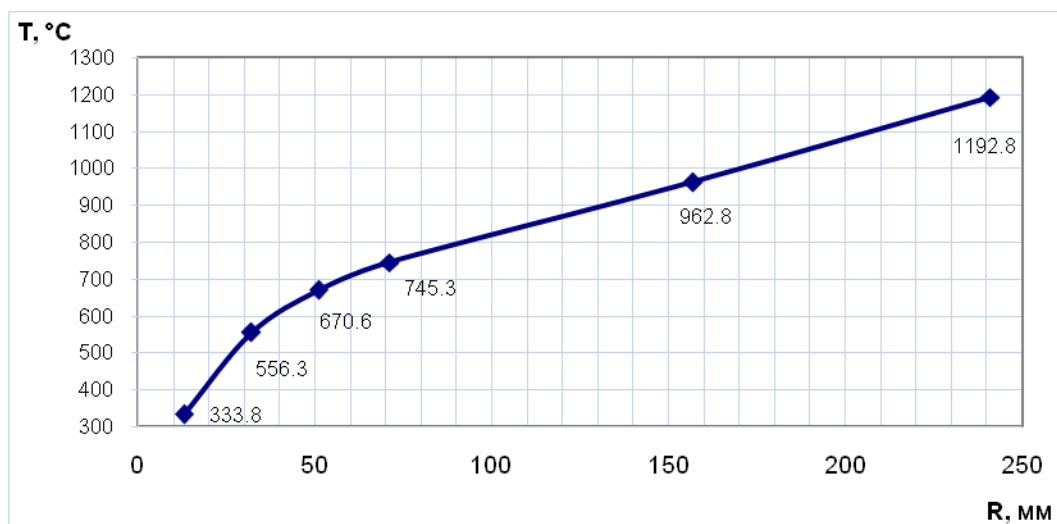


Рисунок 4.6 – Розподіл температур в центрі вогнетриву

При зіставленні результатів розрахунку температурних порожнин за дослідними даними встановлено, що максимальна розбіжність між ними складає 6%. Розбіжність пояснюється тим, що шар мулітокремнеземистої вати, на відміну від прийнятих припущень, є теплопровідним і пропускає до теплового потоку.

Враховуючи розбіжності, отримані при зіставленні даних, запропоновану методику розрахунку температурних полів і теплового потоку для вогнетриву зі зміненою конфігурацією можна визнати прийнятною, а отримані результату придатними як вихідні дані для розрахунку температурних напружень.

4.3 Висновки за розділом 4

Виготовлений дослідний зразок футерівки з теплоізоляцією, призначений для проведення експериментальних досліджень процесу теплообміну у фрагменті футерівки обертової печі з додатковою теплоізоляцією. Фрагмент футерівки складається зі сталевих листів, що моделює корпус печі, і фасонних периклазохромитових вогнетривів з комітками заповнених мулітокремнеземною ватою. Стенд призначений для моделювання режимів роботи футерівки корпусу обертової печі в процесі експлуатації.

Проведено експериментальні дослідження, при яких фізично моделювалися процеси теплообміну у футерівці печі. Експериментальна установка дозволяє в процесі досліджень визначати ступінь впливу різних режимних і конструктивних факторів на процес теплообміну.

За результатами оброблення результатів експериментальних досліджень процесу теплообміну фрагменту футерівки встановлено, що при порівнянні з розрахунковими результатами похибка експерименту не перевищує 6% з довірчою ймовірністю $W = 0,95$.

Експериментальні дослідження процесу теплообміну, і створення на їхній основі розрахункової методики, дозволять впровадити в практику розробок обертових теплових апаратів футерівку з підвищеним тепловим опором. Ефективність такої футерівки вище в порівнянні з існуючими, що відкриває широкі перспективи для її впровадження у виробничий процес, тому що вона має істотно кращі теплові й прийнятні вартісні показники.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на рішення важливої науково-технічної проблеми: підвищення теплової ефективності футерівки обертових печей шляхом зменшення теплових втрат через корпус. В роботі приведені розроблені науково обґрунтовані технічні рішення для визначення оптимальних параметрів вогнетривів футерівки, що сприяють стабільній роботі та зменшенню тепловитрат у обертових теплових агрегатах. За результатами роботи можуть бути зроблені наступні висновки:

1. Визначено, що наявність комірок з додатковою теплоізоляцією сприяє виникненню теплових пульсацій, що мають осцилюючий характер та викликають інтенсифікацію теплових та масообмінних процесів, сприяючих підвищенню продуктивності теплового агрегату;

2. Доповнена та реалізована математична модель для дослідження теплової ефективності високотемпературних теплових обертових агрегатів. Числовий аналіз дає можливість визначити вплив додаткової теплоізоляції на тепловий процес та продуктивність теплового агрегату;

3. Проведені дослідження показують, що використання додаткової теплоізоляції в футерівці дає можливість підвищити теплову ефективність печі шляхом:

- Зменшення витрат палива в середньому на 7.0 % в печах «сухого» способу виробництва клінкеру та на 9.0 % при «мокрому», що дає можливість заощадженням витрати палива відповідно на 3750 нм³/год та 2292 нм³/год відповідно;
- Збільшення продуктивності печі – на 8.0 %, або 10.03 т/год при «сухому» та 10.0 % при «мокрому» – 7.34 т/год. Ефективність суттєво підвищується при зношенні футерівки;
- Встановлено, що збільшення продуктивності теплового агрегату є більш ефективним методом енергозбереження ніж заощадженням палива.

4. Розроблена методика, алгоритми та програмне забезпечення для числового моделювання теплового режиму футерівки печі з визначенням еволюції, розподілу температур і теплового потоку у вогнетривах;

5. Досліджена ефективність регенераційного теплообміну футерівки на основі аналізу інтенсивності зміни температур та теплового потоку, що дозволило охарактеризувати вплив технологічних та технічних параметрів на температурний та тепловий режим футерівки та обертової печі в цілому;

6. Встановлено, що збільшення теплового опору футерівки зменшує глибину проникнення температурних коливань в футерівку, зменшуючи термомеханічні навантаження на вогнетриви і може бути рекомендовано як технічний прийом підвищення стійкості футерівки;

7. Розроблено й виготовлений експериментальний стенд призначений для проведення експериментальних досліджень процесу теплообміну у фрагменті футерівки обертової печі з додатковою теплоізоляцією;

8. Встановлено, що втрати теплоти від корпусу печі в навколишнє середовище зменшуються на 22-54% встановлення футерівки з додатковою теплоізоляцією з комірками. Підвищений термічний опір футерівки дає можливість збільшити передачу теплоти матеріалу на 1,5-8% за рахунок збільшення теплового потоку в зоні безпосередньо контакту з матеріалом, створюючи відповідне температурне поле в робочому об'ємі. Також радіаційний теплообмін збільшує тепловий потік від нагрітої футерівки до відкритої поверхні матеріалу;

9. Визначено, що використання комірки з теплоізоляцією в формі прямокутника більш ефективні. Однак при використанні потрібно враховувати, що для комірки трикутної форми враховувалась температура поверхні у високотемпературних зонах 1700 °С (критичний випадок), а прямокутної для температури поверхні 1400 °С, яка є максимальною в інших енергетичних зонах;

10. Визначено, що розмір комірки з додатковою теплоізоляцією 60х60 мм є більш ефективним, оскільки дозволяє зменшити теплові втрати в навколишнє

середовище на 30%, а напруження, що виникають у периклазохромітових вогнетривах, не перевищують допустимих. Даний вогнетрив, з комірками заповненими мулітокремнеземистою ватою з неорганічними вставками (температура використання до 1600 °С), може бути рекомендований для роботи в діючих теплових агрегатах. Теплоізоляцію з комірками трикутної форми доцільно встановлювати в зоні спікання, а прямокутної в зонах екзотермічних реакцій та декарбонізації з меншою температурою експлуатації де вони будуть найбільш ефективними;

11. Визначено, що обертові печі для виробництві в'язучих матеріалів та пористих заповнювачів є малоефективними теплотехнологічними агрегатами з тепловим ККД нижче 55 %. Шляхом підвищення їх ефективності є збільшення теплового опору футерівки за рахунок введення у вогнетриви футерівки високоефективної теплової ізоляції;

12. Виконані експериментальні дослідження процесу теплообміну фрагменту футерівки та визначено, що при порівнянні з результатами розрахунку похибка не перевищує 6 % при довірчій ймовірності $W = 0,95$.

Аналіз отриманих результатів свідчить про доцільність використання футерівки з підвищеним тепловим опором. Модифікована конструкція вогнетриву з теплоізоляційними комірками сприяє підвищенню теплового опору футерівки, що дозволяє зменшити втрати тепла через корпус та масу футерівки і печі в цілому, збільшити кількість теплоти, що передається матеріалу в робочій зоні, підвищивши енергетичну ефективність теплового агрегату. Футерівка має вищу ефективність у порівнянні з існуючими аналогами, відкриваючи широкі можливості для її впровадження у виробничий процес, завдяки значно покращеним тепловим та економічним характеристикам.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Табунщиков Н.П. Производство извести. – М. : Химия, 1978. – 239 с.
2. Ходоров Е.И. Печи цементной промышленности. - 2-е изд., доп. и перераб. / Е.И. Ходоров - Ленинград: Стройиздат. [Ленингр. отд-ние], 1968. - 456 с.
3. Глинков М.А. Основы общей теории тепловой работы печей. – М. : Metallurgizdat, 1959. – 416 с.
4. Колокольников В.С. Производство цемента : учеб. пособие / В.С. Колокольников. - Москва : Высш. школа, 1967. - 303 с. : ил.; 22 см.
5. Воробьев Х.С. Теплотехнические расчеты цементных печей и аппаратов : учеб. пособие для хим.-технол. вузов и фак./ Воробьев Х.С., Мазуров Д.А. - Москва : Высш. школа, 1962. - 350 с.
6. Воробьев Х.С. Теплотехнологические процессы и аппараты силикатных производств : учеб. пособие для вузов / Х.С. Воробьев, Д.Я. Мазуров, А.А. Соколов - Москва : Высш. школа, 1965. - 773 с. : ил. ; 21 см.
7. Печи и сушилки силикатной промышленности : учебник для вузов по специальности "Технология силикатов" / Д. Б. Гинзбург, С. Н. Деликишкин, Е. И. Ходоров, А. Ф. Чижский ; Под ред. П. П. Будникова. - Москва : Промстройиздат, 1956. - 456 с. : ил.; 23 см.
8. Зозуля П.В. Проектирование цементных заводов / П.В. Зозуля, Ю.В. Никифоров // С-П. – 2003. –№ 12. – с.446
9. Ходоров Е.И. Теплообмен во вращающихся печах / Е.И. Ходоров // Цемент. - -1961.- № 6.-С.-28-32
10. Панов, Е. Н., Карвацкий, А. Я., Лелека, С. В., Лазарев, Т. В., Педченко, А. Ю., Швачко, Д. Г. Method for determining the bulk temperature of the acheson graphitization furnace core. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, PC Technology Center, Том 3, № 5, С.41, 2015. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43721>

11. Дуда В.Г. Цемент / В.Г. Дуда; Пер. с нем. Е.Ш. Фельдмана; Под ред. Б.Э. Юдовича. - М : Стройиздат, 1981. - 464 с. : ил. ; 22 см. - Библиогр.: с. 444-459.
12. Кузнецова Т.В. Современные представления о процессах формирования портландцементного клинкера / Т.В. Кузнецова, Л.Н. Гриневич // Цемент. – 1995. – № 3. – С.24-30.
13. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL : www.cement-process.com/kiln_simulator.htm. – Назва з екрана.
14. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL : www.flsmidth.com. – Назва з екрана.
15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL : www.holcim.ru. – Назва з екрана.
16. Cement [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2016-semen.pdf>. – Назва з екрана.
17. Де Бойс А. Теплообменные системы печей мокрого способа производства / Де Бойс А. // Цемент. – 1995. – №3. – С. 19-21.
18. Лисиенко В. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справочное издание : в 2 кн / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004. Кн.1.- 688 с, 24см.
19. 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. – Кн.2. – 592 с, 24 см.
20. Генералов М.Б. Энциклопедия машиностроения. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Т.IV-12 / М.Б. Генералов, В.П. Александров, В.В. Алексеев [и др.] - М.: Машиностроение, 2004. – 832с.
21. Мазуров Д.Я. Теплотехническое оборудование заводов вяжущих материалов. – М. Стройиздат, 1982. – 288 с.

