

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОНИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна робота
другий магістерський
(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз теплообмінних процесів в
парабанній печі для виробництва
керамзит у

Виконав: студент _____ курсу, групи ТЕ-18-Рос
спеціальності теплоенергетика
(код і назва спеціальності)
освітньої програми теплоенергетика
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

М. О. Ренієнко
(ініціали та прізвище)

Керівник доц. к.т.н. Бердичев М.Ю.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент Юрковий інженер Р.О. Зубов
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя
2020

За...
 теплофіз...
 отриманих ем...
 на рисунку 2.11 - 2...
 ...зі зміни ваги за...

консультанта		завдання видав	завдання приймає
1	Енергетичний та ексергетичний баланс	Ч	Ч
2	Вивчення теплофізичних властивостей пористого теплоізоляційного матеріалу	Ч	Ч
3	Вибір засобів з охорони праці	Ч	Ч
4	Нормоконтроль		

7 Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Енергетичний та ексергетичний баланс одержаної пелі	1.09 - 10.10.	Виконано
2	Вивчення теплофізичних властивостей пористого теплоізоляційного матеріалу	14.10 - 28.10	Виконано
3	Вибір засобів з охорони праці	29.10 - 16.11	Виконано
4	Висновки оформлення диплому	17 - 27.12	Виконано

Студент Машук (підпис) М.В. Демисенко (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) Ч (підпис) Борщев М.В (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер Ч (підпис) Касов Ю.В. (ініціали та прізвище)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____
« 26 » 12 20 19 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Демисенко Марини Олександрівни
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз теплообмінних процесів в барабанній печі для виробництва керамічного

керівник роботи Бердусов М.Ю доц. К.Т.Н
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 10 » вересня 20 19 року № 1536-С

2 Строк подання студентом роботи 27 12 19

3 Вихідні дані до роботи Довжина печі 40 м, діаметр 2,5 м.
напрямок - модулі марки 40, $\Pi_k^k = 12,66 \text{ м}^3/\text{год}$, $W = 22\%$
 $W_c = 7,5\%$, $t_c = 66^\circ\text{C}$, $t_n = 200^\circ\text{C}$.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Енергетичний та ексергічний баланс барабанної печі; 2. Визначення теплофізичних властивостей

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Креслення барабанної печі; перетин барабанної печі; Аналіз теплообмінних процесів в барабанній печі, Закономірності пористості зашпиків

6 Консультанти розділів роботи колер теплопровідності

Розділ	Прізвище, ініціали та посада	Підпис, дата
--------	------------------------------	--------------

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ТА ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ.....	10
1.1 Енергетичний та ексергетичний баланси високотемпературних виробничих агрегатів	10
1.2 Розрахунок теплового балансу оберткової печі	16
1.3 Розрахунок ексергетичного балансу.	22
1.4 . Енергозберігаючі етапи виготовлення керамзиту	30
2 ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРИСТОГО ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ	36
2.1 Експериментальні дослідження пористих структур теплоізоляційних матеріалів.....	38
2.2 Загальна фізико-хімічна характеристика матеріалу	46
2.3 Залежність теплофізичних властивостей матеріалу від термічних режимів обробки	55
2.4 Залежність міцності матеріалу від термічних режимів обробки	65
2.5 Кінетика теплової обробки і розробка основ технологічного процесу термічної обробки	73
3 ВИБІР ЗАСОБІВ ІЗ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	78
3.1 Виявлення та аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів. Заходи з охорони праці	78
3.2 Пожежна безпека	86
ВИСНОВКИ	88
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	89

ВСТУП

Актуальність роботи. Дослідження енергетичних процесів у пористих матеріалах є окремим напрямом теплофізики та теплоенергетики, тому що структура пористих матеріалів провокує перебіг складних тепломасообмінних процесів, які наразі є недостатньо вивченими. Існуючі теорії для окремих випадків та напівемпіричні залежності не охоплюють усю область і усю різноманітність пористих матеріалів та конструкцій з них, що застосовуються для захисту елементів промислових енергетичних установок.

Так, пористим матеріалом можливо назвати практично будь-який твердий матеріал, тому що до пор відносять як мікропори (діаметр яких менше за довжину вільного пробігу молекули газу), так і каверни в будівельних матеріалах (їх діаметр більший декількох міліметрів). Також до пористих конструкцій відносять дисперсні матеріали (грунти, гранульована теплоізоляційна засипка) та матеріали, які мають капілярно-пористу структуру.

При такій численності та різноманітності матеріалів, що відносять до пористих матеріалів, існує ще більша кількість теорій, які описують ті чи інші процеси. Необхідно визначитися з комплексними показниками, що повною мірою відображають пористу структуру та їх впливом на теплофізичні характеристики матеріалу, створити нову повноцінну теорію управління структурою теплоізоляційних матеріалів і розв'язати задачу мінімізації енергетичних витрат при виробництві пористих матеріалів. Тільки тоді стане можливим знизити енергоємність продукції ВВП України.

Актуальність роботи. Формування теплофізичних властивостей пористих матеріалів надає можливість створення високопористої теплової ізоляції заданої теплопровідності та міцності.

Незважаючи на велику розповсюдженість пористих матеріалів в якості теплоізоляційних матеріалів, на сьогоднішній день відсутні ґрунтовні

дослідження впливу характеру пористої структури на теплофізичні характеристики ізоляційних матеріалів.

Об'єкт дослідження - є теплофізичні властивості пористих теплоізоляційних матеріалів.

Предмет дослідження – є теплофізичні властивості пористих теплоізоляційних матеріалів та елементів конструкцій теплового захисту

Мета роботи - розвиток теоретичних основ формування теплофізичних властивостей в пористих структурах.

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

- провести математичні розрахунки енергетичного та ексергетичного балансу;
- проаналізувати енергозберігаючі етапи виготовлення керамзиту;
- емпірично дослідити особливості процесу тепломасобміну при формуванні пористої структури, вплив методів формування пористої структури на кінцеві теплофізичні характеристики глиноземистих матеріалів та визначити функціональні залежності показників структури теплоізоляційних матеріалів від підведеної енергії;
- дослідження процесу пороутворення у матеріалів на основі глин.

Методи дослідження. Дослідження проблем, що розглядаються у дипломній роботі, ґрунтуються на уявленнях класичної термодинаміки та теорії тепломасообміну у пористих середовищах. Для аналітичного розв'язання систем диференціальних рівнянь застосовувалися методи диференціального і інтегрального числення, методи оптимізації (метод Лагранжа, метод пошуку за симплексом) та методи розв'язування задач нелінійного програмування (метод Лагранжа з умовами Куна – Такеру).

Експериментальні методи дослідження були лабораторними доводочними, лабораторними дослідницькими та лабораторними контрольними.

Наукова новизна отриманих результатів. Висунуто гіпотезу про поетапну зміну кількості пір та їх об'єму під час термообробки сировинної суміші теплоізоляційного матеріалу. Визначено функціональний зв'язок температури та часу термообробки з ефективним коефіцієнтом теплопровідності.

Практична цінність роботи. Практична цінність роботи полягає у вирішенні важливої проблеми підвищення ефективності теплоізоляційних матеріалів та елементів теплового захисту промислового обладнання

Особистий внесок здобувача. Дані необхідні для розрахунку роботи, представлені в магістерській роботі, проводилися особисто, вони отримані в результаті лабораторних досліджень. Автором проводився аналіз даних, постановка завдання та отримання результатів з його аналізом та подальшим формуванням висновків.

Апробація результатів магістерської роботи. Матеріали магістерської роботи були представлені на обговорення на XII університетської науковопрактичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука-2019», що проходила 15-17 квітня 2019 ,Інженерний інститут Запорізького національного університету. Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 3 розділів, висновків, переліку використаних джерел посилань. Загальний обсяг роботи складає 92 сторінки, 13 таблиць, 21 рисунка, перелік використаних літературних джерел з 36 найменувань.

1 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ТА ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ

1.1 Енергетичний та ексергетичний баланси високотемпературних виробничих агрегатів

На сьогоднішній день широке застосування в якості пористого матеріалу для теплового захисту отримав керамзит [1].

В роботі [2] наводяться залежності теплофізичних властивостей певного матеріалу від режимів спучення (час термічної обробки, температура зовнішнього середовища, початкова вологість сировинної суміші), які дозволяють керувати кінцевими теплофізичними характеристиками матеріалу при його виготовленні, змінюючи кінцеву пористість. Це підтверджує, що не тільки хімічний склад матеріалу впливає на його теплофізичні властивості, але й показники пористості матеріалу.

В роботі [3] проведено результати експериментальних досліджень механічних властивостей керамзиту, проте питанню визначення коефіцієнту теплопровідності матеріалу не приділено увагу.

В [4] приведено результати дослідження оптимального складу монолітного теплоізоляційного матеріалу на основі спученого перліту. Досліджено основні фізико-механічні властивості даного матеріалу та відповідність стандарту. Однак, проаналізовано лише конкретні матеріал, що було отримано з сировини родовища «Фогош» (Закарпатська обл., Україна).

На сьогоднішній день проведено ґрунтовні дослідження питання використання пористих матеріалів в якості елементів теплового захисту технологічного обладнання [5-8].

Оцінка ефективності використання тепла в установках, незалежно від їх складності, до останнього часу ґрунтувалася на застосуванні першого закону термодинаміки (енергетичний баланс), що відображає кількісну сторону теплових процесів у цих установках.

Аналіз роботи тепловикористовуючих установок [9] з урахуванням якісних відмінностей розташовуваних енергоресурсів і незворотності реальних робочих процесів на основі спільного використання першого і другого законів термодинаміки отримав назву ексергетичного. Ексергетичний аналіз враховує не тільки кількісні, а й якісні характеристики наявних енергоресурсів у різних елементах комбінованої установки, ступінь їх досконалості і незворотності окремих процесів, що протікають в цих елементах і в установці в цілому. Під комбінованою установкою розуміємо установку, що складається з основного технологічного агрегату, що є джерелом виробничих відходів тепла, і елементів, що використовують ці відходи.

Зв'язки, що встановлюються при ексергетичному аналізі між термодинамічними характеристиками і техніко-економічними показниками аналізованої системи, дають можливість оцінити ефективність її роботи, а також визначити шляхи і способи вдосконалення. Об'єктивність одержуваних при такому аналізі оцінок обумовлена тим, що вони засновані на розрахунку мінімально необхідних матеріальних і енергетичних витрат на реалізацію досліджуваного технологічного процесу. В основі ексергетичного аналізу лежить поняття ексергії. Розрізняють два види ексергії: ексергію таких форм енергії, які не визначаються ентропією, і ексергію потоків речовини і енергії, які характеризуються ентропією. До перших відносяться механічні, електричні, електромагнітні та інші види енергії; до других належать форми енергії (наприклад, внутрішня енергія речовини, енергія хімічних зв'язків, теплового потоку).

Ексергія речовини в замкнутому об'ємі з термодинамічними параметрами U , S , T , p і V визначається співвідношенням

$$e_v = (U - U_0) - T_0(S - S_0) + p_0(V - V_0),$$

де e_v - питома (на одиницю маси) ексергія речовини;

U_c, S_0, T_0, p_0, V_0 - внутрішня енергія, ентропія, температура, тиск і об'єм речовини при повній рівновазі аналізованої системи з навколишнім середовищем.

Формула виражає ексергію речовини в замкнутому об'ємі в процесі, що завершується вирівнюванням відповідних параметрів системи і середовища. При розрахунках ексергії робочого тіла (носія ексергії) в замкнутій системі в двох різних станах рівняння приводиться до виду

$$\Delta e_v = \Delta U - T_0 \Delta S + p_0 \Delta V,$$

де $\Delta U, \Delta S, \Delta V$ - зміни параметрів речовинами при переході з одного стану в інший.

Необхідність визначення ексергії в замкнутому об'ємі виникає найчастіше при розрахунках періодичних процесів и установок періодичної дії, в яких робоче тіло не виходить за межі даної системи. Однак на практиці більшість хімічно-технологічних процесів неперервні, стаціонарного та супроводжуються переміщеннями матеріальних та енергетичних потоків. Тому такі завдання пов'язані з визначенням ексергії речовини в потоці. Її термомеханічні складові знаходять за формулою

$$e_T = q - T_0(S - S_0),$$

де q - питомий тепловий потік, який переноситься речовиною;

S - ентропія речовини в потоці.

Для ідеальних газів термомеханічної ексергії визначається виразом

$$e_T = c_p (T - T_0) - T_0 \left[c_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \right],$$

де C_p - питома теплоємність речовини;

p і T - тиск і температура речовини в потоці;

R - газова постійна.

Хімічну складову ексергії [10], пов'язану з термодинамічними параметрами хімічної реакції, розраховують, використовуючи різні напівемпіричні співвідношення. Так, для газів і рідин встановлені співвідношення між їх хімічної ексергією і вищої теплотою згоряння наприклад, у процесах випарювання, ректифікації та сушіння ексергію палива знаходять за формулою

$$e_x = K Q_B^{CF},$$

де K – коефіцієнт приймається для газів $K = 0,975$ і $0,95$ - для рідини, якщо в молекулі речовини міститься більше одного атома C .

Для інших речовин, наприклад газів, можна прийняти наступне значення K : $0,97$ (генераторний газ), $0,98$ (колошниковий газ), $1,0$ (коксівий газ), $1,04$ (природний газ).

У випадку твердих палив з урахуванням вмісту води W хім. ексергію можна з достатньою для практичних цілей точністю прийняти рівною їх Q_B^{CF} , тобто,

$$e_x = (1 - W) Q_B^{CF}$$

температура палива зазвичай близька до температури навколишнього середовища, тому необхідність брати до уваги в розрахунках їх термомеханічну ексергію не виникає; виняток становить важке рідке паливо (мазут), яке для зниження його в'язкості, як правило, підігрівають до $(70...100)^\circ C$.

1.1.1 Ексергія теплового потоку

Функціонування промислових систем виробництва [11] в тій чи іншій мірі обумовлено обміном енергією з навколишнім середовищем. При передачі енергії від одного тіла до іншого або до середовища у формі теплового потоку зменшується його максимально роботоможливість. Якщо приймачем теплоти служить навколишнє середовище з температурою T_0 , питома ексергія теплового потоку, що має температуру T , становить

$$e = q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right).$$

1.1.2 Ексергетичні діаграми

Вельми корисні і досить інформативні для аналізу ефективності функціонування промислових систем є ексергетичні діаграми, або діаграми Грассмана, на яких потоки ексергії в системі зображені в певному масштабі по "ширині", пропорційної їх чисельним значенням. Діаграми наочно показують втрати ексергії в системі, місця їх появи і перерозподілу між елементами даного об'єкта. На рисунку 1.1 наведена така діаграма з двома вхідними матеріальними потоками, яким відповідають ексергії E'_1 і E'_2 .

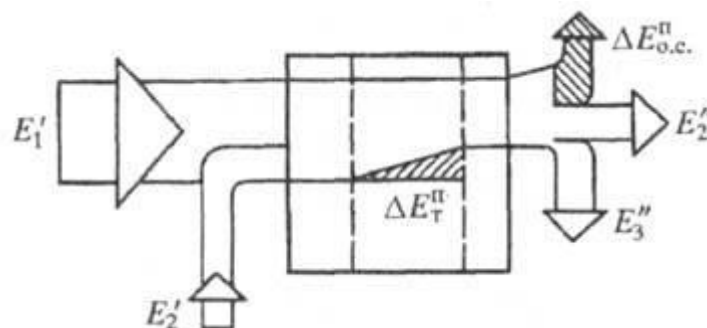


Рисунок 1.1 - Діаграма Грассмана з двома вхідними матеріальними потоками

У результаті взаємодії цих потоків на виході з системи отримують цільові продукти з ексергією E_2'' і E_3'' і побічний продукт з ексергією $E_1'' = \Delta E_{o.c.}''$. Сума $E_2'' + E_3''$ менше сумарної ексергією вхідних потоків на величину $\Delta E_m''$ (обумовлені необоротністю тепло - і масообміну в системі) і зовнішніх втрат $\Delta E_{o.c.}''$ у навколишнє середовище.

1.1.3 Ексергетичний ккд системи

Діаграми Грассмана і безпосередньо ексергетичний баланс у формі рівняння дозволяють знайти кількість, показники ефективності роботи аналізованої ХТМ. Серед цих показників найбільш поширений ексергетичний ккд визначається співвідношенням

$$\eta_e = \sum E_{пз} / \sum E_3 = (\sum E_3 - \sum \Delta E_{o.c.}'') / \sum E_3,$$

де $\sum E_{пз}$ - сума потоків ексергії, що відображає корисний ефект від функціонування системи;

$\sum E_3$ - повні витрати ексергією на досягнення заданого ефекту.

Для ідеального, повністю оборотного процесу, в якому втрати $\Delta E_{o.c.}''$ відсутні, $\eta_e = 1$. Якщо підведена ексергія повністю втрачається в процесі, то $\eta_e = 0$. У реальних процесах завжди дотримується нерівність $0 < \eta_e < 1$. При цьому чим вище чисельне значення η_e , тим термодинамічно досконаліше система. З формули випливає також, що різниця між ексергією, які зумовлюють корисний ефект і ексергетичні витрати, завжди дорівнює сумарній втраті ексергії від незворотності що протікають в системі процесів

Ексергетичний ккд носить узагальнений характер. Конкретне вираження для η_e залежить від призначення і особливостей аналізованого процесу та видів взаємодії потоків.

1.2 Розрахунок теплового балансу обертової печі

Вихідні дані. Довжина печі 40 м, діаметр 2,5 м; паливо-мазут марки 20, продуктивність печі $P_K^k = 12.66 \text{ м}^3/\text{год}$, Формувальна вологість глини $W = 22 \%$, вологість гранул на виході з сушильного барабана $W_c = 7,5 \%$, температура сирцю при завантаженні в піч $t_c = 66 \text{ }^\circ\text{C}$, температура керамзиту на виході з печі $t_{до} = 830 \text{ }^\circ\text{C}$, температура відхідних газів $t_{ог} = 430 \text{ }^\circ\text{C}$, температура повітря, що подається на горіння $t_v = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, насипна щільність керамзиту 450 кг/м^3 , маса сирцю, що завантажується в піч $G_c = 6562,94 \text{ кг/год}$, хімічний склад глини, %: CaO-0,93; MgO-4; ППП-7,7.

1.2.1 Прибуткові статті балансу

Теплота від горіння палива, кДж

$$Q_1^п = Q_1^a \cdot V = 40726,77 \cdot V,$$

де V -годинну витрата палива, $\text{м}^3/\text{год}$ або кг/год .

Фізична теплота, що вноситься паливом, кДж

$$Q_2^п = V \cdot C_T \cdot t_T = V \cdot 1,932 \cdot 75 = 144,9 \cdot V,$$

де C_T - питома теплоємність палива, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

t_T - температура палива, що надходить на горіння, $^\circ\text{C}$; $t_T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$.

Теплота, що вноситься з сировиною, кДж

$$Q_3^п = G_c \cdot C_c \cdot t_c = 6562,94 \cdot 66 \cdot 1,169 = 506357,07,$$

де G_c - маса сировини, кг

$$G_c = \frac{\Pi_K^k}{\text{річний фонд часу}} \cdot (\rho_{\text{сировини}} + \rho_{\text{керамзиту}}) =$$

$$= 1000 / (365 \cdot 0,9 \cdot 24) \cdot (450 + 68,4) = 6562,94,$$

$$\rho_{\text{сировини}} = \rho_{\text{керамз}} \cdot (\text{ППП} + W_c) = 450 \cdot (0,077 + 0,075) = 68,4,$$

де C_c - питома теплоємність сировини, кДж/(кг·К):

$$C_c = 0,924 \frac{100 - W_c}{100} + 4,2 \frac{W_c}{100} = 0,924 \cdot 100 - 7,5100 + 4,27,5100 = 1,169.$$

Фізична теплота первинного повітря, що подається на горіння, кДж

$$Q_4^{\Pi} = V \cdot V_{\Pi}^0 \cdot \alpha_1 \cdot t_{\Pi} \cdot C_{\Pi} = V \cdot 10,806 \cdot 1,17 \cdot 200 \cdot 1,344 = 3398,44,$$

де $C_{\Pi} = 1,344$ - питома теплоємність повітря, кДж/(м³К);

V_{Π}^0 - теоретичний об'єм повітря, необхідний для горіння 1 м³ або 1 кг палива. Прийнято з розрахунку горіння палива для $\alpha = 1$; t_{Π} - температура повітря, що подається на горіння. Прийнята $t_{\Pi} = 200$ °С.