22. Боганов В.Л. Вращающиеся печи цементной промышленности. – М. : Машиностроение, 1965. – 318 с.
23. Иванов А.Н. Теплоиспользование в цементнообжигательных печах // Труды гипроцемента. 1980. – № 8. – С. 16 – 18.
24. Вальберг Г.С., Глозман А.А., Швыдкий М.Я. Новые методы теплового расчета испытаний вращающихся печей. М. : Стройиздат, 1973. – 111с.
25. Мазуров Д.Я. Теплотехническое оборудование заводов вяжущих материалов. М. : Стройиздат, 1982. – 288 с.
26. Shcherbina V., Shvachko D., Borshchik S. Heat exchange simulation in energy zones of a rotarykiln with change of heat resistance of the body // Technology audit and production reserves №6/1(50), 2019, pp. 36-41. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.189169>
27. Dhanjal, S.K., Barr, P.V. & Watkinson, A.P. The rotary kiln: An investigation of bed heat transfer in the transverse plane. *Metall and Materi Trans B* **35**, 1059–1070 (2004). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-004-0062-0>
28. F. Herz, I. Mitov, E. Specht & R. Stanev (2015) Influence of the Motion Behavior on the Contact Heat Transfer Between the Covered Wall and Solid Bed in Rotary Kilns, *Experimental Heat Transfer*, 28:2, 174-188, DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2013.854283>
29. A.I. Nafsunab, F.Herzae, E.Spechta, H.Komossac, S.Wirtzc, V.Schererc, X.Liud Thermal bed mixing in rotary drums for different operational parameters // *Chemical Engineering Science* Volume 160, 16 March 2017, Pages 346-353, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.00>
30. A.I.Nafsun F.Herz Experiments on the temperature distribution in the solid bed of rotary drums // *Applied Thermal Engineering* Volume 103, 25 June 2016, Pages 1039-1047, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.128>
31. Wei-NingWu, Xiao-YanLiu, ZhouHu, FabianHerz, Eckehard Specht. Measurement of the local material depth in a directly-heated pilot rotary kiln based on

- temperature fields // Powder Technology Volume 330, 1 May 2018, Pages 12-18, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.005>
32. Sri Silvia Agustini, Andreas Queck & Eckehard Specht (2008) Modeling of the Regenerative Heat Flow of the Wall in Direct Fired Rotary Kilns, *Heat Transfer Engineering*, 29:1, 57-66, DOI: <https://doi.org/10.1080/01457630701677171>
 33. Xiao Yan Liua Eckehard Spechthb Temperature distribution within the moving bed of rotary kilns: Measurement and analysis // *Process Intensification* Volume 49, Issue 2, February 2010, Pages 147-150, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.01.008>
 34. Zexuan Zhang, Ting Wang. Investigation of Combustion and Thermal-Flow Inside a Petroleum Coke Rotary Calcining Kiln With Potential Energy Saving Considerations // *J. Thermal Sci. Eng. Appl.* Mar 2013, 5(1): 011008 (10 pages), DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4007914>
 35. Zhao, L., and Wang, T., 2009, "Investigation of Potential Benefits of Using Bricks of High Thermal Capacity and Conductivity in a Rotating Calcining Kiln," *ASMEJ. Thermal Sci. Eng. Appl.*, 1 (1), p. 011009.10.1115/1.3192772, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3192772>
 36. Jochen, M., Eckehard, S., Xiaoyan L. (2004) Prediction of Rolling Bed Motion in Rotating Cylinders, *AIChE Journal*, 50, pp. 2783-2793, DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.10266>
 37. Herz, F.: Entwicklung eines mathematischen Modells zur Simulation thermischer Prozesse in Drehrohröfen. PhD Thesis University Magdeburg, Docupoint Verlag GmbH, Magdeburg, 2012 (ISBN 978-386912-075-1)
 38. Fabian Herz Prozess modellierung von direkt befeuerten Drehrohröfen zur Beurteilung der thermischen Belastung des Feuerfestmaterials // *Keramische Zeitschrift* volume 70, pages26–35(2018) DOI: <https://doi.org/10.1007/s42410-018-0003-1>
 39. Rayko Stanev, Iliyan Mitov, Eckehard Specht, Fabian Herz. Geometrical characteristics of the solid bed in a rotary kiln // *Journal of Chemical Technology*

and Metallurgy, 49, 1, 2014, 82-89, URL: <https://dl.uctm.edu/journal/node/j2014-1/14-Raiko%20Stanev-82-89.pdf>

40. Fabian Herz, Eckehard Specht, Abdulkadir Abdelwahab, Modeling and Validation of the Siderite Decomposition in a Rotary Kiln, *Energy Procedia*, Volume 120, 2017, Pages 524-531, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.193>
41. Арлюк Б.И., Фитерман М.Я. Теплообмен между газом, футеровкой и материалом во вращающейся печи // Инж.-физ.журнал. – 1982. – 42. – № 5, – С. 834.
42. Арлюк Б.И. Закономерности энерготехнических процессов во вращающихся печах // Инж.-физ.журнал. – 1983. – 44. – № 6, – С. 1014.
43. Арлюк Б.И. Анализ теплообмена во вращающихся печах // Инж.-физ.журнал. – 1984. – 46. – № 3, – С. 518 – 519.
44. Классен В.К. Повышение стойкости футеровки при использовании твердого топлива // Труды всесоюзного совещания по вопросам футеровки вращающихся печей цементной промышленности. М. : НИИЦемент, 1979, – С. 67 – 73.
45. Ходоров Е.И., Шморгуненко Н.С. Техника спекания шихт глиноземной промышленности. М. : Metallurgia, 1978. – 320 с.
46. Шубин В.И. Перспективы развития в области футеровок вращающихся печей цементной промышленности // Труды всесоюзного совещания по вопросам футеровки вращающихся печей цементной промышленности. М. : НИИЦемент, 1979, – С. 27 – 33.
47. Скобло Л.И., Шубин В.И., Казанович Б.Л., Дубинина Л.Н. Анализ стойкости футеровок вращающихся печей цементной промышленности // Труды всесоюзного совещания по вопросам футеровки вращающихся печей цементной промышленности. М. : НИИЦемент, 1979, – С. 10 – 27.
48. D.Opits. Warmeverbrauch vom – Zement – Kalk – Gips, 1981, № 1, P. 42 – 46.
49. Табунщиков Н.П. Теплоиспользование в известеобжигательных печах различных типов // Строительные материалы. – 1977. – № 11. – С. 20 – 21.

50. Табунщиков Н.П. Тепловое совершенствование вращающихся тубчатых печей // Строительные материалы. – 1984. – № 31. – С. 15 – 16.
51. Классен В.В. Уменьшение тепловых потерь горячей части печи эффективно снижает расход топлива // Цемент. 1978. – № 8. – С. 18 – 19.
52. Щубин В.И. и др. Повышение эффективности работы вращающихся печей // Цемент. – 1972. № 5. – С. 18 – 21.
53. Щубин В.И. и др. О факторах, влияющих на образование обмазки в зоне опекания цементных вращающихся печей // Труды всесоюзного совещания по вопросам футеровки вращающихся печей цементной промышленности. М. : НИИЦемент, 1979, – С. 14 – 24.
54. Инструкция по производству футеровочных работ во вращающихся печах цементной промышленности // М. МПСМ СССР. 1981. 162 с.
55. Патент США № 3343824 Rotary kiln. Richard R. Schneider, Pittsbyrgh, Pa., assignor to Harbison – Wolker Refractories Company, Pittsburgh.
56. Патент ГДР № 32184 C 80c 14/01 Baustein zum Herstellen einer fenerfesten Waud fur Feuerungsraume von Industriefen/Keller OfenBau Gmbh, Buschermohll Gregor.
57. Патент Великобритании № 1419026 INT cLF 27 D1/04 Refractory bricks / Anthoni Allan Carter.
58. А.с. 1141291 (СССР) Вращающаяся печь. / П.А.Староминская, Ю.М.Величко, Е.М. Тихонов, Е.А.Трофимин. – Оpubл. В Б.И., 1985. – № 7, с. 125.
59. Тимошенко С.П. Курс теории упругости. – Киев:Наукова думка, 1972. – 506с.
60. Цыбин И.П. Исследование термического разрушения огнеупоров с применением акустико-эмиссионного метода // Огнеупоры. – 1984. – № 7. – С. 15-20.
61. Перас А.Я. Оценка трещиностойкости и трещиностойчивости огнеупоров // Огнеупоры. – 1985. – № 9. – С. 11-15.
62. Щубин В.И. Термонапряжения в огнеупорах // Труды НИИЦемент, – 1970. – № 14. – С. 18-23.

63. Коршунов В.С. Расчет допустимых («критических») скоростей одностороннего нагрева огнеупорных изделий // Труды ВИО. – 1966. – № 6. – С. 283-293.
64. Шубин В.И. О температурном режиме службы огнеупоров в зонеспекания вращающихся цементных печей // Труды НИИЦемент. – 1970. – № 24. – С. 33-42.
65. Герек М. Давление футеровки на корпус шахтной и вращающейся печи // Труды Гипроцемента. – 1965. – № 31. – С. 93-123.
66. Цыбин И.П., Кузнецов А.Т. Температурное и напряженно-деформированное состояние огнеупорных материалов при плазменном напылении // Огнеупоры. – 1984. – № 4. – С. 32-40.
67. Рояк Л.А. Методы наложения в теории цилиндрических оболочек применительно к расету корпуса и футеровки вращающейся печи // Труды Гипроцемента. – 1963. – № 26. – С. 96-130.
68. Рояк Л.А. Методы расчета жесткости корпуса вращающейся печи с относительно тонкими подбандажными обечайками // Труды Гипроцемента. – 1963. – № 21. – С. 121-144.
69. Мурский Л.А. Воздействие массы футеровки на напряжение в корпусе печи // Цемент. – 1974. – № 10. – С. 18-19.
70. Boateng A., Rotary Kilns, Transport Phenomena and Transport Processes, Elsevier Publication, Oxford, 2008.
71. Шариков Ю.В. Математическое моделирование процессов в трубчатых вращающихся печах / Ю.В. Шариков, Ф.Ю. Шариков, О.В. Титов. – Deutschland: LAP LAMBERT Academic publishing, 2012. – 105 с.
72. Щербина В.Ю. Розвиток теорії та удосконалення технологічних процесів при виробництві будівельних матеріалів у високотемпературних агрегатах: дисертація ... доктора технічних наук : 05.17.08 / Щербина Валерій Юрійович; Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 398 с.
73. Левченко П. В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности : учебное пособие для вузов : для студентов, обучающихся по специальности