Фізична теплота повітря, підсмоктується через нещільність головки печі, кДж

$$Q_5^{\Pi} = V \cdot V_{\Pi}^0 \cdot (\alpha_2 - \alpha') \cdot t_{\Pi}^0 \cdot C_{\Pi} = V \cdot 10,806 \cdot (1,95 - 1,5) \cdot 20 \cdot 1,344 = 130,7,$$

де $\alpha' = (1,4...1,5)$ - коефіцієнт надлишку повітря з боку вивантаження печі.

Фізична теплота вторинного повітря, що надходить в піч з холодильника, кДж

$$Q_6^G = V \cdot V_{\text{п}}^0 \cdot (\alpha' - \alpha_1) \cdot t_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} = 10,806 \cdot 0,28 \cdot 160 \cdot 1,344 = 650,64 \text{ В},$$

де $t_{\text{п}} = (150 \dots 180) \text{ } ^\circ\text{С}$ - температура повітря, що виходить з холодильника.

1.2.2 Витратні статті балансу

Теплота на випаровування вологи з сировиною, кДж

$$Q_1^P = \Pi_x^K \cdot G_{H_2O}^r \cdot 2499 = 5697 \cdot 0,087 \cdot 2499 = 1238601,86,$$

де 2499 - прихована теплота пароутворення води при $0 \text{ } ^\circ\text{С}$, кДж/кг;

Π_x^K – годинна продуктивність печі з обпалення керамзиту;

$G_{H_2O}^r$ - об'єм води, що виділяється при випалюванні сирцю, що припадає на 1 кг керамзиту.

Втрата тепла на хімічні реакції, кДж:

– на розкладання CaCO_3

$$Q_{21}^P = \Pi_x^K \cdot G_{\text{CaCO}_3} \cdot 1587,6 = 5697 \cdot 0,0179 \cdot 1587,6 = 161897,57,$$

$$G_{\text{CaCO}_3} = \frac{\text{CaCO}_3}{100} \cdot G_{\Gamma}^c = \frac{0,93 \cdot 100}{56} = 1,66;$$

– на розкладання MgCO_3

$$Q_{22}^p = \Pi_x^k \cdot G_{\text{MgCO}_3} \cdot 1318,8 = 5697 \cdot 0,09 \cdot 1318,8 = 676188,32,$$

де 1318,8 – ендотермічний ефект декарбонізації MgCO_3 , кДж/кг;

– дегідратація глинистих матеріалів, кДж

$$Q_{23}^p = \Pi_x^k \cdot G_{\text{H}_2\text{O}}^X \cdot 6720 = 5697 \cdot 0,028 \cdot 6720 = 1071947,52,$$

де 6720 - ендотермічний ефект дегідратації глинистих матеріалів, кДж/кг;

$G_{\text{H}_2\text{O}}^X$ - витрата тепла на дегідратацію глинистих матеріалів;

– плавлення силікатної маси, кДж

$$Q_{24}^p = \Pi_x^k \cdot 315 = 315 \cdot 5697 = 1794555,$$

де 315 кДж - питома витрата теплоти на освіту склоподібної фази, віднесеної до 1 кг обпаленого керамзиту.

Загальна витрата тепла на хімічні реакції кДж

$$Q_2^p = Q_{21}^p + \dots + Q_{24}^p = 161897,57 + 676188,32 + 1071947,52 + 1794555 =$$

$$=370458841.$$

Втрати тепла з керамзитом на виході з печі, кДж

$$Q_3^p = \Pi_x^k \cdot C_k \cdot t_k = 5697 \cdot 1,1119 \cdot 830 = 5257630,27,$$

де t_k - температура керамзиту на виході з печі, °С,

C_k - питома теплоємність обпаленої керамзиту при температурі t_k , кДж/(кг·К), обчислюється за формулою

$$C_k = 0,84(1 + 0,00039 t_k) = 0,84(1 - 0,00039 \cdot 830) = 1,1119;$$

Втрати тепла в навколишнє середовище, кДж

$$Q_4^p = 34742 \cdot 0,2 \cdot B = 40726,77 \cdot 0,2 \cdot B = 8145,35 B.$$

Втрати тепла в навколишнє середовище можна приймати в розмірі 20% від теплоти горіння палива.

Втрати тепла з газами, що відходять:

– з фізичної теплою продуктів горіння, кДж

$$Q_{51}^p = B \cdot V^{ог} \cdot C_{ог} \cdot t_{ог} = B \cdot 13,306 \cdot 1,39 \cdot 430 = 7952,99 B,$$

де $V^{ог}$ - обсяг продуктів горіння на 1 м³ або 1 кг палива при α_2

приймають з розрахунку горіння палива;

$C_{ог}$ - питома теплоємність газів, що відходять при їх температурі на виході з печі. Визначають за формулою

$$C_{ог} = 4,2(0,323+0,000018 \cdot t_{ог})=4,2 \cdot (0,323+0,000018 \cdot 430)=1,39;$$

- з фізичної теплотою водяних парів гігроскопічної і хімічно зв'язаної вологи, кДж

$$\begin{aligned} Q_{5.2}^p &= \Pi_x^k \cdot (G_{H_2O}^r + G_{H_2O}^x) \cdot G_{H_2O}^{o.r} \cdot t_{ог} = \\ &= 5697 \cdot (0,028+0,087) \cdot 2,1386 \cdot 430 = 602479,23; \end{aligned}$$

- з фізичною теплотою

$$Q_{5.3}^p = \Pi_x^k \cdot G_{ОРГ}^l \cdot C_{CH_4}^{o.r} \cdot t_{ог} = 5697 \cdot 0,083 \cdot 3,8682 \cdot 430 = 786505,36,$$

де $G_{ОРГ}^l$ - питома теплоємність метану при температурі газів, що відходять

$$G_{ОРГ}^l = \frac{\text{ППП}}{100} \cdot G_{Г.}^c = \frac{7,7}{100} \cdot 1,083 = 0,083;$$

- з фізичної теплотою CO_2 , що утворився при розкладанні карбонатів, кДж

$$\begin{aligned} Q_{5.4}^p &= \Pi_x^k \cdot G_{CO_2} \cdot C_{CO_2}^{o.r} \cdot t_{ог} = \\ &= 5697 \cdot 0,055 \cdot 1,1584 \cdot 430 = 156075,92, \end{aligned}$$

де $C_{CO_2}^{02}$ -Питома теплоємність вуглекислого газу при температурі газів,

що відходять.

Загальні втрати тепла з газами, що відходять, кДж

$$Q_5^P = Q_{5.1}^P + \dots + Q_{5.4}^P =$$

$$=7952,99B+602479,23+786505,36+156075,92=7952,99B+1545060.$$

Втрати тепла з хімічним недожогом палива, кДж

$$Q_6^P = X \cdot B \cdot Q_H^C = 0,01 \cdot B \cdot 40726,77 = 407,26 B,$$

де X-втрати тепла з хімічним недожогом палива.

Загальне рівняння теплового балансу обертової печі за 1 год роботи:

$$\begin{aligned} Q_1^P + Q_2^P + Q_3^P + Q_4^P + Q_5^P + Q_6^P &= Q_1^P + Q_2^P + Q_3^P + Q_4^P + Q_5^P + Q_6^P = \\ &= 40726,77B + 144,9B + 506357,07 + 3398,4B + 130,7B + 650,64B = \\ &= 1238601,86 + 3704588,41 + 5257630,27 + 8145,35B + 7952,99B + \\ &\quad + 1545060,51 + 407,26B; \\ &551408,48B = 11762386,65B. \end{aligned}$$

1.3 Розрахунок ексергетичного балансу.

Ексергія горання палива, кДж

$$E_1^P = E_1^Q \cdot B = 156641,42 \cdot B.$$

Ексергія тепла, що вноситься паливом, кДж

$$E_2^{\text{II}} = B \cdot C_T \cdot t_T \cdot \Delta S, = B \cdot 1,932 \cdot 75 \cdot 0,26 = 100,462 \cdot B.$$

Ексергія що вноситься з сировиною, кДж

$$E_3^{\text{II}} = G_C \cdot C_C \cdot t_C \cdot \Delta S = 6562,94 \cdot 66 \cdot 1,169 \cdot 0,26 = 347947,9,$$

де G_C - маса сировини, кг :

$$G_C = \frac{\Pi_K^{\text{K}}}{\text{річний фонд часу}} \cdot (\rho_{\text{сировини}} + \rho_{\text{керамзиту}}) =$$

$$= \frac{1000}{365 \cdot 0,924} \cdot (450 + 68,4) = 6562,94,$$

$$\rho_{\text{сировини}} = \rho_{\text{керамз}} \cdot (\text{ППП} + W_C) = 450 \cdot (0,077 + 0,075) = 68,4;$$

C_C - питома теплоємність сировини, кДж/(кг·К)

$$C_C = 0,924 \cdot \frac{100 - W_C}{100} + 4,2 \cdot \frac{W_C}{100} =$$

$$= 0,924 \cdot \frac{100 - 7,5}{100} + 4,2 \cdot \frac{7,5}{100} = 1,169.$$

Ексергія теплоти первинного повітря, що подається на горіння, кДж

$$E_4^{\Pi} = B \cdot V_{\Pi}^0 \cdot \alpha_1 \cdot t_{\Pi} \cdot C_{\Pi} \cdot \Delta S =$$

$$= B \cdot 10,806 \cdot 1,17 \cdot 200 \cdot 1,344 \cdot 0,26 = 883,59,$$

де $C_{\Pi} = 1,344$ - питома теплоємність повітря, кДж/(м³·К);

V_{Π}^0 – теоретичний об'єм повітря, необхідний для горіння 1 м³ або 1 кг палива. Прийнято з розрахунку горіння палива для $\alpha = 1$; t_{Π} - температура повітря, що подається на горіння. Прийнята $t_{\Pi} = 200$ °С.

Ексергія фізичної теплоти повітря, підсмоктується через нещільність головки печі, кДж

$$E_5^{\Pi} = B \cdot V_{\Pi}^0 \cdot (\alpha_2 - \alpha') \cdot t_{\Pi}^0 \cdot C_{\Pi} \cdot \Delta S =$$

$$= B \cdot 10,806 \cdot (1,95 - 1,5) \cdot 20 \cdot 1,344 \cdot 0,26 = 6796B,$$

де $\alpha' = (1,4 \dots 1,5)$ - коефіцієнт надлишку повітря з боку вивантаження печі.

Ексергія фізичної теплоти вторинного повітря, що надходить в піч з холодильника, кДж

$$E_6^G = B \cdot V_{\Pi}^0 \cdot (\alpha' - \alpha_1) \cdot t'_{\Pi} \cdot C_{\Pi} \cdot \Delta S =$$

$$= B \cdot 10,806 \cdot 0,28 \cdot 160 \cdot 1,344 \cdot 0,26 = 33834B,$$

де $t'_{\Pi} = (150 \dots 180)$ °С.- температура повітря, що виходить з холодильника.

1.3.2 Втратні ексергетичні статті балансу.

Теплота на випаровування вологи з сирцю, кДж

$$E_1^p = \Pi_x^k \cdot G_{H_2O}^r \cdot 2499 \cdot t_e \cdot \Delta S = 5697 \cdot 0,087 \cdot 2499 \cdot 19 \cdot 0,26 = 72391,7,$$

де 2499 - прихована теплота пароутворення води при 0 °С, кДж/кг;

Π_x^k – годинна продуктивність печі за обпаленої керамзиту;

$G_{H_2O}^r$ - об'єм води, що виділяється при випалюванні сирцю, що припадає на 1 кг керамзиту, кг.

Витрата ексергетичного тепла на хімічні реакції, кДж:

– на розкладання $CaCO_3$:

$$E_{21}^p = \Pi_x^k \cdot G_{CaCO_3} \cdot 1587,6 \cdot t_e \cdot \Delta S =$$

$$= 5697 \cdot 0,0179 \cdot 1587,6 \cdot 19 \cdot 0,26 = 42093,36,$$

$$G_{CaCO_3} = \frac{CaCO_3}{100} \cdot G_r^c = \frac{0,93 \cdot 100}{56} = 1,66.$$

– на розкладання $MgCO_3$

$$E_{22}^p = \Pi_x^k \cdot G_{MgCO_3} \cdot 1318,8 \cdot t_e \cdot \Delta S =$$

$$= 5697 \cdot 0,09 \cdot 1318,8 \cdot 19 \cdot 0,26 = 334370,32,$$

де 1318,8 – ендотермічний ефект декарбонізації $MgCO_3$, кДж/кг.

– ексергія на дегідратацію глинистих матеріалів, кДж

$$E_{23}^p = \Pi_x^k \cdot G_{H_2O}^X \cdot 6720 \cdot \Delta S \cdot t_\theta = 5697 \cdot 0,028 \cdot 6720 \cdot 19 \cdot 0,26 =$$

$$= 529520,75,$$

де 6720 - ендотермічний ефект дегідратації глинистих матеріалів, кДж/кг;

$G_{H_2O}^X$ - Витрата тепла на дегідратацію глинистих матеріалів.

– ексергія плавлення силікатної маси, кДж

$$E_{24}^p = \Pi_x^k \cdot 315 \cdot \Delta S t_\theta = 315 \cdot 5697 \cdot 19 \cdot 0,26 = 466584,3,$$

де 315 кДж - питома витрата теплоти на освіту склоподібної фази, віднесеної до 1 кг обпаленого керамзиту.

Загальна витрата тепла на хімічні реакції кДж

$$E_2^p = E_{21}^p + \dots + E_{24}^p =$$

$$= 42093,36 + 3340370,32 + 5295420,75 + 466584,3 = 9743170,71.$$

Ексергія втрати тепла з керамзитом на виході з печі, кДж

$$E_3^p = \Pi_x^k \cdot C_k \cdot t_k \cdot \Delta S = 5697 \cdot 1,1119 \cdot 830 \cdot 0,26 = 1366983,87,$$

де t_k - температура керамзиту на виході з печі, °С,

C_k - питома теплоємність обпаленої керамзиту при температурі t_k , обчислюється за формулою кДж/(кг · К)

$$C_k = 0,84(1 + 0,00039 t_k) =$$

$$= 0,84(1 - 0,00039 \cdot 830) = 1,1119.$$

Ексергія тепла в навколишнє середовище, кДж

$$E_4^p = 34742 \cdot 0,2 \cdot B \cdot \Delta S \cdot t_g =$$

$$= 40726,77 \cdot 0,2 \cdot B \cdot 200 \cdot 0,26 = 423558,2 \text{ В.}$$

Втрати тепла в навколишнє середовище можна приймати в розмірі 20 % від теплоти горіння палива.

Ексергія втрати тепла з газами, що відходять:

– з фізичної теплою продуктів горіння, кДж:

$$E_{51}^p = B \cdot V^{ог} \cdot C_{ог} \cdot t_{ог} \cdot \Delta S = B \cdot 13,306 \cdot 1,39 \cdot 430 \cdot 0,26 = 2067,77 \text{ В,}$$

де $V^{ог}$ - обсяг продуктів горіння на 1 м³ або 1 кг палива при α_2 приймають з розрахунку горіння палива;

$C_{ог}$ - питома теплоємність газів, що відходять при їх температурі на виході з печі. Визначають за формулою

$$C_{ог} = 4,2(0,323 + 0,000018 t_{ог}) = 4,2 \cdot (0,323 + 0,000018 \cdot 430) = 1,39;$$

– з фізичної теплою водяних парів гігроскопічної і хімічно зв'язаної вологи, кДж

$$E_{5.2}^p = \Pi_x^k \cdot (G_{H2O}^r + G_{H2O}^x) \cdot G_{H2O}^{o.r} \cdot t_{ог} \cdot \Delta S. =$$

$$=5697 \cdot (0,028+0,087) \cdot 2,1386 \cdot 430 \cdot 0,26=156644,59;$$

– з фізичною теплою:

$$E_{5.3}^p = \Pi_x^k \cdot G_{\text{ОРГ}}^l \cdot C_{\text{CH}_4}^{\text{о.г}} \cdot t_{\text{ог}} \cdot \Delta S =$$

$$=5697 \cdot 0,083 \cdot 3,8682 \cdot 430 \cdot 0,26=204491,39,$$

де $G_{\text{ОРГ}}^l$ - питома теплоємність метану при температурі газів, що відходять.

$$G_{\text{ОРГ}}^l = \frac{\text{ППП}}{100} \cdot G_{\text{Г}}^c \cdot \frac{7,7}{100} \cdot 1,083 = 0,083;$$

– з фізичної теплою CO_2 , що утворився при розкладанні карбонатів, кДж

$$E_{5.4}^p = \Pi_x^k \cdot G_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{CO}_2}^{\text{о.г}} \cdot t_{\text{ог}} \cdot \Delta S =$$

$$=5697 \cdot 0,055 \cdot 1,1584 \cdot 430 \cdot 0,26=4579,74,$$

де $C_{\text{CO}_2}^{\text{о.г}}$ - Питома теплоємність вуглекислого газу при температурі газів, що відходять.

Загальні ексергія втрати тепла з газами, що відходять, кДж

$$E_5^p = E_{5.1}^p + \dots + E_{5.4}^p =$$

$$=2067,77 \text{ В} + 156644,59 + 204491,39 + 4579,74 =$$

$$=403783,49 \text{ В}.$$

Ексергія втрати тепла з хімічним недожогом палива, кДж

$$E_6^p = X \cdot B \cdot Q_H^c \cdot \Delta S \cdot t_e =$$

$$= 0,01 \cdot B \cdot 40726,77 \cdot 0,26 \cdot 200 = 21177,52 \text{ В},$$

де X-втрати тепла з хімічним недожогом палива.

Загальне рівняння ексергетичного балансу обертової печі за 1 год роботи:

$$E_1^p + E_2^p + E_3^p + E_4^p + E_5^p + E_6^p = E_1^p + E_2^p + E_3^p + E_4^p + E_5^p + E_6^p =$$

$$= 156641,42 \text{ В} + 100,462 \text{ В} + 347947,9 + 883,59 + 6796 \text{ В} + 33834 \text{ В} =$$

$$=$$

$$72391,7 + 9743170,71 + 1366983,87 + 423558,2 \text{ В} + 403783,49 \text{ В} +$$

$$+ 21177,52 \text{ В}$$

$$;$$

$$546203,37 \text{ В} = 11682007,42 \text{ В}.$$

Нев'язка баланса %

$$\delta = \frac{551408,48 \text{ В} - 546203,37 \text{ В}}{551408,48 \text{ В}} \cdot 100 = 0,94;$$

$$\delta = \frac{11762386,65 \text{ В} - 11682007,42 \text{ В}}{1162386,65 \text{ В}} \cdot 100 = 0,93;$$

$$\delta = \frac{0,94 - 0,93}{0,94} \cdot 100 = 1,06.$$

Нев'язка баланса складає 1,06 %, що є допустимою.

1.4 . Енергозберігаючі етапи виготовлення керамзиту

1.4.1 Рекомендації з підготовки сировини до переробки і переробка глини з добавками при виробництві керамзиту [12]:

- для виробництва керамзиту використовуються темно-коричневі глини;

- глина не повинна мати домішок розкривних порід, рослинного шару, супіски і підстилаючого глину піску, вилежуватися на відкритому повітрі не менше 30 діб;

- ормовочна вологість глини (20...25) %;

- для зниження кар'єрної вологості глинозапасни повинні заповнюватися і спорожнюватися по черзі;

- переробка глиномаси здійснюється двохвальними глиномішалками. Для забезпечення нормальної роботи глиномішалок, руйнування структури глини і змішування її з добавками, вал глиномішалок повинен бути завжди засипаний глиною, але не вище висоти лопастей, що знаходяться у верхньому положенні;

- кут розвороту лопастей і частота обертання валів в глиномішалці:

- 1) № 2 $12^\circ - 8^\circ - 10^\circ$ і 12,5 об/хв.;

- 2) № 3 $10^\circ - 6^\circ - 8^\circ$ і 24 об/хв.;

- 3) № 4 $10^\circ - 6^\circ - 8^\circ$ і 24 об/хв.;

- число лопатей в глиномішалці:

- 1) № 2 - 34 штуки;

- 2) № 3 - 46 штук;

- 3) № 4 - 36 штук.