- "Химическая технология вяжущих материалов" - Изд. 2-е стер. / П.В. Левченко. - Москва : Альянс, 2007. – 366 с. : ил. ; 22 см. - Библиогр.: с. 364-365 (46 назв.)
74. В. Ю. Щербина, О. С. Сахаров, О. В. Гондлях, В. І. Сівецький. САПР. Застосування програмного комплексу ВЕСНА в розрахунках процесів і обладнання з врахуванням термосилових навантажень: Навчальний посібник – К.: Видавництво “ЕКМО”, 2009. – 180 с.
 75. Таймасов Б.Т. Технология производства портландцемента: учеб. пособие. Шымкент, Изд-во ЮКГУ, 2003. 297 с
 76. Мурский Л.А. Теоретическое и экспериментальное исследование деформации корпуса вращающейся печи и разработка методики расчета подбандажной обечайки, обеспечивающей стойкость футеровки. Автореф. Дис. ... канд. техн. Наук. – М. – 1975. – 16 с.
 77. Шубин В.И., Сергеева В.И. и др. Крупноформатные огнеупоры для футеровки цементных вращающихся печей // Труды всесоюзного совещания по вопросам футеровки вращающихся печей цементной промышленности. – М.: НИИЦемент, 1979. – С. 137-146.
 78. А.С. SU №1141291, МПК F27B 7/28. Вращающаяся печь. 23.02.85. Бюл. №7 (72) П.А.Староминская, Ю.М.Величко и др.
 79. Аксельрод Е.И. и др. Теплопроводность высокопористой изоляции из высокоглиноземного волокна //Огнеупоры. – 1979. -№10. – С. 8-13.
 80. Кацевич Л.С. Теорія теплопередачі і теплові розрахунки електричних печей. – М.: Металлургия, 1982. – 150с.
 81. Стрелов К.К. Структура и свойства огнеупоров. – М.: Металлургия, 1973. – 295 с.
 82. Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А. Теплофизические свойства огнеупоров. – М.: Металлургия, 1982. – 150 с.
 83. Мурашев В.И. Исследования по жароупорным железобетонным и армокирпичным конструкциям. М.: Госстройиздат, 1959, 343 с., ил

84. О. С. Сахаров, В. Ю. Щербина, О. В. Гондлях, В. І. Сівецький. САПР. Чисельне моделювання гідромеханічних процесів та НДС суцільних середовищ при термосилових навантаженнях: Навчальний посібник – К.: ТОВ “Поліграф Консалтинг”, 2007. – 180 с.
85. Рояк Д.А. Опытное исследование жесткости корпусов вращающихся печей // Цемент –1962. –№2. –с.11-13.
86. Исламов М.Ш. Проектирование и эксплуатация промышленных печей. – Л.: Химия, 1986. – 280 с., ил.
87. Силенок С.Г., Грицак Ю.С., Лысенко В.Д., Нефедов Д.Е. Механическое оборудование для производства вяжущих строительных материалов. М.: Машиностроение, 1969, 338 с., ил.
88. Швачко Д.Г., Щербина В.Ю. Методика оперативного розрахунку теплового режиму в фасонному вогнетриві / Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. №1(18), 2019, с. 102-109. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2019.171193>
89. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г. Моделювання процесу нестационарного теплообміну в футерівці обертових агрегатів. Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. №2(19), 2020, стр. 20-31. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2020.208052>.
90. Shvachko D.G., Shcherbina V. Yu., Borshchik S. A Thermal protection insulation in the lining of the rotary kilns. Modern engineering and innovative technologies. Karlsruhe, Germany. 2021, №16-01, 18-23 p. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-16-01-033.
91. Shvachko D.G., Shcherbina V. Yu., Li Dao, Borshchik S. A. About increasing the life of the supporting units of the drum furnaces. Karlsruhe, Germany. Modern engineering and innovative technologies. 2021, №17-01, 16-24 p. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-17-01-029.
92. Щербина В. Ю. Швачко Д.Г. Вплив теплоізоляції футерівки на теплообмін обертових апаратів. Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Хімічна

- інженерія, екологія та ресурсозбереження. №2(21), 2022, стр. 20-31. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2020.208052>.
93. Aainaa Izyan Nafsun, Fabian Herz, Eckehard Specht, Viktor Scherer & Siegmar Wirtz (2016) Heat Transfer Experiments in a Rotary Drum for a Variety of Granular Materials // *Experimental Heat Transfer*, 29:4, 520-535, DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2015.1036180>
 94. Шариков Ю.В. Математическое моделирование тепловых полей во фрагменте футеровки вращающейся печи / Ю.В. Шариков, А.А. Маркус // М.: Металлург. – 2013 - № 12, С. 23-26.
 95. Хрестоматія енергосбереження: Справ. / Под ред. В.Г.Лисиенко. М.: Теплотехник, 2003. 688 с.
 96. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
 97. Футеровка вращающихся печей цементной промышленности / Н.В. Ильина, Г.А. Сохацкая, В.К. Захаренков, И.П. Кулыгин; НИИЦемент, Гипроцемент. - Москва : Стройиздат, 1967. - 196 с.
 98. Ленцов И.А. Тепловой баланс вращающейся печи для обжига известняка и его анализ // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту. Сер. Технічні науки. 2014. Вип. 29. С. 103-115.
 99. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов : учеб. пособие для металлург. и хим.-технол. спец. вузов / Е.Ф. Чалых - М : Металлургия, 1990. - 235 с.
 100. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г. Підвищення енергоефективності обертових теплових агрегатів. ВЧЕНІ ЗАПИСКИ ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО Серія: Технічні науки Том 29 (68), № 4, Ч.2, 2018, стр. 68-72. URL:http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/4_2018/part_2/15.pdf
 101. Пат. №57792 Україна, МПК F27B 7/00. ОБЕРТОВА ПІЧ / Щербина В.Ю., Шишковський О.В., Саміленко Ю.М., Кривко Ю.В.; заявник та власник ЩЕРБИНА В.Ю. - №u201010558; заявл. 31.08.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл.

№ 5/2011.

102. Щербина В.Ю. Сахаров О.С., Самиленко Ю.В., Бобах В.В. Дослідження термомеханічних навантажень в обертовій печі з вихровим теплообмінником / Наукові вісті НТУУ "КПІ". 2009. № 6. С. 26-33.
103. Scherbyna, V., Gondlyakh, A., Sokolskiy, A., Shilovich, Y., Bulavina, N. (2023). Failure Analysis of Refractories in Rotary Kilns. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_53
104. Шашенко А.Н. Механика горных пород: Учебник для вузов / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко - К.: Новый друк, 2003.-400 с.
105. Шашенко О.М. Деформованість та міцність масивів гірських порід / О.М. Шашенко, О.О. Сдвижкова, С.М. Гапеев. - Д.: Національний гірничий університет, 2008. - 224 с.
106. Дидык Р.П. Физические основы прочности. Учебник / Р.П. Дидык, Е.В. Кузнецов, В.Н. Забара – Д.: Наука и образование, 2005. – 608 с.
107. Hoek E. Practical Rock Engineering / E. Hoek // London: Institution of Mining and Metallurgy. – 2002. – p. 325.
108. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum, B. Brown criterion – 2002 edition / Hoek E., Carranza-Torres C. , Corkum, B. // Proc. NARMS-TAC Conference. – Toronto. – 2002. – №1 . – P. 267-273.
109. Литовский Е.Я. Теплофизические свойства огнеупоров : Справочник / Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А. - М : Металлургия, 1982. - 150 с. : ил. ; 21 см. - Библиогр.: с. 135-149 (498 назв.)
110. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы : учебн. [для вузов] / Виктор Павлович Преображенский. — М. : Энергия, 1978. — 704 с.
111. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А. Н. Зайдель — Л. : Наука, 1968. — 95 с.

112. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк ; пер с англ. — М. : Мир, 1972. — 384 с.
113. Рабинович С. Г. Погрешность измерений / С. Г. Рабинович — Л. : Энергия, 1978. — 262 с.
114. Сергеев О. А. Метрологические основы теплофизических измерений / О. А. Сергеев — М. : Изд-во стандартов, 1972. — 154 с.
115. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий , И. А. Зограф : [2-е изд., перераб. и доп.]. — Л. : Изд-во Энергоатомиздат, 1991. — 304 с
116. Кункин С.Н., Востров В.Н., Кузнецов П.А., Рябинин А.Г. Математические методы обработки экспериментальных данных. Учебное пособие.— СПб.: Изд-во СПбГТУ, – 2002. – 68 с
117. Беседин П.В. Расчет потерь тепла через корпус вращающихся печей / П.В. Беседин, П.А. Тулубаев, М.В Нусс, Ю.Н.Киреев, Е.В. Мануйлов, В.В. Смирнов, С.В. Червоткин // Цемент и его применение. - 2001. -№ 2. - С. 13-17.
118. Справочник потребителя. Огнеупорные материалы для вращающихся печей цементной отрасли. – Ропчице. – 2004. – 184 с.
119. Краснощеков Е. А. Задачник по теплопередаче / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел – М. : Энергия, 1980. – 288 с.
120. Промтов М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества: Учебное пособие. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. 136 с.
121. Островский Г.М. (ред.), Абиев Р.Ш., Александров В.М., и др. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. II.-СП б.: НПО «Профессионал», 2006. 916 с.
122. Богатирьов, В. В. Теплові пульсації при обробці матеріалу в обертових печах : магістерська дис. : 133 Галузеве машинобудування / Богатирьов Володимир Валерійович. — Київ, 2023. — 146 с.

<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/59320>

123. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г., Ефименко Е.А. Дослідження напружено–деформованого стану обертового теплового агрегату. Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Серія Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. №1(17), 2018, стр. 65-71. DOI:<https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2018.143382>.

ДОДАТОК

ДОДАТОК А БЛОК-СХЕМА ТА ОПИС ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА FORTRAN РОЗРАХУНКУ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ Й ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ В НІЙ ДОДАТКОВОЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ

Програма Вона складається з наступних блоків:

Блок завдання початкових умов. У цьому блоці задаються: хімічний склад вихідного матеріалу, отримуваної сировини і палива, продуктивність печі, коефіцієнт витрати палива, ступінь зносу футеровки.

1. Блок визначення матеріального балансу печі. У цьому блоці визначається матеріальний баланс всієї пічної установки і кількість тепла, що віддається або сприймається матеріалом від теплоносія позонно.

2. Блок визначення температури газового потоку. У блоці визначаються ступінь вигорання палива до кінця 2 - ої зони, ентальпія газового потоку на межах зон і на виході з печі. По отриманих значеннях методом підбору визначається температура.

3. Блок визначення теплового балансу. У блоці розраховується тепловий баланс пічної установки.

4. Блок перевірки точності рахування. Якщо точність рахування незадовільна, то ЕОМ переходить до наступного розрахунку з новим значенням витрат палива.

5. Блок проводить розрахунок печі з додатковою теплоізоляцією у футеровці.