Знос лопатей по товщині - не більше 50 %.

1.4.2 Рекомендації по формуванню гранул при виробництві керамзиту:

- формуючі шнекові преси, обладнані гранулюючими приставками, призначені для формування серцевих гранул;
- для формування гранул, глина повинна надходити добре перероблена і перемішана з мазутом або концентратом відпрацьованої емульсії;
- формування гранул проводиться на стрічкових пресах. Діаметр отворів лобових плит (7...12) мм;
- частота обертання шнеків: преса СМК-133 – (21 ... 25) об/хв;
- формовочна вологість глини (20...25) %;
- при роботі преса забороняється продовжувати роботу при засміченні більше 10 % всіх формувальних отворів, при великих деформаціях лобових плит і частковому їх руйнуванні, при безперервному формуванні рваного, посіченого напівфабрикату;
- навантаження електродвигуна (100 ... 150) А.

При збільшенні навантаження повинна проводитися чистка лобових плит, фільтрування сорочки і наплавки шнеків пресів [13]:

- сформовані джгути повинні мати суцільну гладку поверхню, діаметр джгутів повинен відповідати діаметру отворів лобових плит;
- для збільшення випуску керамзиту дрібної фракції, при необхідності, гранули подрібнюють приладом для різання гранул.

1.4.3 Рекомендації по сушці гранул в сушильному барабані:

- температура димових газів на вході в сушильний барабан не менше 300 °С;
- температура димових газів на виході з сушильного барабана (60 ... 130) °С;
- вологість висушених гранул (0,5...6) %;
- частота обертання барабана:
 - 1) № 2 - від 1,5 до 2,5 об/хв.;
 - 2) № 3 - від 1,5 до 2,5 об/хв.;

- висушені гранули повинні бути щільними, окатаними;
- для збільшення випуску керамзиту фракції (0,1...4) мм і (4...8) мм, висушені гранули подрібнюють в дробарці і запудрюють доломітовим борошном до 1,5 % у масі [14].

Рекомендації з випалювання керамзиту в обертових печах

1. Випал матеріалу проводиться в модернізованих однобарабанних обертових печах довжиною 40 м змінного перерізу, що включають барабан термopідготовки діаметром 2,5 м і барабан спучування діаметром 3 м з частотою обертання від 2 до 3 оборотів в хвилину.

2. Живлення печей гранулами має здійснюватися рівномірно за допомогою стрічкових живильників, гранули повинні бути однорідними за якістю переробки і вологості. Гранулометричний склад напівфабрикату повинен бути стабільним. Завантаження печей напівфабрикатом (95...120) л/хв. (6,5...7,2) м³/год.

3. Температура футерування і матеріалу в зоні спучування (1040...1100) °С (при погашеному факелі).

4. Щоб уникнути утворення спікання, гранули опудрюють, факел повинен бути слабопалаючим, не повинен торкатися футерування і матеріалу. Ось факела повинна збігатися з віссю печі, довжина факела (10...20) % довжини печі.

5. Зона, яку не можна продивитися (чорна зона), що віддалена від гарячого кінця печі, повинна займати не більше 1/3 довжини печі.

6. Тиск газу, що надходить на випал (400...600) Па.

7. Напір дуттьового вентилятора (250...350) Па.

8. Температура газів, що відходять з печей (380...420) °С.

9. Розрідження в завантажувальній камері печі (20...40) Па.

10. Граничні значення марок за насипною густиною (Табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Граничні значення марок за насипною густиною

Найменування матеріалу	Марка по насипній щільності	
Гравій керамзитовий	Мін.200	Макс.400
Пісок керамзитовий	Мін.450	Макс.600

11. Витрата газу для випалу (620...700) м³/год на одну піч.

12. Температура дуттьового повітря (40...80) °С.

13. Температура керамзиту, що надходить в шаровий холодильник (800...900) °С, а на виході з холодильника – (60...150) °С.

Рекомендації по розсіву керамзиту по фракціям

1. Гравійне сортування керамзиту призначене для розсіювання керамзитового гравію на 4 фракції: (0,1...4), (4...8), (8...16) і (16..32) мм.

2. Сітки з квадратними осередками із сталевого рифленого дроту по ГОСТ 3306 (номер сітки - 4, 8, 16). Допустимі відхилення від номінального розміру сторони комірки у світлі ± 3,0 %.

3. Ступінь засміченості матеріалу не повинна перевищувати норми, встановлені СТБ ЄП 13055-1-2003 (Табл. 1.2).

Таблиця 1.2 - Значення зернової складової кожної фракції

Діаметр отворів контрольних сит, мм	4	8	16
Повний залишок на ситі, % по масі	від 80 до 100	до 10	Не допускається

4. Гравій повинен зберігатися окремо за фракціями. Не допускається змішування різних фракцій при складуванні.

5. При зберіганні гравій і пісок не повинні піддаватися засміченню і механічним впливам.

6. Частота обертання гравійного сортування повинна варіюватися в залежності від гранулометричного складу суміші в діапазоні (12 ...20) об/хв [15].

Дані рекомендації, а також технологічний регламент на виробництво полегшеного керамзиту, що відповідає європейським нормам, відповідно до якого з 01.01.2004 р. вводиться в дію стандарт СТБ ЄП 13055-1-2003 ідентичний європейському стандарту, розробленому Технічним комітетом CEN / TC 154 «Заповнювачі легкі для бетону і будівельного розчину» [16].

Відмінною особливістю цієї технології є:

1. Обов'язкове вилежування сировини глинистого керамзиту на відкритому повітрі не менше 30 діб, що дозволяє збільшити коефіцієнт спучування.

2. Введення опудрювальних добавок до підсушених гранул за допомогою гнучкого шнека, що дозволяє отримати максимальний ефект щодо зниження насипної щільності дрібних фракцій (0,1...4) і (4...8) мм при випалюванні на більш високих температурах [17].

3. Введення опудрювальних добавок безпосередньо в зону випалу за допомогою кільцевого живильника, що дозволяє знизити насипну щільність фракцій (8...16) і (16...32) мм, також при випалюванні на більш високих температурах.

4. Плавне регулювання технологічного процесу за допомогою частотних регуляторів на наступних операціях [18]:

- дозування глини на вході в технологічний процес - частота обертання живильного ящика;

- швидкість руху шару в сушильному барабані - частота обертання барабана;

- швидкість руху при випалюванні - частота обертання печі;

- швидкість руху шару при сортуванні - частота обертання барабана сортування [19].

Ступінь ефективності методів щодо зниження енергоспоживання в промислових печах представлена в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Порівняльна характеристика методів по зниженню енергоспоживання

№	Заходи з енергозбереження	Ефект від виконаних заходів	Строк окупності
1	2	3	4
1	Застосування волокнистих високоефективних вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів для футерування промислових печей.	Економія енергоносіїв до 40 % (в печах періодичної дії) і до 25 % (в печах безперервної дії). Зниження габаритів печі за рахунок товщини кладки. Зниження маси футеровки печі до 10 разів. Скорочення термінів виходу на режим до 1,5 - 2 годин. Збільшення числа тепломін до 1000-2000. Зниження трудомісткості монтажу футеровки в кілька разів.	Для печей періодичної дії до 6 місяців. Для печей і термоагрегатів, що працюють безупинно- 1-1,5 року.
2	Застосування сучасних газопальникових пристроїв, автоматичне регулювання співвідношення «газ-повітря». Застосування рекуперативних, плоскополум'яних, імпульсних, акустичних пальників.	Економія палива до 10 %. Зниження окалиностворення на 10 – 15 %. Підвищення безпеки роботи теплових агрегатів.	6 – 9 місяців.

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4
3	Застосування ефективних схем руху теплоносія в теплових агрегатах (протитечія, П-подібні печі з зонами рекуперації, примусова конвекція, полум'яні і теплові завіси, рециркуляція продуктів згоряння).	Економія палива до 40 %. Підвищення якості (рівномірності нагріву) термообробки.	5 – 8 місяців.
4	Застосування рекуперативних, регенераторних пристроїв.	Економія палива 10 – 20 %.	6 – 8 місяців.
5	Автоматизація процесів нагрівання в печах різноманітного призначення.	Економія палива до 1 5%. Підвищення якості термообробки.	1-1,5 року.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРИСТОГО ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Процес сушіння досліджуваного матеріалу складається з нагріву самого матеріалу і вологи всередині матеріалу, до температури пароутворення; спучування матеріалу, під дією тиску створюваного паротворенням, і нагрівання самого матеріалу. Варто зазначити, що остаточна фізико-молекулярна структура матеріалу формується в третьому етапі, але завдання параметрів цієї структури відбувається в другому етапі.

Як зазначалося в попередньому розділі перший період це період прогріву, що характеризується наростанням швидкості сушіння до деякої максимальної величини. У першому етапі буде відсутній градієнт температур по перетину матеріалу. Енергія, витрачена на перший етап сушіння, буде дорівнювати, Дж

$$Q^{1eman} = Q_{води}^{1eman} + Q_{частинці}^{1eman} \quad (2.1)$$

Енергія, витрачена на нагрівання води в частці, буде дорівнювати, Дж

$$Q_{води}^{1eman} = M_{ч} \cdot B \cdot C_{ср_в} \cdot (t_{випарювання} - t_{нач.частинці}), \quad (2.2)$$

де $M_{ч}$ - маса вологих частинок при початковому завантаженні,

B - вологість матеріалу в частках,

$C_{ср_в}$ - теплоємність води при середній температурі етапу.

Енергія, витрачена на нагрівання самої частинки, буде дорівнювати, Дж

$$Q_{частинці}^{1eman} = M_{ч} \cdot (1 - B) \cdot C_{ср_ч} \cdot (t_{випарювання} - t_{нач.частинці}), \quad (2.3)$$

де $C_{ср_ч}$ - теплоємність частинок при середній температурі етапу.

Другий період - період постійної швидкості сушіння. На цьому етапі матеріал суттєво змінюється за своїми фізико-молекулярним показниками. Температура потоку, початкова вологість матеріалу і час термічного впливу, визначить: наскільки матеріал збільшиться в об'ємі, теплопровідність матеріалу, міцність матеріалу. Енергія, яку необхідно затратити на даному етапі буде дорівнювати, Дж

$$Q^{2\text{етап}} = Q_{\text{пароутворення}} + Q_{\text{пару}}^{2\text{етап}} + Q_{\text{частинці}}^{2\text{етап}} \quad (2.4)$$

Третій період - період падаючої швидкості сушки. Початок цього періоду характеризується сталою кристалічною решіткою матеріалу. Подальший нагрів матеріалу буде тільки нагрівати залишки пара, що перебуває всередині пір матеріалу, а також безпосередньо сам матеріал. Варто зазначити, що третій етап, можливо, буде починатися в такий період часу, коли матеріал внаслідок інтенсивного спучування, зруйнується. Тому, варто розглянути можливість переривання подальшого нагріву матеріалу в необхідний момент часу другого періоду.

Симуляція 3 етапу була виконана на персональному комп'ютері за допомогою стандартних програм з моделювання фізичних процесів. Була врахована пористість матеріалу, а також його фізичні властивості. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу був прийнятий відповідно до експериментальним даним, наведеним нижче, і був функцією температури. Початкова температура матеріалу була прийнята 100 °С. Температура потоку - 300 °С (див.рис 2.1).

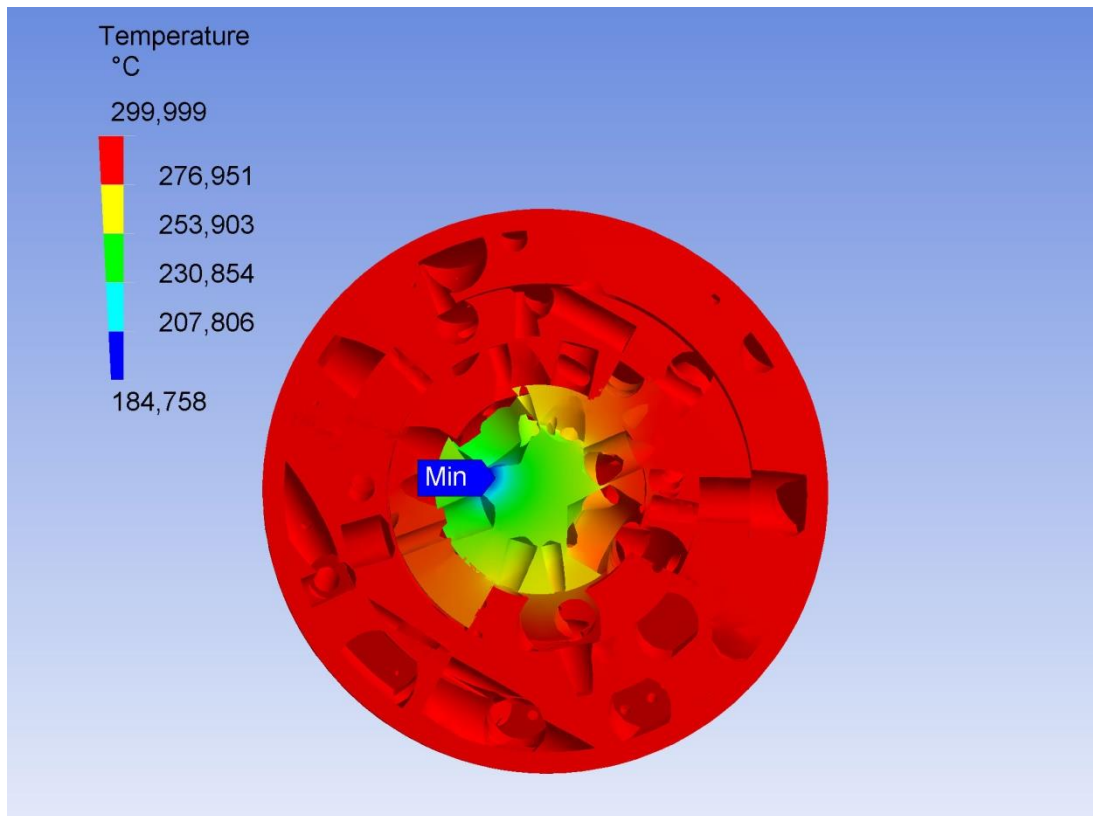


Рисунок 2.1 - Розподіл температури при подальшому нагріванні вже спученого матеріалу в розрізі

Як видно з рисунку 2.1 найхолодніша точка в 184 °С трохи зміщена від центру. Це пов'язано з хаотичним розподілом пір за обсягом. З цієї причини не має сенсу розглядати дифузію вологи або пари усередині матеріалу. Аналітичні результати не дадуть достатньої точності, тому фізичні властивості матеріалу і їх залежності будуть засновані на експериментальних даних.

2.1 Експериментальні дослідження пористих структур теплоізоляційних матеріалів.

Для емпіричного дослідження впливу пористої структури на теплофізичні характеристики теплоізоляційних матеріалів та конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання необхідно обрати такі дослідні зразки, які б охоплювали різні види генезису пороутворювання.

Найпоширенішими теплоізоляційними матеріалами та елементами конструкцій теплового захисту енергетичного обладнання є глиноземисті матеріали (вогнетриви та керамзит).

В [21] авторами розглядається математична модель зростання парової бульбашки в необмеженому просторі. Теоретично, дану модель можна використовувати для розрахунку зміни об'єму пори на другому етапі формування пористої структури вогнетривів з вологої сировинної суміші.

Керамзитобетони з досить різною структурою пір можна отримати незначною варіацією складу суміші і температури термообробки [22]. А в роботі [23] керамзит піддавався впливу високої температури термообробки з використанням стандартної температурної кривої по ISO–834 та отримані суперечливі дані по кінцевій пористій структурі.

2.1.1 Дослідження процесу пороутворення у матеріалів на основі глини

Для дослідження особливостей формування пористої структури вогнетривких матеріалів досліджено вплив вмісту пластифікатора та вапна у сировинній суміші теплоізоляційного матеріалу на формування пористої структури вогнетриву та знайдено основні шляхи керування розмірами пір за допомогою хімічних реакцій.

Розглянемо сировину – глину. З глини виготовляються теплоізоляційні матеріали для захисту елементів промислових енергетичних установок такі як керамзит. Теплофізичні властивості цих матеріалів залежать від хімічного складу сировинної суміші, від фракції дисперсних частинок суміші, від пористої кінцевої структури теплоізоляційного матеріалу та від параметрів термічної обробки сировинної суміші. Тому для проведення серії експериментів по дослідженню формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу та впливу сформованої структури на теплофізичні характеристики теплоізоляційного матеріалу з глинозему вибиралися глини різного родовища з вмістом діоксиду кремнію (48...65) %,

оксиду алюмінію (3...10) %, оксиду заліза не більше 11 %, оксиду кальцію не більше 15 % (загалом чотирнадцять зразків). Для термообробки сировинної суміші використовувалася муфельна піч з термопарами ХК–0,1.

Для узагальнення результатів експерименту та знаходження особливостей формування пористої структури глиноземистих матеріалів використовувана глина була візуально класифікована по пластичності і результати зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристика використаної глини

№ зразка	Колір	Пластичність
1	гірчичний	4
2	біла глина	0
3	гірчичний	3
4	Сірий (біла глина)	3
5	гірчичний	4
6	біла глина	3
7	сірий	3
8	гірчичний	3
9	темно- сірий	2
10	сірий (біла глина)	3
11	гірчичний	3
12	біла глина	0
13	гірчичний	4
14	сірий (біла глина)	3

При цьому використовувалася наступна шкала:

0 – сухий порошок;

1 – непластична, під час малого навантаження розпадається на дрібні шматки;

2 – непластична, під час малого навантаження розпадається на великі шматки;

3 – непластична, руйнується тільки під час великого навантаження;

4 – пластична.

Дослідницькі зразки насичувались до максимальної вологості. Після цього частина кожного зразка висушувалася і непрямим прискореним методом (час сушки 10 хвилин, температура печі 130 °С) визначалася вологість зразків (таблиця. 2.2).

Таблиця 2.2 - Визначення вологості сировинної суміші глиноземистих зразків

№ зразка	Маса до сушки	Маса після сушки	Маса поглиненої води	Вологість W,%
1	11,357	10,22	1,137	10,01145
2	3,655	3,533	0,122	3,337893
3	7,318	6,554	0,764	10,44001
4	3,007	2,97	0,037	1,230462
5	9,589	9,108	0,481	5,016164
6	11,579	10,97	0,609	5,259522
7	10,093	9,573	0,52	5,152086
8	34,276	27,97	6,306	18,39771
9	6,428	5,832	0,596	9,271935
10	31	28,3	2,7	8,709677
11	36,728	33,214	3,514	9,567632
12	10,344	9,786	0,558	5,394432
13	30,955	29,819	1,136	3,669843
14	11,447	9,378	2,069	18,0746

За кольором отриманого матеріалу можна судити про хід протікань основних реакцій. Так, червоно–бурий колір матеріалу буде свідчити про окислювальні процеси, темно–сірий колір – про відновлюючі процеси.

Це підтверджує гіпотезу про вплив деструкційного генезису пір з уточненням, що для глиноземистих матеріалів з домішками розвивається не тільки дифузійна пористість, а й деструкційна, обумовлена затвердінням і

зменшенням об'єму рідкої фази укладеної з усіх боків матеріалу, що кристалізувався. Також домішки збільшують кінцеву міцність матеріалу.

Принципову схему утворення пір в сферичній частинці вологій сировинній суміші глиноземистого матеріалу під час її термообробці можна представити в спосіб наведений на рисунку 2.2. На першому етапі термообробки на поверхні матеріалу відбувається випаровування вологи і утворюється поверхнева кірка. При цьому для глинозему характерне утворення пористої кірки, яка частково затримує пороутворюючі пари. Можна провести аналогію з вспіненням піноскла, але для піноскла характерно, що кірка не пропускає газу [24]. Поверхнева кірка зазнає напруження на розтяг в процесі спучування. Напруження тим більше, чим щільніше кірка, тобто, чим більше вона перешкоджає виходу пороутворюючих газів. У сировинній суміші виникають центри пороутворення.