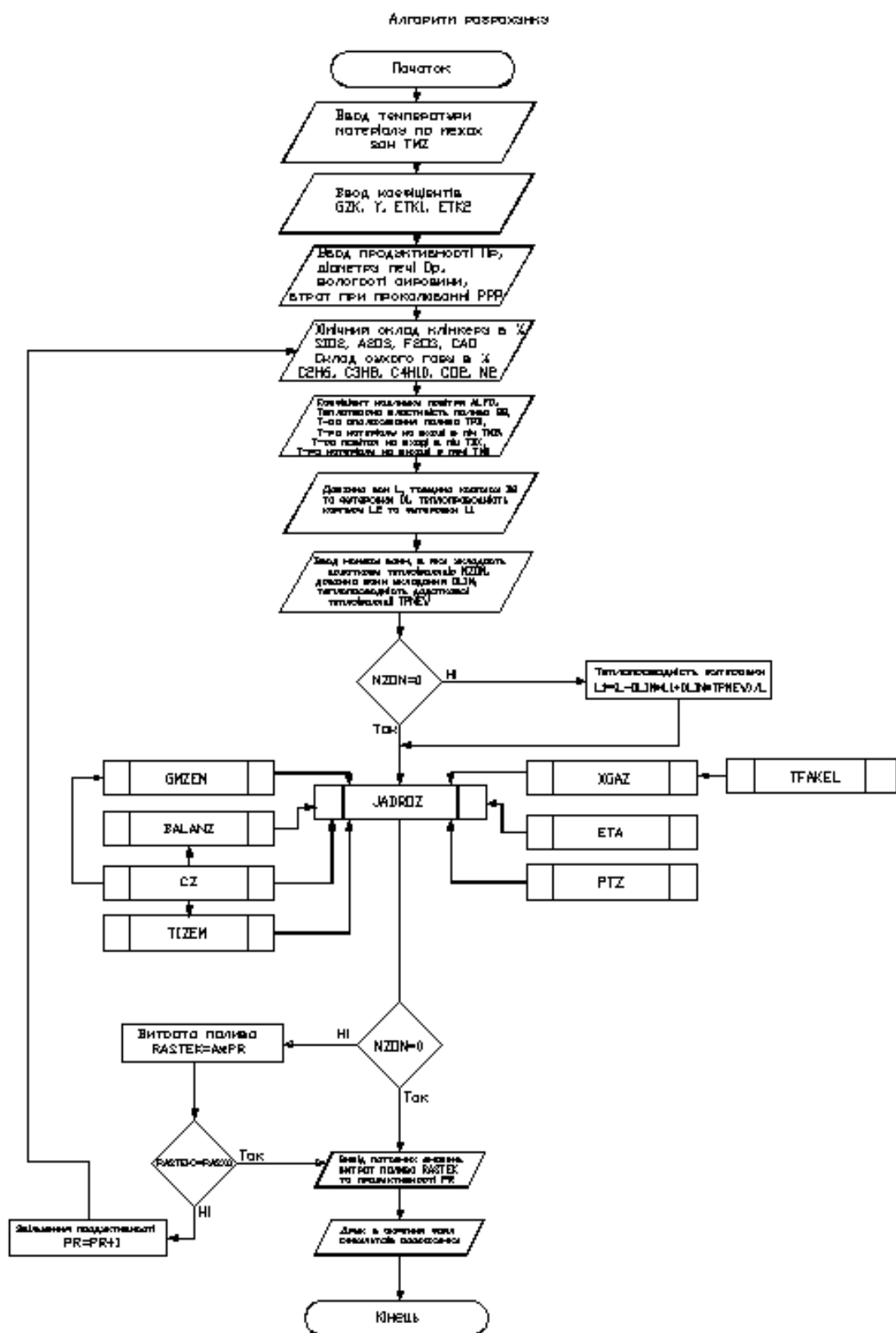


Рисунок А.1 – Блок схема

У схему входять підпрограми:

1. PTZ – підпрограма визначає ефективність використання палива при заданому тепловому опорі футеровки, і визначає втрати тепла в навколишнє середовище через корпус печей.

2. XGAZ – підпрограма визначення компонент газowego потоку в результаті горіння палива.

3. TFAKEL – підпрограма визначення теоретичної температури горіння полум'я. Створена на основі інтерполяції i - t таблиці / 2 / з урахуванням зміни коефіцієнта надлишку повітря від 1.0 до 3.0.

4. CZ – підпрограма визначення теплоємності. Підпрограма створена на основі інтерполяції таблиць теплоємності продуктів горіння, газу, повітря, вихідної сировини й одержуваних продуктів / 5, 7 /.

5. TIZEM – підпрограма визначення значення температури газowego потоку методом добору. У підпрограмі враховується газований склад на межі кожній із зон. Розрахунок виконується по (2.29).

6. PRINTZ – підпрограма виводу отриманих результатів у окремий файл. Якщо виконується блок 5, то виводяться такі данні:

- а) хімічний склад сировини, одержуваного матеріалу і газів;
 - б) витрата палива;
 - в) температура і ентальпія газowego потоку на межах зон і на виході з печі;
- тепловий баланс для печі без додаткової теплоізоляції і печі з додатковою теплоізоляцією при фактичному коефіцієнті надлишку повітря.

При запуску програми на екран виводиться діалогове вікно, зображене на Рисунок А.2. В якому міститься наступна інформація: теплопровідність футеровки (по зонах печі); продуктивність обертової печі; різниця між продуктивністю з додатковою теплоізоляцією і продуктивністю без додаткової теплоізоляції; температура газів, що відходять з печі; поточна витрата палива. При натисканні на кнопку EXIT виконується блок 6, тобто створюється окремий файл RESULT.TXT і в нього записується вся вихідна інформація.

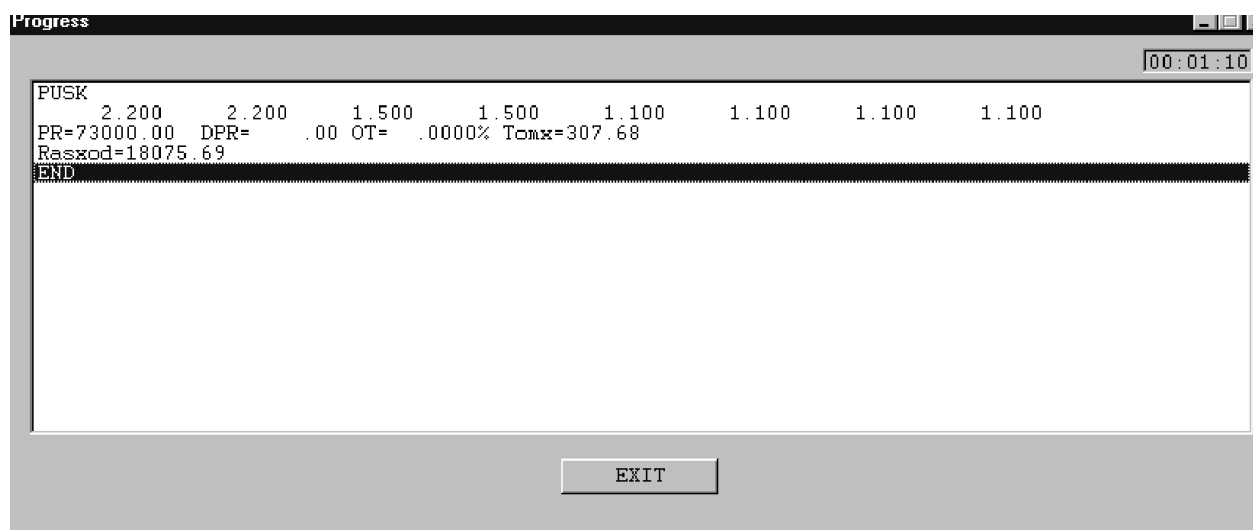


Рисунок А.2 – Діалогове вікно розробленої програми для дослідження впливу додаткової теплоізоляції

ДОДАТОК Б ПРОГРАМА ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПРОДУКТИВНОСТІ ПЕЧІ ПРИ ПІДВИЩЕНОМУ ТЕПЛОВОМУ ОПОРІ ФУТЕРІВКИ

```

INTERFACE TO SUBROUTINE Printf [C,ALIAS:'_Printf'] (txt)
CHARACTER*128 txt [REFERENCE]
END

C=====
SUBROUTINE RUN_FOR()
CALL Printf("PUSK ")
CALL ZMPECH
CALL Printf("END")
END

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

SUBROUTINE ZMPECH
REAL L1,L2,L,N2,MGO,TMZ(8)
CHARACTER*128 STR
COMMON
+ /GMAT/ PPP,WS,WZ,CO2M,CAOM,F2O3,A2O3,SIO2,CAO,GPLB,MGO,SO3
+ /A/     A,GPL,GMCO2,GW,GMH2O
+ /TEM/   TMB,TM(8)
+ /KJ/    Y,TKL,TPB,TBX,GZK,TS,GMC,KONTR
+ /SGAZ/  ALFD,CH4,C2H6,C3H8,C4H10,CO2,N2,H2O,TMAX
+ /QQQ/   QQ,Q(7),F(7)
+ /ET/    ETK1,ETK2
+ /PP/    T(9),D1(8),D2(8),L1(8),L2(8),P(8),L(8),DP,PR,T11(8),T22(8)

! Ввод значений температуры материала по границам зон
DATA TMZ/100.,400.,600.,950.,1300.,1400.,1300.,1100./

Y=0.639      ! Коэффициент тепловой переработки материала
! Коэффициенты, зависящие от вида вращающейся печиGZK=2.8ETK1=0.127
ETK2=0.47MGO=0.0
SO3=0.0      H2O=0.0

DO 10 I=1,8
10 TM(I)=TMZ(I)

! Ввод длин зон
DATA L/5.83, 11.65, 9.12, 16.40, 48.2, 36.4, 28.50, 28.90/

! Ввод теплопроводности футеровки
DATA L1/2.2, 2.2, 1.5, 1.5, 1.1, 1.1, 1.1, 1.1/

! Ввод толщины футеровки
C DATA D1/0.23, 0.23, 0.23, 0.23, 0.23, 0.23, 0.23, 0.23/
C DATA D1/0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20/
DATA D1/0.13, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13/
C DATA D1/0.06, 0.06, 0.06, 0.06, 0.06, 0.06, 0.06, 0.06/

! Ввод теплопроводности корпуса вращающейся печи
DATA L2/46.0, 46.0, 46.0, 46.0, 46.0, 46.0, 46.0, 46.0/

! Ввод толщины корпуса
DATA D2/0.03, 0.03, 0.03, 0.03, 0.03, 0.03, 0.03, 0.03/

```

```

      ! Значения расхода при введении дополнительной футеровки
      ! Значения определяются при нормальных условиях работы печи
C    RASX0=14523.9 !Это D1=0.23
C    RASX0=14771.3 !Это D1=0.2
C    RASX0=15712.8 !Это D1=0.13
C    RASX0=18075.7 !Это D1=0.06

OPEN(5,FILE="ISXDAN.TXT")
  READ(5,*)NZON      ! NZON - Номер зоны укладки (2-8), если 0 - без д.т.
  READ(5,*)DLIN      ! DLIN - Длина укладки дополнительной теплоизоляции
  READ(5,*)TPNEW     ! PNEW - Значение теплопроводности теплоизоляции
CLOSE(5)

      ! Определение теплопроводности футеровки в зоне установки
      ! дополнительной теплоизоляции
IF (NZON.NE.0) L1 (NZON) = ( L (NZON) -DLIN) *L1 (NZON) +DLIN*TPNEW) /L (NZON)

KONTR=0      ! Коэффициент контроля промежуточных результатов
TS=25.       ! Температура поступающего в печь материала      DP=5.0      !
Диаметр печи      PR=73000.    ! Производительность вращающейся печи
WS=40.       ! Влажность шлама
PPP=30.33    ! Потеря при прокаливании сырья      ! Содержание CaO2 и SiO2 в
сырье, в %  CAOM=44      CO2M=22.2    ! Химический состав клинкера в %  SIO2=22.05
A2O3=3.33
F2O3=4.3
CAO=66.4     ! Температуры:  воспламенения  топлива;  материала  на  входе  в
печь;
      ! воздуха, выбрасываемого из холодильника; клинкера, выходящего      !      из
холодильника
TPB=400.
TMB=25.
TBX=180.
TKL=60.

      ! Температура клинкера, выходящего из печи
TM0=1100.

ALFD=1.15    ! Коэффициент избытка воздуха QQ=8200.      ! Теплотворная
способность топлива

      ! Химический состав сухого газа в %
CH4=98.
C2H6=0.3      C3H8=0.1      C4H10=0.1      CO2=0.3      N2=1.2      KOLITR=0      20
CONTINUE

CALL XGAZ (QQ, TPB, KONTR)
CALL GMZEM (KONTR, GMC)
CALL BALANZ (1, T (8), TMB)
CALL JADROZ (TM (8), TMB, ALFD, TMAX)
CALL BALANZ (2, T (9), TMB)
IF (NZON.EQ.0) GOTO 30

IF ((KOLITR/50)*50.NE.KOLITR) GOTO 25      !Вывод промежуточных результатов
WRITE (STR, ' ("PR=", 2f10.3) ') PR, RASXTEK
CALL Printf (STR)
25 CONTINUE

      ! Определение расхода и производительности при введение в футеровку
      ! дополнительной теплоизоляции
RASXTEK=A*PR
IF (RASXTEK.GE.RASX0) GOTO 30
PR=PR+1.0      ! Изменение производительности
KOLITR=KOLITR+1

```

```

      GOTO 20

30 CONTINUE
   CALL PRNTZ(TPB)

      ! Вывод диалогового окна со значениями производительности,
      ! прироста производительности и температуры отходящих газов
      WRITE(STR, '(8f10.3)')
+      L1(1), L1(2), L1(3), L1(4), L1(5), L1(6), L1(7), L1(8)
      CALL Printf(STR)
      WRITE(STR, ' ("PR=", f8.2, "   DPR=", f7.2, "   OT=", f7.4, "% Totx=", f6.2) ')
+      PR, PR-73000, (PR/73000-1)*100, T(9)
      CALL Printf(STR)

      IF(NZON.EQ.0) THEN
      WRITE(STR, ' ("Rasxod=", f8.2) ') A*PR
      CALL Printf(STR)
      END IF

      RETURN

      END

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

      SUBROUTINE JADROZ(TM0,TMB,ALFD,TMAX)
C
C      СИСТЕМА НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ
C      ИММИТИРУЮЩИХ ТЕПЛОВУЮ РАБОТУ ПЕЧИ
C
      REAL LALF,L1,L2,L
      DIMENSION P1(8),M(9)
!      CHARACTER*128 STR
      COMMON
1  /RRR/ VCO2N,VO2N,VN2N,VH2ON,LALF
2  /A/  A,GPL,GMCO2,GW,GMH2O
3  /QQQ/ QQ,QQ1,QQ2,QQ3,QQ4,QQ5,QQ6,QQ7,F(7)
4  /GMI/ GM1,GM2,GM3,GM4,GM5,GM6,GM7,GM8,GM
5  /PP/  T(9),D1(8),D2(8),L1(8),L2(8),P(8),L(8),DP,PR,T11(8),T22(8)
C /KJ/  Y,TKL,TPB,TBX,GZK,TS,GMC,KONTR
      DATA M,R /9*0,6000./,TOTX,NM /100.,0/
      CALL PTZ(1,700.)
      CALL PTZ(2,1400.)
      DO 10 I=3,8
10  P(I)=20.
      V=VCO2N+VO2N+VN2N+VH2ON
      DP1=0.
      DO 5 J=1,8
5   DP1=DP1+D1(J)+D2(J)
      DP1=DP1/8.
      W=V/(3600.*0.785*(DP-2.*DP1)**2)
      QQ6=0.03
15  TE=TOTX
      NM=NM+1

20 CONTINUE

!      Вывод диалогового окна со значениями теплосодержания газового потока,
!      температуры газа по границам зон и количества тепла передаваемого
!      материалу
!
!      WRITE(STR, '(9f10.3)') Q0,Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7,Q8
!      CALL Printf(STR)

```

```

!      WRITE(STR, '(9f10.3)') T(2), T(3), T(4), T(5), T(6), T(7), T(8), TOTX
!      WRITE(STR, '(9f10.3)') GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM8, R
!      CALL Printf(STR)

      A=R/PR          ! Определение расхода тепла на обжиг
      VB=LALF*A/ALFD
      Q1=VB*CZ(4, TPB)+A*CZ(5, TPB)
      QQ5=(GZK-LALF*A)*CZ(4, TBX)
      Q0=CZ(1, TM0)-CZ(1, TKL)-QQ5+CZ(5, TMB)*A+CZ(4, TMB)*A*LALF
      M(1)=M(1)+1
      Z=Q1-Q0+GM2+P(1)
      P38=0.
      DO 30 I=3, 8
      P38=P38+P(I)
30  P1(I)=P(I)

!      IF(M(1).GT.4000) GOTO 45
35  E=ETA((DP-2.*DP1), (W*R), TMAX, (QQ*R))
      R1=R
      DOP=(CZ(5, TMB)+CZ(4, TMB)*LALF)*A+GMC*CZ(1, TS)+GW*TS
      R=(GM+P(1)+P(2)+P38)*PR/QQ/E
      IF(ABS(R1-R).GT.0.01) GOTO 20
      ACO2=VCO2N*A+GMCO2/1.977
      AH2O=GW/0.805+VH2ON*A+GMH2O/0.805/1640.
      QQ3=ACO2*CZ(6, TE)+VN2N*A*CZ(7, TE)
1   +VO2N*A*CZ(8, TE)+AH2O*CZ(9, TE)
      QQ3=QQ3/TOTX
      TOTX=(QQ*A-QQ1-QQ2-QQ4-QQ5-P(1)-P(2)-P38+DOP)/(QQ3+QQ6)
      IF(ABS(TE-TOTX).GT.1.000) GOTO 15
      Q3=Q1+QQ*A-(GM-GM1-GM8+P38-P(8)+P(2))*(1.-Y)
1   -(GM2+GM3+P(2)+P(3))*Y-Z
      TE3=2300.
      CALL TIZEM(TE3, Q3, 3)
      CALL PTZ(3, TE3)
      IF(ABS(P(3)-P1(3)).GT.1.) GOTO 20
      Q4=Q3-(GM4+P(4))*Y
      TE4=2000.
      CALL TIZEM(TE4, Q4, 4)
      CALL PTZ(4, TE4)
      IF(ABS(P(4)-P1(4)).GT.1.) GOTO 20
      Q5=Q4-(GM5+P(5))*Y
      TE5=1800.
      CALL TIZEM(TE5, Q5, 5)
      CALL PTZ(5, TE5)
      IF(ABS(P(5)-P1(5)).GT.1.) GOTO 20
      Q6=Q5-(GM6+P(6))*Y
      TE6=1500.
      CALL TIZEM(TE6, Q6, 6)
      CALL PTZ(6, TE6)
      IF(ABS(P(6)-P1(6)).GT.1.) GOTO 20
      Q7=Q6-(GM7+P(7))*Y
      TE7=1225.
      CALL TIZEM(TE7, Q7, 7)
      CALL PTZ(7, TE7)
      IF(ABS(P(7)-P1(7)).GT.1.) GOTO 20
      CALL PTZ(8, TOTX)
      IF(ABS(P(8)-P1(8)).GT.1.) GOTO 20
37  PBALAN=QQ*A-(QQ1+QQ2+QQ4+QQ5+(QQ3+QQ6)*TOTX)+DOP
      QQ7=0.
      DO 40 I=1, 8
      QQ7=QQ7+P(I)
40  CONTINUE
      DE=PBALAN-QQ7

```

```

      IF (KONTR.EQ.1) PRINT 70,R,TOTX,QQ7,PBALAN,DE
80  CONTINUE
      IF (KONTR.EQ.1) PRINT 90,M(1),NM

      RETURN
45  PRINT 50
      STOP

50  FORMAT(///12X,'ПРОГРАММА ЗАЦИКЛИЛАСЬ.  ПРОВЕРЬТЕ',
1    ' ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ !!!')
70  FORMAT(2X,'R,TOTX,P(PAC),P(БАЛ),DP',2X,6F10.3)
90  FORMAT(22X,'M(1)=' ,I5,5X,'NM=' ,I5/22X,23(' '*'))
      END

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

      SUBROUTINE BALANZ(K,T8,TMB)
C
C      РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ПЕЧНОЙ УСТАНОВКИ
C
      COMMON /KJ/ Y,TKL,TPB,TBX,GZK,TS,GMC,KON
1    /BAL/ GMC3,GCC3,GC3S,GC2S,GC3A,GC4AF
      C /RRR/ VCO2N,VO2N,VN2N,VH2ON,LALF      C /QQQ/ QQ,Q(7),F(7)      4 /A/
A,GPL,GMCO2,GW,GMH2O
      REAL LALF
      Q(1)=GMH2O+GMC3+GCC3+25-(GC3S+GC2S+GC3A+GC4AF)
      Q(2)=GW*595.
      Q(4)=CZ(1,TKL)
      IF(K.EQ.1) GOTO 10
      Q(5)=(GZK-LALF*A)*CZ(4,TBX)
      ACO2=VCO2N*A+GMCO2/1.977
      AH2O=GW/0.805+VH2ON*A+GMH2O/0.805/1640.
      Q(3)=ACO2*CZ(6,T8)+VN2N*A*CZ(7,T8)
1    +VO2N*CZ(8,T8)*A+AH2O*CZ(9,T8)
      Q(6)=0.03*T8
      DOP=(CZ(5,TMB)+CZ(4,TMB)*LALF)*A+GMC*CZ(1,TS)+GW*TS
      DO 5 I=1,7
5    F(I)=Q(I)*100./(A*QQ+DOP)
10  RETURN
      END

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

      FUNCTION CZ(N,T)
C
C      ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ КОМПОНЕНТОВ
C
      COMMON /GMAT/ PPP,WS,WZ,CO2M,CAOM,F2O3
1    ,A2O3,SIO2,CAO,GPLB,MGO,SO3
      C6=9.9E-5*T+0.4274
      C7=2.8E-5*T+0.3029
      GOTO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10),N
1    IF(T.GE.960.) GOTO 2
      T1=T
      IF(T.GE.600.) T1=600.
      CZ=0.01*(CO2M*(1.69E-4*T1+0.3923)+CAOM*(0.17767
1    +1.025E-4*T1 -9.1667E-8*T1**2))*T
      RETURN
2    CZ=(3.118E-8*T**2-1.8374E-5*T+0.2262)*T
      RETURN
3    CZ=0.
      RETURN
4    CZ=(3.2167E-5*T+0.30422)*T

```

```

      RETURN
5  CZ=(2.825E-4*T+0.37)*T
      RETURN
6  CZ=C6*T
      RETURN
7  CZ=C7*T
      RETURN
8  CZ=(3.46E-5*T+0.318)*T
      RETURN
9  CZ=(6.175E-5*T+0.35)*T
      RETURN
10 CONTINUE
    CZ=0 ! (C7*CN2O/100+C6*CO2O/100)*T
      RETURN
      END