На наступному етапі термообробки сировинної суміші глинозему при початковому градієнті температур, в поверхневих шарах матеріалу починають поверхневу кірку, так і на внутрішні шари. Так внутрішні шари стискаються, збільшуючи свою щільність і вивільняючи частково капілярну вологу в зовнішні шари. Виникає псевдостійка зона Б, в якій напруги діють в різних напрямках і в якій відбувається більш рівномірне спучення матеріалу. Частина водяних парів із сухої зони А дифундують назад в зону Б. Також водяні пари, що утворилися в зоні В, також надходять в зону Б. Це приводить до різкого підвищення швидкості збільшення об'єму пір у зоні Б і, при певних умовах, з'являється розрив між зонами (тріщина, розшарування). При цьому в зоні А спостерігається нерівномірна пористість через нерівномірність виходу газів назовні і через дифундування частини газів в зону Б. У зоні В спостерігається збільшена щільність і малі за розміром пори. Це підтверджується і проведеними експериментами [25].

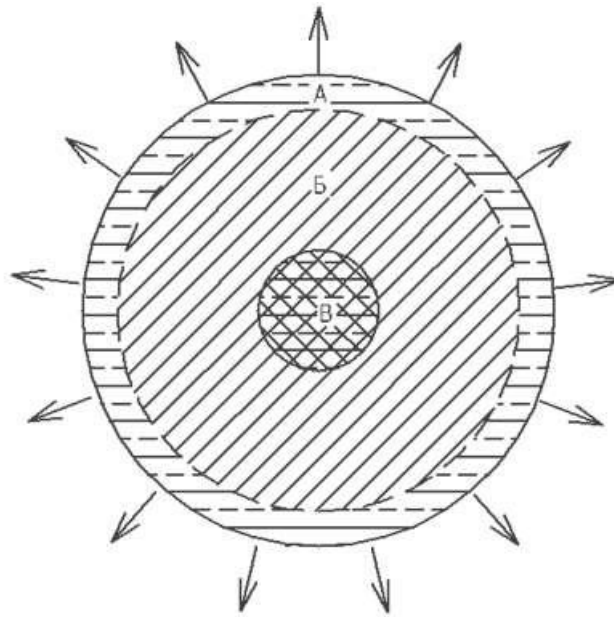


Рисунок 2.2 – Принципова схема утворення пір в сферичній частинці сировинній суміші глиноземистого матеріалу

Як слідує з принципової схеми утворення пір в сферичній частинці сировинній суміші глиноземистого матеріалу, для створення рівномірної пористості по теплоізоляційному матеріалу необхідно звести температурний градієнт по сировинній суміші до мінімуму, а також необхідно дотримуватися однорідної в'язкості в сировинній суміші. Температурний градієнт по сировинній суміші зводиться до мінімуму або завдяки більш повільного розігріву печі з матеріалом або завдяки зменшенню теплового опору. Тепловий опір раціонально зменшувати шляхом зменшення товщини матеріалу (наприклад, під час спікання порошків). Також важливо мінімізувати локальні екзо– і ендотермічні реакції, які можуть викликати нерівномірність спучування.

Результати експерименту відображені на рисунку 2.3.

Спучені зразки мали наступні характеристики:

– зразок №1– колір посередині – піщаний, колір кірки – жовтий з оранжевим відтінком, ближче до центру спостерігається поділ на пласти;

-зразок №2– колір – білий, спостерігаються тріщини, пір зовсім небагато;

– зразок №3 – колір – піщаний, є невеликі тріщини, добре простежується внутрішній шар з малою пористістю;

– зразок №4 – колір –білий - з малою пористістю, більш міцний;

– зразок №5 – колір з зовнішньої зони – піщаний відтінок, що свідчить про окислювальні процеси; колір всередині – сірий, що свідчить про відновлюючі процеси; спостерігається дрібна пористість і поділ на пласти;

– зразок №6 з пластифікатором – колір – піщаний, спостерігаються невеликі пори і тріщини, міцніший;

– зразок №7 з пластифікатором – колір з зовнішньої зони – темно сірий, колір всередині – білий, чітко спостерігається поділ на пласти, в поверхневому шарі спостерігаються невеликі сферичні пори, спостерігаються тріщини ,міцний;

– зразок №8 з пластифікатором – колір – піщаний, спостерігаються невеликі пори і тріщини, міцніший;

– зразок №9 з пластифікатором – колір – білий з невеликою ділянкою сірого всередині зразка, добре спостерігаються пори і невеликі тріщини;

– зразок №10 з пластифікатором – колір з зовнішньої зони – піщаний, спостерігаються невеликі сферичні пори;

– зразок №11 з вапном – з'явився місцями відтінок сірого кольору, що свідчить про відновлюючі процеси; пори збільшилися; з'явилася виражена канална пористість, що виникла завдяки поєднанню пір.

– зразок №12 з вапном – колір з зовнішньої зони – чорний, що свідчить про відновлюючі процеси в зовнішньому шарі суміші; колір всередині – чорний, чітко спостерігаються поділ на пласти, в поверхневому шарі спостерігаються невеликі сферичні пори;

– зразок №13 з вапном – колір з зовнішньої зони – піщаний, спостерігаються невеликі сферичні пори;

– зразок №14 з вапном – колір білий з невеликою ділянкою сірого всередині зразка, добре спостерігаються пори і невеликі тріщини .



(№1)



(№2)



(№3)



(№4)



(№5)



(№6)



(№7)



(№8)



(№9)

Рисунок 2.3 – Спучені зразки глини



(№10)



(№11)



(№12)



(№13)



(№14)

Рисунок 2.3, лист 2.

Після проведених експериментів можна зробити висновок, що на глини з домішками пластифікатора (зразки № 6 - 10) та вапна (зразки № 11 - 14) є більш міцніші, тому для покращення теплофізичних характеристик таких матеріалів, згідно з дослідженнями Кошлак Г.В. [26] пропонується додавати NaCl. В глинах без домішок погана пористість та міцність

2.2 Загальна фізико-хімічна характеристика матеріалу

Коли детально починаєш вивчати різні пористі матеріали, їх методи отримання і властивості, стає очевидним, що для створення пористого, термостійкого (250...800) °C матеріалу, який володіє хорошою міцністю і має

при цьому дуже малу теплопровідність, то перевагу слід віддати мінеральної сировини.

Серед різних аналогів мінеральної сировини необхідно виділити Сиопір, створений на основі природних мінералів. Сиопір це макропористий крупнодисперсний матеріал штучно створений. Даний матеріал являє собою гранули сферичної форми рожево - жовтого кольору, які мають силікатну природу. Виготовляється Сиопір шляхом з'єднання і низькотемпературної сушіння силікатної колоїдного матеріалу Сиоліт (КСВ-брила) [27]. Сировинна основа Сиоліта - крем'янисті гірські породи з високим вмістом кремнезему.

Дану сировинну основу досліджуємо з метою створення нового пористого матеріалу, позбавленого недоліків Сиопіра, таких як високі енергетичні витрати при виготовленні і низька теплопровідність.

Сировинна основа являє собою монолітну аморфну масу, виготовлену шляхом низькотемпературної обробки вихідної суміші гірських порід, з значним вмістом аморфного кремнезему (трепел, опока і ін.), Бікарбонату натрію, глини в суміші з водним розчином каустичної соди. Показники якості сировини відповідають даним, наведеним в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Показники якості сировини

Показник	Величина показника
1. Зовнішній вигляд	Монолітна гомогенна тверда маса
2. Колір	Оливково-гірчичний
3. Влагність (відносна), %, не більше	48
4. Середня щільність, кг/м ³ , не менше	1450
5. Вміст діоксиду кремнію, %, не менше	52
6. Вміст 1,5-оксиду алюмінію, %, не більше	6

Продовження таблиці 2.3

Показник	Величина показника
7. Вміст 1,5-оксиду заліза,%, не більше	6
8. Вміст оксиду кальцію,%, не більше	10

Рецептурно-технологічні параметри отримання нового пористого теплоізоляційного матеріалу і результати його випробувань наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Рецептурно-технологічні параметри отримання пористого теплоізоляційного матеріалу і результати випробувань

Показники	Пропонований, мас. ч.	Прототип, мас.ч.
Кремниста порода або кремнеземний матеріал техногенного походження, або їх суміш у співвідношенні 1: 1	100	100
Мінеральний наповнювач	1-75	1-150
Глина	1-75	-
Гідроксид натрію	1-15	1-30
Бікарбонат натрію	1-8	-
Вода	50-125	30-125
Коефіцієнт спучування	5,4-8	3,7
Пористість,%	71	63
Коефіцієнт теплопровідності при 20 °С, Вт/мК	0,11	0,15
Термостійкість, °С	1300	850
Температура застосування, °С	1200	750

У лабораторних умовах було встановлено, що спучування кременистих порід, так само як і кремнеземистих матеріалів техногенного походження, при відносно низьких температурах спостерігається в тому випадку, якщо їх вдається перевести в нетверду легкоплавку в'язку піропластичну газонепроникну фазу, поризующуюся при виділенні газів. Виявилось, що однією з таких фаз є гідросилікати, які утворюються в результаті взаємодії подрібненого активного кремнеземистого матеріалу з водним розчином гідроксиду лужного металу.

Був проведений експеримент з отримання матеріалу при різних значеннях початкової вологості. Отримані зразки при вологості приблизно 0 % (попередньо просушені в печі при температурі 25 °С) і при вологості 60 % (пропарені в вологому середовищі). Внутрішня структура отриманих зразків показана на рисунках 2.4 та 2.5. З малюнків видно, що при малій вологості виходить більш однорідна структура матеріалу, рівномірні, невеликі пори, без розривів. При великій же вологості пори неоднорідні з розривами, що робить матеріал менш міцним, надає йому велику теплопровідність і вологопоглинання.