```

!!

```

      SUBROUTINE GMZEM(KONTR,GMC)
C
C  РАСЧЕТ ТЕПЛА ОТДАВАЕМОГО ИЛИ ПОЛУЧАЕМОГО МАТЕРИАЛОМ
C
      COMMON
1  /BAL/  GMC3,GCC3,GC3S,GC2S,GC3A,GC4AF
2  /GMAT/  PPP,WS,WZ,CO2M,CAOM,F2O3,A2O3,SIO2,CAO,GPLB,MGO,SO3
4  /TEM/  TMB,TM8,TM7,TM6,TM5,TM4,TM3,TM2,TM0
5  /GMI/  GM1,GM2,GM3,GM4,GM5,GM6,GM7,GM8,GM
6  /GMP/  GMP1,GMP2,GMP3,GMP4,GMP5,GMP6,GMP7,GMP8
7  /A/  A,GPL,GMCO2,GW,GMH2O
      GMP1=1.
      GMP2=1.
      GMP3=1.
      WZ=1.0
      GPLB=0.0074
      GMC=100./(100.-PPP)+GPLB
      GPL=GMC*0.2
      GMW=GMC*(WS/(100.-WS)-WZ/(100.-WZ))
      GW1=GMC*WZ/(100.-WZ)
      GW=GMC*WS/(100.-WS)
      GMP8=GMC*1.02
      R8=GMW*595.+GMP8*CZ(1,TM8)+GW1*TM8
      GM8=R8-GMC*CZ(1,TMB)-GW*TMB
      R7=GW*595.
      GMP7=GMC*1.02+GPL*0.365
      GM7=R7+GMP7*CZ(1,TM7)-R8
      GCD=GMC-GW1
      GMCO2=GCD*CO2M/100
      GMH2O=GCD*(PPP-CO2M)/100*1640.
      GMC3=GCD*(CO2M-CAOM*44./56.)*84.3/440.*334./10.
      IF(GMC3.LE.0.0) GMC3=0.0
      GCC3=GCD*CAOM/56*425
      GC2F=1.7*F2O3*27.8/100.
      GMP6=GMP7-GMH2O/1640./0.805-GMCO2*0.17-GPL*0.1
      R6=R7+GMH2O+GMC3+0.15*GCC3-GC2F
      GM6=R6+GMP6*CZ(1,TM6)-(GM7+R8)
      GC5A3=1.91*A2O3*54.4/100.
      GC2S=2.87*SIO2*1.71
      GMP5=GMP6-GMCO2*0.67-GPL*0.4
      R5=R6+GCC3*0.7-GC2S*0.8-GC5A3
      GM5=R5+GMP5*CZ(1,TM5)-(R6+GMP6*CZ(1,TM5))
      GMP4=GMP5-GMCO2*0.15
      GC3S=(4.07*CAO-7.6*SIO2-6.72*A2O3
1  -1.43*F2O3)*0.01*126.

```



```

GC4AF=3.04*F2O3*0.01*26.
GC3A=(2.65*A2O3-1.69*F2O3)*0.01*14.6
R4=R5+0.15*GCC3+40+GC2F+GC5A3
1  -GC3A-GC4AF-GC2S-GC3S*0.25*0.24+0.8*GC2S
  GM4=R4+GMP4*CZ(1, TM4)-(R5
1  +GMP5*CZ(1, TM5)/600.*950.)
  R3=R4+10-0.75*GC3S
  GM3=R3+CZ(1, TM3)-(R4+GMP4*CZ(1, TM4))
  GM2=CZ(1, TM2)-CZ(1, TM3)
  GM1=CZ(1, TM0)-CZ(1, TM2)
  GM=GM1+GM2+GM3+GM4+GM5+GM6+GM7+GM8
  IF (KONTR.EQ.1) PRINT 10, GM1, GM2, GM3, GM4, GM5, GM6, GM7, GM8, GM
10 FORMAT(2X, 'GMZEM GM(1-8), GM', 9E10.3)
  RETURN
  END

```

|||||

```

SUBROUTINE PRNTZ (TPB)

ПОДПРОГРАММА ВЫВОДА ДАННЫХ ПО РАСЧЕТУ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЦЕМЕНТНОЙ ПЕЧИ НА ПЕЧАТЬ
В ОТДЕЛЬНЫЙ ФАЙЛ (RESULT.TXT)

REAL L,L1,L2,F2(8),TEM(8),N2,MGO,Q1(8),P1(8)
COMMON
1 /PP/ T(9),D1(8),D2(8),L1(8),L2(8),P(8),L(8),DP,PR,T11(8),T22(8)
3 /QQQ/ QQ,Q(7),F(7)
4 /SGAZ/ ALFD,CH4,C2H6,C3H8,C4H10,CO2,N2,H2O,TMAX
6 /A/ A,GPL,GMCO2,GW,GMH2O
7 /GMAT/ PPP,WS,WZ,CO2M,CAOM,F2O3,A2O3,SIO2,CAO,GPLB,MGO,SO3

OPEN(9,FILE='RESULT.TXT')

TOTX=T(9)
QQ7=Q(7)
V=4.19
QQ1=QQ*V
RAS=A*PR
DO 10 I=1,8
F2(I)=100./QQ7 *P(I)
P1(I)=P(I)*V
IF(I.LT.8)Q1(I)=Q(I)*V
10 TEM(I)=T(I+1)
WRITE (9, 90)SIO2,A2O3,F2O3,CAO,MGO,SO3
WRITE (9, 100)WS,PPP,CO2M,CAOM
WRITE (9, 110)PR
WRITE (9, 120)CH4,C2H6,C3H8,C4H10,CO2,N2,H2O
WRITE (9, 130)QQ1,ALFD,TPB
WRITE (9, 140)(D1(I),L1(I),I=1,8)
WRITE (9, 150)RAS,TMAX,A,TOTX
WRITE (9, 160)(Q1(J),F(J),J=1,7)
WRITE (9, 170)(I,P1(I),F2(I),T11(I),T22(I),TEM(I),I=1,8)
CLOSE(9)
RETURN

90 FORMAT(/46X,'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ'////
1 15X,'ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КЛИНКЕРА В %'//
2 10X,'SIO2 ',6X,'AL2O3',6X,'F2O3',8X,'CAO',8X,'MGO',
3 7X,' SO3 '/11X,F4.1,8X,F3.1,8X,F3.1,7X,F4.1,
4 8X,F3.1,8X,F3.1)

100 FORMAT(/20X,'ВЛАЖНОСТЬ МАТЕРИАЛА -',F11.2,' %'
1 /20X,'ПОТЕРИ ПРИ ПРОКАЛИВАНИИ -',F7.2,' %'
2 /20X,'СОДЕРЖАНИЕ СО2 В СЫРЬЕ -',F8.2,' %'

```

```

3/20X,'СОДЕРЖАНИЕ САО В СЫРЬЕ -',F8.2,' %')
110 FORMAT(//20X,'ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПЕЧИ -',F9.1,' КГ/Ч')
120 FORMAT(///30X,'СОСТАВ ГАЗА В %'/
1 /10X,'CH4 ',5X,'C2H6',5X,'C3H8',5X,'C4H10',
2 5X,'CO2',5X,'N2',5X,'H2O'
3 /10X,F4.1,5X,F4.1,5X,F4.1,5X,F5.1,
4 5X,F3.1,4X,F3.1,5X,F3.1)
130 FORMAT(///20X,'ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ГАЗА..',13('.'),F8.2,
1 ' КДЖ/НМЗ'
2 /20X,'КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА..',11('.'),F4.2
3 /20X,'ТЕМПЕРАТУРА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГАЗА..',6('.'),F6.2,
4 ' ГРАД')
140 FORMAT(///20X,'ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЕ ФУТЕРОВКИ ПОЗОННО'
A , ' (ТОЛЩИНА/КОЭФ.ТЕПЛОПРОВ.) '
1 //8X,'1',11X,'2',11X,'3',11X,
2 '4',11X,'5',11X,'6',11X,'7',11X,'8'
3 /2X,8(F6.3,'/',F5.3))
150 FORMAT(///20X,'ПОЛУЧЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ'/20X,19('*')
1 ///10X,'РАСХОД ГАЗА.',33('.'), F7.1,' НМЗ/Ч'
2 /10X,'ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ ПЛАМЕНИ.',3('.'),F6.1
3 , ' ГРАД'/10X,'УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА.',24('.'),
4 F5.3,' НМЗ/КГ КЛ'
5 /10X,'ТЕМПЕРАТУРА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ.',18('.'),
6 F5.1,' ГРАД')
160 FORMAT(///20X,'ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЕЧИ'
1 /53X,'КДЖ',11X,'% '
2 /2X,'ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ КЛИНКЕРООБРАЗОВАНИЯ',10X,2F12.2,
3 /2X,'ПОТЕРИ ТЕПЛА НА ИСПАРЕНИЕ ВОДЫ',
A ' ИЗ СЫРЬЯ',6X,2F12.2
4 /2X,'ПОТЕРИ ТЕПЛА С ОТХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ',13X,2F12.2
5 /2X,'ПОТЕРИ ТЕПЛА С КЛИНКЕРОМ',21X,2F12.2
6 /2X,'ПОТЕРИ ТЕПЛА С ВОЗДУХОМ (ИЗ ХОЛОДИЛЬНИКА)',4X,2F12.2
7 /2X,'ПОТЕРИ ТЕПЛА С УНОСОМ',24X,2F12.2
8 /2X,'ПОТЕРИ ТЕПЛА ЧЕРЕЗ КОРПУС В О.С.',13X,2F12.2)
170 FORMAT(///15X,'ПОТЕРИ ТЕПЛА В О.С. ПОЗОННО'
1 //40X,'ТЕМПЕРАТУРА НА',5X,'ТЕМПЕРАТУРА',5X,'ТЕМПЕРАТУРА ГАЗОВОГО'
2 /18X,'КДЖ', 9X,'% ',9X,'ОГН.ПОВ.ОГНЕУП.',4X,'КОРПУСА',
3 9X,'ПОТОКА В КОНЦЕ ЗОНЫ',
4 8(/2X,I1,'-я ЗОНА',5X,F6.2,6X,F6.2,2F17.1,12X,F6.1)///)
END

```

!!

SUBROUTINE PTZ(N,TE)

C ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЗОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ЧЕРЕЗ КОРПУС ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ
C (TE) - ТЕМПЕРАТУРА ГАЗОВОГО ПОТОКА В КОНЦЕ ИССЛЕДУЕМОЙ ЗОНЫ
C (N) - НОМЕР ЗОНЫ

```

REAL L1,L2,L
COMMON/PP/T(9),D1(8),D2(8),L1(8),L2(8)
P      ,P(8),L(8),DP,PR      ,T11(8),T22(8)
DATA T1,T2,S,S1,PI/300.,100.,273.,100.,3.141592/
RAD=DP/2.
ALFK=18.8
CB=1.18
RC=D1(N)/L1(N)+D2(N)/L2(N)
5 T3=T2
T5=T1
E =3.5+2.*0.062*T2
E1=3.5+0.062*T2
T(N+1)=TE

```

```

TG=0.5*(T(N)+T(N+1))
F=T2*(1+RC*E1)-T1
F1=-1.
F2=1+RC*E
G=ALFK*(TG-T1)+CB*((TG+S)/S1)**4-((T1+S)/S1)**4)-T2*E1
G1=-(ALFK+CB*0.04*((T1+S)/S1)**3)
G2=-E
AJ=F1*G2-F2*G1
T1=T1+(G*F2-F*G2)/AJ
T2=T2+(F*G1-F1*G)/AJ
IF (ABS(T5-T1).GT.1.) GOTO 5
IF (ABS(T3-T2).GT.1.) GOTO 5
P(N)=2*PI*RAD*L(N)/PR*(T1-T2)/RC
T11(N)=T1
T22(N)=T2
RETURN
END

```

!!

```

SUBROUTINE TIZEM(TG,Q,M)
C
C ПОДПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПО ГРАНИЦАМ ЗОН
C
COMMON/RRR/ VCO2N,VO2N,VN2N,VH2ON,AL2F
DIMENSION T(25)
COMMON /A/ A,GPL,GMCO2,GW,GMH2O /VG/V1,V2,V3,V4,V5
G=1.977
VP=0.
VCO2=0.
VH2O=0
V1=0.
IF(M.GT.2) GOTO 2
V2=0.
V3=0.
V4=0.
V5=0.
V1=AL2F*A
RETURN
2 T(1)=TG
VO2P=VO2N*A
VN2P=VN2N*A
VH2OP=VH2ON*A
VCO2P=VCO2N*A
IF(M.GE.4) VCO2=GMCO2*0.15/G
IF(M.LT.5) GO TO 3
VP=GPL*0.4
VCO2=VCO2+GMCO2*0.67/G
IF(M.LT.6) GO TO 3
VP=GPL*0.1
VH2O=GMH2O/1640./0.805
IF(M.LT.7) GO TO 3
VP=GPL*0.37
VH2O=VH2O+GW/0.805*0.07
IF(M.LT.8) GO TO 3
VP=GPL*0.5
VH2O=VH2O+GW/0.805*(1.-0.07)
VCO2=GMCO2/G
3 CONTINUE
VCO2P=VCO2P+VCO2
VH2OP=VH2OP+VH2O
V2=VCO2P
V3=VO2P

```

```

V4=VN2P
V5=VH2OP
IF (ABS (Q) .LT.0.01) RETURN
K=1
5 CONTINUE
DT=100.
IF (K.EQ.2) DT=10.
IF (K.EQ.3) DT=1.
IF (K.EQ.4) DT=0.1
J=1
D1=1.E8
10 J=J+1
T (J)=T (J-1) -DT
QH=VCO2P*CZ (6,T (J) )+VN2P*CZ (7,T (J) )+VO2P*CZ (8,T (J) )
1 +VH2OP*CZ (9,T (J) )+VP*CZ (1,T (J) )
D=ABS (Q-QH)
PE=AMIN1 (D,D1)
D1=PE
IF (D.LE.PE) GO TO 10
T (1)=T (J-2)
IF (J.LT.3) T (1)=T (1)
K=K+1
IF (K.LT.5) GO TO 5
TG=T (J-1)
RETURN
END

```

```

FUNCTION ETA (D,W,T,Q)
C
C   ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
C
COMMON /ET/ETK1,ETK2
DATA E,G/0.5,4.9E-8/
5 E1=E
F=(E/ETK1)**3*Q/(G*T**4)
EM=(ETK2*(F/D**2)**0.1)
S=SQRT (Q/(G*T**4*F))*SQRT (G*T**3/W**0.8)
E=1./(EM+S)
IF (ABS (E-E1) .GT.1.E-5) GOTO 5
ETA=E
RETURN
END

```

```

FUNCTION TFAKEL (ALF,X)
C
C   ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ ФАКЕЛА
C
T1=1.666*X+596.2
T2=1.76*X+549.6
T3=1.84*X+511.
T4=1.86*X+508.
T5=1.88*X+505.
T6=1.90*X+502.
T7=1.97*X+470.88
T8=2.00*X+456.6
T9=2.08*X+436.6
IF (ALF.LE.3.0) GO TO 5
ALF=3.0
PRINT 10
10 FORMAT (5X,'ПРОГРАММОЙ ЗНАЧЕНИЕ ',
1 'КОЭФ. ИЗБЫТКА ВОЗДУХА БОЛЬШЕ 3.0',
2 'НЕ ПРЕДУСМОТРЕНО'/6X,'КОЭФФИЦИЕНТУ ИЗБЫТКА',

```

```

3 ' ВОЗДУХА ПРИСВОЕНО ЗНАЧЕНИЕ 3.0')
5  A=ALF-1
   IF (A.GE.0.0) T=T1+(T2-T1)*(ALF-1.0)/0.1
   IF (A.GE.0.1) T=T2+(T3-T2)*(ALF-1.1)/0.1
   IF (A.GE.0.2) T=T3+(T4-T3)*(ALF-1.2)/0.1
   IF (A.GE.0.3) T=T4+(T5-T4)*(ALF-1.3)/0.1
   IF (A.GE.0.4) T=T5+(T6-T5)*(ALF-1.4)/0.1
   IF (A.GE.0.5) T=T6+(T7-T6)*(ALF-1.5)/0.2
   IF (A.GE.0.7) T=T7+(T8-T7)*(ALF-1.7)/0.3
   IF (A.GE.2.0) T=T8+(T9-T8)*(ALF-2.0)/1.0
   T FAKEL=T
   RETURN
   END

```

!!

```

SUBROUTINE XGAZ(Q,TPB,KONTR)
C
C   ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТ ГАЗОВОГО ПОТОКА
C
   REAL L0,IOB,L,LALF,N2
   COMMON
C /SGAZ/ ALFD,CH4,C2H6,C3H8
2         ,C4H10,CO2,N2,H2O,TMAX
C /RRR/ VCO2N,VO2N,VN2N,VH2ON,LALF
   ALF=ALFD
   CH4=CH4*(1.-H2O/100.)
   IF(Q.NE.0.) GO TO 10
   Q=85.55*CH4+152.26*C2H6+217.9*C3H8
   1+283.38*C4H10
10 L0=0.0476*(2*CH4+3.5*C2H6
   1 +5*C3H8+6.5*C4H10)
   L=1.016*L0
   LALF=L*ALFD
   VCO2N=0.01*(CO2+CH4+2*C2H6
   1 +3*C3H8+4*C4H10)
   VN2N=0.01*N2+0.79*LALF      VO2N=0.21*(ALF-1.)*L0
VH2ON=0.01*(2*CH4+3*C2H6+4*C3H8
   1 +5.*C4H10+H2O+1.6*LALF)
   VALF=VCO2N+VH2ON+VN2N+VO2N
   IOB=(Q+ALF*L*TPB*0.34091)/VALF
   TMAX=T FAKEL(ALF,IOB)
   IF(KONTR.NE.0)
1PRINT 20,VCO2N,VN2N,VO2N,VH2ON,VALF,TMAX
   RETURN
20 FORMAT(2X,'ИЗ XGAZ',6E12.5)
   END

```



```

for(i=0;i<nx;i++)
  for(j=0;j<ny;j++)
  {
    TT1[i][j] = T0;
    if(j==0) TT1[i][j] = T0;
    if(j==ny-1) TT1[i][j] = TF;
  }

//////// РЕШЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ
// Определение температуры верхней границы
for(i=0;i<nx;i++)
{
  TVG[i]=TF; if(i<PodMt) TVG[i]=TF;
  AIV[i]=100.0; //Теплоотдача для верхнего слоя
}

// Початок ітерацій
do
{S=0.;
  KITR++;
  for(i=0;i<nx;i++)
  {
    for(j=0;j<ny;j++)
    {
      // Розрахункова формула
      La11=(LAM(TT1[i+1][j])+LAM(TT1[i][j]))*0.5;
      La12=(LAM(TT1[i][j])+LAM(TT1[i-1][j]))*0.5;
      La21=(LAM(TT1[i][j+1])+LAM(TT1[i][j]))*0.5;
      La22=(LAM(TT1[i][j])+LAM(TT1[i][j-1]))*0.5;
      if(j==0){C=(3.5+0.062*TT1[i][j])/LAM(TT1[i][j])*dy;TPR=(TT1[i][j+1]+C*TOC)/(1+C);}
    else
      if(j==ny-1) TPR=TVG[i]+(TT1[i][j-1]-TVG[i])/(AIV[i]*dy/LAM(TT1[i][j])+1); else
      if(i==0)
      TPR=((La11*TT1[i+1][j]+La12*TT1[nx-2][j])/dx/dx+(La21*TT1[i][j+1]+La22*TT1[i][j-1])/dy/dy)/
      ((La11+La12)/dx/dx+(La21+La22)/dy/dy); else
      if(i==nx-1) TPR=TT1[0][j]; else
      TPR=( (La11*TT1[i+1][j] + La12*TT1[i-1][j])/dx/dx+(La21*TT1[i][j+1]+ La22*TT1[i][j-1])/dy/dy)
      /((La11+La12)/dx/dx + (La21+La22)/dy/dy);
      D=fabs(TPR-TT1[i][j]);
      if(S < D) S=D;
      TT1[i][j]=TPR;
    }
  }
}
// Вивід поточного номера ітерації і значення
printf(" ITERATION %d S=%f\n",KITR,S);

```

```

    }
    while(S>E); // Перевірка умови закінчення ітерації
    //////////// Кінець ітерацій
    // Переприсвоєння
    for(i=0;i<nx;i++)
    for(j=0;j<ny;j++)
    TCT[i][j]=TT1[i][j];

    // В файл РЕШЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ
    /* fprintf(f," Стационарный режим\n");
    for(j=ny-1; j>-1; j--)
    { fprintf(f,"");
        SuCT=0.0;
        for(i=0;i<nx;i=i+2) // Кратное 20
        {
            SuCT=SuCT+TCT[i][j];
            fprintf(f,"%6.1f ",TCT[i][j]);
        }
        fprintf(f,"%8.1f\n",SuCT);
    }
    */
    //////////// РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ ////////////
    double dt_kr=10.0; // Выполняет 1 оборот в 60 секунд, За 10 dt проходит 1 KE
    dt=Oborot/nx/dt_kr; // Выполняет 1 оборот в 60 секунд, За 10 dt проходит 1 KE
    int KzStop=nx*ScetObor; // До какого сдвигать (после 2 об выходит на стационарный режим)
    int KrVivT=15; // Кратность вывода температуры по времени

    Acons=LAM(700)/(c*ro);
    TAUMAX=1/((1./(dx*dx)+1./(dy*dy))*2.*Acons);
    TAU=0;
    fprintf(f,"\n Текущее dt=%6.4f Допустимое TAUMAX=%6.4f\n",dt,TAUMAX);

    fprintf(f,"\n Не стационарный режим dt=%6.4f\n",dt);
    // Определение температуры верхней границы
    int Kzdv=0; // элемент начиная с которого начинается материал
    schet:
    KITR=0;
    Kzdv=Kzdv+1;
    // Формирование температуры на верхней границе
    int K;
    K=Kzdv;
    if(Kzdv>=nx) K=Kzdv-((int)Kzdv/nx)*nx;
    for(i=0;i<nx;i++) // Формирование массива температур и теплоотдачи для верхнего
слоя
    {

```



```

        if((PodMt+K)<nx)
        {
            // Формирование массива температур
            TVG[i]=TF; if(i<PodMt+K && i>=K) TVG[i]=TM;
            AIV[i]=AlfFT; if(i<PodMt+K && i>=K) AIV[i]=AlfMT; // Формирование массива
теплоотдачи
        }
        else
        {
            TVG[i]=TM; if(i>(K+PodMt-nx) && i<=K) TVG[i]=TF;
            AIV[i]=AlfMT; if(i>(K+PodMt-nx) && i<=K) AIV[i]=AlfFT;
        }
    }
// Початок итераций
do
    {
        KITR++;
        for(i=0;i<nx;i++)
        {
            for(j=0;j<ny;j++)
            {
// Розрахункова формула
                Acons=LAM(TT1[i][j])/(c*ro); // Ламд const
                Ancons=1/(c*ro); // Ламд не const
                La11=(LAM(TT1[i+1][j])+LAM(TT1[i][j]))*0.5;
                La12=(LAM(TT1[i][j])+LAM(TT1[i-1][j]))*0.5;
                La21=(LAM(TT1[i][j+1])+LAM(TT1[i][j]))*0.5;
                La22=(LAM(TT1[i][j])+LAM(TT1[i][j-1]))*0.5;
                if(j==0) {C=(3.5+0.062*TT1[i][j])/LAM(TT1[i][j])*dy;TPR=(TT1[i][j+1]+C*TOC)/(1+C);} else
                if(j==ny-1) TPR=TVG[i]+(TT1[i][j]-TVG[i])/(AIV[i]*dy/LAM(TT1[i][j])+1); else
                if(i==0) TPR=TT1[i][j]+dt*Acons*((TT1[nx-2][j]-2*TT1[i][j]+TT1[i+1][j])/dx/dx + (TT1[i][j]-
2*TT1[i][j]+TT1[i][j+1])/dy/dy);else
                if(i==nx-1) TPR=TT1[0][j]; else
                TPR=TT1[i][j]+dt*Ancons*( (La11*(TT1[i+1][j]-TT1[i][j]) - La12*(TT1[i][j]-TT1[i-1][j]))/dx/dx
                + (La21*(TT1[i][j+1]-TT1[i][j]) - La22*(TT1[i][j]-TT1[i][j-1]))/dy/dy);
                TT2[i][j]=TPR;
            }
        }
// Переприсвоение
        for(i=0;i<nx;i++)
        for(j=0;j<ny;j++)
            TT1[i][j]=TT2[i][j];
        TAU=TAU+dt;
    }
while(KITR<dt_kr); // За 10 dt проходит 1 KE ///////////

```

```

// Вывод на печать
    if( fabs( ((int)(TAU+0.001)/KrVivT) * KrVivT - TAU) <= 1.0e-6)      // Кратное KrVivT
секунд
    {
        printf(" TAU=%f Smesh=%4.0d\n",TAU,Kzdv);
// В файл
        fprintf(f," TAU=%4.1f Smesh=%4.0d\n",TAU,Kzdv);
        for(j=ny-1; j>-1; j--)
        { fprintf(f,"");
          SuT1=0.0;SuCT=0.0;
          for(i=0;i<nx;i=i+10)          // Кратное 20
              {
                  SuT1=SuT1+TT1[i][j];
                  SuCT=SuCT+TCT[i][j];
                  fprintf(f,"%6.1f ",TT1[i][j]);
              }
          fprintf(f,"%8.1f %6.3f %8.3f\n",SuT1,dy*j,(SuCT-SuT1)/SuCT*100);
        }
    }
    if(Kzdv<KzStop) goto schet;          //////////////////////////////////////
// Кінець ітерацій
fclose(f);
// Блок виводу останніх результатів обчислення на екран
printf(" KOL ITER = %d\n",KITER);
printf("\n TEMPERATURES:\n\n");
for(j=ny-1; j>-1; j--)
{ printf("");
  for(i=0;i<nx;i=i+20)
    printf("%6.1f ",TT1[i][j]);
  printf("\n");
}
}
double LAM(double T) // Теплопроводность
{
    return (0.845+58.0e-5*T);
}

```

ДОДАТОК Г ОЦІНКА ПОХИБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Г.1 Загальні відомості

Для оцінки експериментальних даних визначають величину похибки їх отримання і довірчу ймовірність, що відповідає цій похибці [110-116]. При обробці результатів вимірювань прямими методами використовується наступний алгоритм для розрахунків.

Найбільш ймовірне значення вимірюваної величини, або середньоарифметичне, значення визначається по залежності:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (\text{Г.1})$$

де x_i - значення вимірюваної величини; n - кількість вимірювань.

Абсолютні похибки окремих вимірювань:

$$\Delta x = |\bar{x} - x_i|. \quad (\text{Г.2})$$

Квадрати абсолютних похибок окремих вимірювань:

$$(\Delta x_1)^2, (\Delta x_2)^2, (\Delta x_3)^2, \dots, (\Delta x_n)^2. \quad (\text{Г.3})$$

Числовою мірою випадкової похибки, яка викликана впливом невідомих і неконтрольованих параметрів є дисперсія S .

Середньою квадратичною похибкою окремого результату вимірювання визначають по залежності:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}. \quad (\text{Г.4})$$

Величина середньої квадратичної похибки середнього арифметичного визначається за формулою:

$$S_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (\text{Г.5})$$

Однак отримані значення справедливі для досить великого числа вимірювань. При незначному числі вимірювань потрібно визначити довірчий

інтервал і довірчу ймовірності, використовуючи розподіл ймовірностей Стюдента [111, 112, 115]. Зазвичай при визначенні довірчої ймовірності використовуються наступні значення: $P = 0,68; 0,95; 0,997$. У цьому випадку для шести вимірювань коефіцієнт Стюдента становить $t = 1,1037; 2,447; 5,376$.

З урахуванням останнього похибка середнього результату прямих вимірювань знаходиться за формулою:

$$\theta = S_r \cdot t \quad (\text{Г.6})$$

Похибка середнього вимірювання включає в себе систематичні та випадкові похибки інструментального характеру, що виникають внаслідок помилок вимірювальних приладів, інструментів та датчиків.

У загальному випадку похибка середнього вимірювання величини визначається за формулою:

$$\delta(\bar{x}) = \sqrt{\delta_{\text{дат}}^2 + \delta_{\text{пр}}^2 + \delta_{\text{окр}}^2}, \quad (\text{Г.7})$$

де $\delta_{\text{дат}}, \delta_{\text{пр}}, \delta_{\text{окр}}$ - похибки вимірювального датчика, приладу та округлення.

Таким чином повна похибка прямого вимірювання визначається з виразу:

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\theta^2 + \delta^2(\bar{x}) + \delta^2(\psi_k)}, \quad (\text{Г.8})$$

де $\delta^2(\psi_k)$ - систематична і методична похибки.

Повне значення вимірюваної величини можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{cases} x = \bar{x}(1 + \sum \psi_k) \pm \sigma(\bar{x}) \text{ при } P = 0,68; \\ x = \bar{x}(1 + \sum \psi_k) \pm 2\sigma(\bar{x}) \text{ при } P = 0,95; \\ x = \bar{x}(1 + \sum \psi_k) \pm 3\sigma(\bar{x}) \text{ при } P = 0,997, \end{cases} \quad (\text{Г.9})$$

де $\pm \sigma(\bar{x}), \pm 2\sigma(\bar{x}), \pm 3\sigma(\bar{x})$ - границі довірчих інтервалів;

$\psi_k = \frac{\Delta x_k}{\bar{x}}$ - поправка на вплив систематичної похибки k -го фактора;

Δx_k - абсолютна систематична похибка k -го фактора.

Відносна похибка результату вимірювань визначається по залежності:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% . \quad (\text{Д.10})$$

Г.2 Розрахунок похибки вимірювання температури

Вимірювання коефіцієнтів теплопровідності вимагає планування експерименту. Планування експерименту - це процедура вибору кількості дослідів та умов, необхідних і достатніх для вирішення поставленої задачі з необхідною точністю [112]. Основною метою теорії планування експерименту є побудова математичної моделі процесу, що вивчається в експерименті.

Важливим завданням планування експерименту є визначення кількості експериментів, необхідних для виявлення залежностей між досліджуваними змінними. Параметри, які змінюються експериментатором під час експерименту, називаються факторами, а параметри, які досліджуються або оптимізуються, називаються виходами або відгуками системи [111]. Таким чином, при плануванні експерименту можна досягти наступних цілей: мінімізація кількості експериментів, одночасна зміна всіх параметрів, використання математичного апарату для формалізації поведінки експериментатора, а також вибірчіткої стратегії, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення після серії експериментів.

Після нагрівання печі до 1200°C та виходу на стаціонарний режим у фрагменті футеровки були зроблені виміри температур у тілі вогнетриву, ваті й металевій пластині.

Інтервал вимірів становив 4 години.

Експериментальні дані вимірювання для визначення температур приведені у таблиці Таблиця Г.1.

Експериментальні дані оброблялися за стандартною методикою розрахунку похибки [110]. Результати розрахунку зведені в Таблиця Г.1.

Таблиця Г.1						
№	Обробка даних					
	\bar{x}	S_r	$S_r \cdot t$	δ	Δx	ε
	T°C	T°C	T°C	T°C	T°C	%
1	1192,8	0,703	1,72	8,95	9,11	0,76
2	956,3	0,614	1,50	7,17	7,33	0,77

3	962,8	0,600	1,47	7,22	7,37	0,77
4	771,8	0,654	1,60	5,79	6,01	0,78
5	745,3	0,494	1,21	5,59	5,72	0,77
6	763,3	0,557	1,36	5,73	5,89	0,77
7	721,0	0,258	0,63	5,41	5,44	0,76
8	705,8	0,307	0,75	5,29	5,35	0,76
9	670,6	0,557	1,36	5,03	5,21	0,78
10	700,3	0,333	0,82	5,25	5,32	0,76
11	716,6	0,421	1,03	5,38	5,47	0,76
12	625,6	0,557	1,36	4,69	4,89	0,78
13	561,6	0,494	1,21	4,21	4,38	0,78
14	556,3	0,557	1,36	4,17	4,39	0,79
15	573,8	0,477	1,17	4,30	4,46	0,78
16	618,0	0,516	1,26	4,64	4,80	0,78
17	412,5	0,428	1,05	3,09	3,27	0,79
18	333,8	0,477	1,17	2,50	2,76	0,83
19	421,3	0,333	0,82	3,16	3,26	0,77
20	307,0	0,365	0,89	2,30	2,47	0,80

За результатами оброблення експериментальних даних отримано, що при порівнянні з розрахунковими результатами похибка не перевищує 6% при довірчою ймовірністю $W = 0,95$.

**ДОДАТОК Д ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ**



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з навчальної роботи
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Анатолій МЕЛЬНИЧЕНКО
«11» 11 2023р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Дениса Григоровича Швачка
на тему «Теплова ефективність футерівки обертових печей для виробництва будматеріалів»,
що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Цим актом засвідчується, що дисертаційна робота аспіранта кафедри хімічного, полімерного і силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Дениса ШВАЧКА на тему «Теплова ефективність футерівки обертових печей для виробництва будматеріалів», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії, відповідає напряму наукових досліджень КПІ ім. Ігоря Сікорського і безпосередньо пов'язана з навчальним процесом.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри хімічного, полімерного і силікатного машинобудування інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського, починаючи з 2023 року і до цього часу, під час проведення лекційних занять та лабораторних робіт з дисциплін «Конструкторське проектування обладнання».

Впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес забезпечується фізичними й математичними моделями, експериментальними установками, методами конструкторського проектування, методиками експериментальних досліджень, розрахунку впливу термоопору та термомеханічних напружень футерівки високотемпературної зони при роботі печі в експлуатаційних режимах.

Впровадження матеріалів дисертаційної роботи дає змогу студентам отримати, поглибити, систематизувати й закріпити досвід фізичного й математичного моделювання, а також конструкторського проектування обертових печей.

Декан інженерно-хімічного факультету
д.т.н., професор

Євген ПАНОВ

Завідувач кафедри хімічного полімерного машинобудування
д.т.н., професор

Олександр СОКОЛЬСЬКИЙ