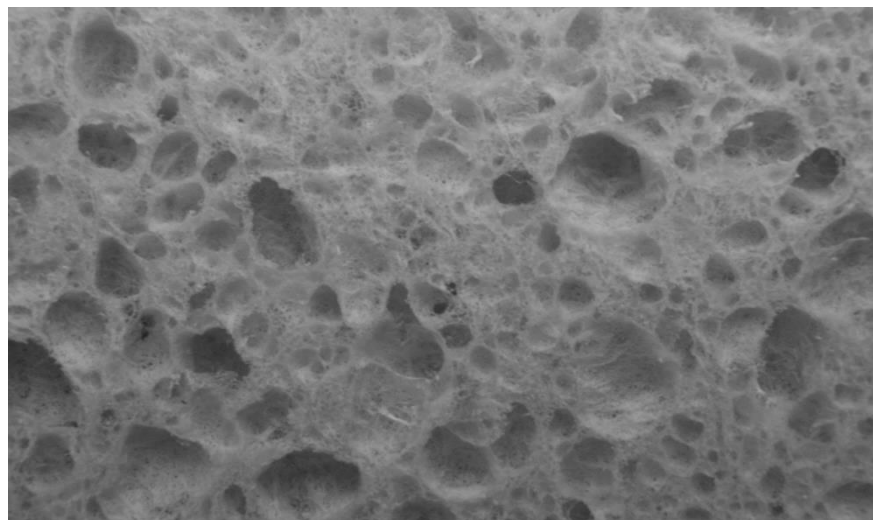


Рисунок 2.4- Зразок, отриманий при початковій вологості 0 %



Рисунок 2.5 - Зразок, отриманий при вологості 60 %

Якщо додатково ввести мінеральний наповнювач до складу сировинної суміші, то це забезпечить рівномірну пористість по перетину гранул при їх спученні, тобто збільшить ступінь гомогенізації пір дисперсного матеріалу. Необхідність гомогенізації пір в матеріалі розглядалася в першому розділі. Для приготування мінерального наповнювача придатні, як сировину, різні інертні мінеральні речовини у твердій формі, які не вступають в реакцію як з лугами. Найбільш раціонально використовувати кремнеземисті породи (кварцові піски, трепели, кварцити, опоки, граніти, різні відходи гірничопереробній промисловості) в яких вміст SiO_2 у вигляді кварцу становить не менше 30 %. Очевидно, що для отримання пористого дисперсного матеріалу, одну і ту ж подрібнену кременисту породу можна використовувати як сировину самого матеріалу, так і в якості наповнювача.

Використання в якості сировини для пористого дисперсного матеріалу активного кремнеземистого матеріалу техногенного походження або суміші кременистої породи з кремнеземистим матеріалом техногенного походження за вказаною вище рецептурі і технології, також дозволяє знизити капітальні витрати і підвищити якість таких властивостей легкого заповнювача, як міцність і теплопровідність. Причому, використання кремнеземистого матеріалу техногенного походження, надає можливість значного зниження

вмісту найбільш дефіцитного і дорогого компонента - гідроксиду лужного металу. Це пов'язано з тим, що крем'яні матеріали техногенного походження в більшості своїй є щелочесодержащими з вмістом оксидів лужних металів до 30 %.

Крім цього, використання кременистого матеріалу техногенного походження в суміші з кременистої породою дозволяє, в разі необхідності, збагачувати кременисту породу з відносно низьким вмістом SiO_2 , що значно розширює сировинну базу.

Оптимальні рецептурно-технологічні параметри отримання пористого заповнювача - температура і тривалість пропарювання суміші, концентрація і кількість лужного розчину, і спучування гранул залежать від хіміко-мінералогічного складу активного кремнезему. Так, для кременистих порід з високим вмістом активного кремнезему потрібні менша концентрація лужного розчину, а також більш низька температура і менша тривалість пропарювання суміші і сполученню гранул; і навпаки, з підвищенням вмісту домішок параметри розглянутих технологічних меж, при яких утворюється піропластична фаза, підвищуються.

Необхідно відзначити, що отримується пористий матеріал і процес його виробництва є екологічно чистими.

Отриманий матеріал можна буде застосувати в конструкціях утеплення будівель і споруд, так як він не виділяє токсичні речовини при експлуатації і відноситься до групи негорючих матеріалів. Також можливе використання даного матеріалу як пористий наповнювач для бетону.

На рисунках 2.6 - 2.9 наведені міцності і теплоізоляційні характеристики нового матеріалу в порівнянні з Сіапором. Більш детально про експериментальному знаходженні даних залежностей буде розказано в наступних розділах.

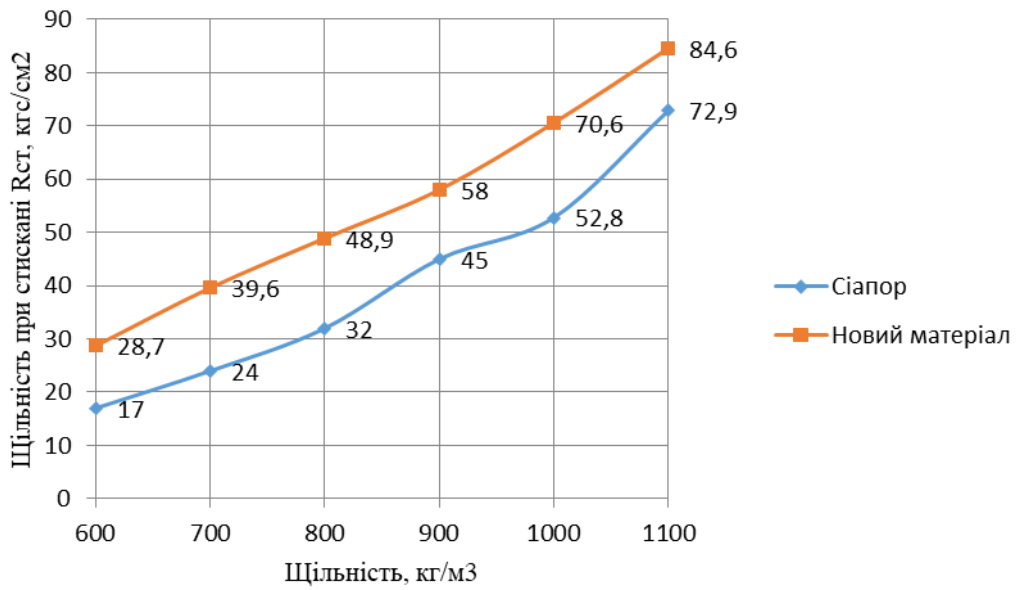


Рисунок 2.6 - Залежність коефіцієнта міцності при стисненні від щільності

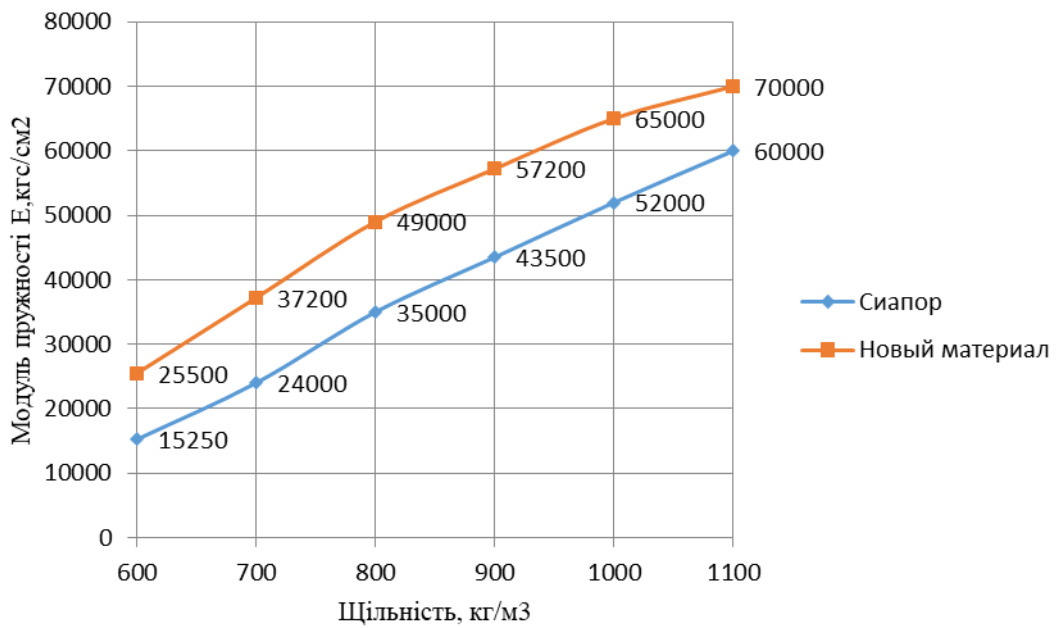


Рисунок 2.7- Залежність модуля пружності від щільності

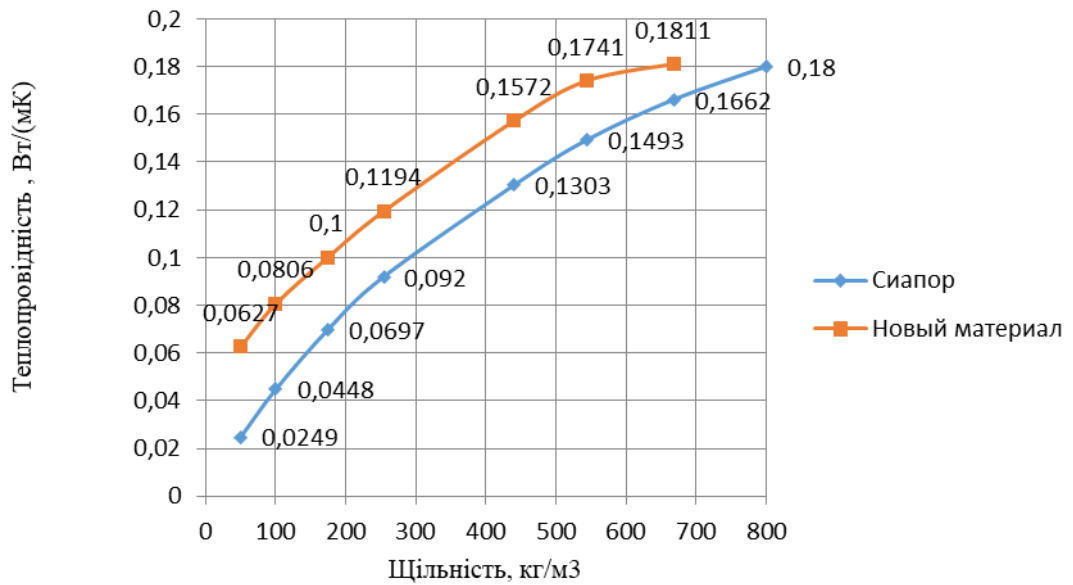


Рисунок 2.8 - Залежність теплопровідності від щільності

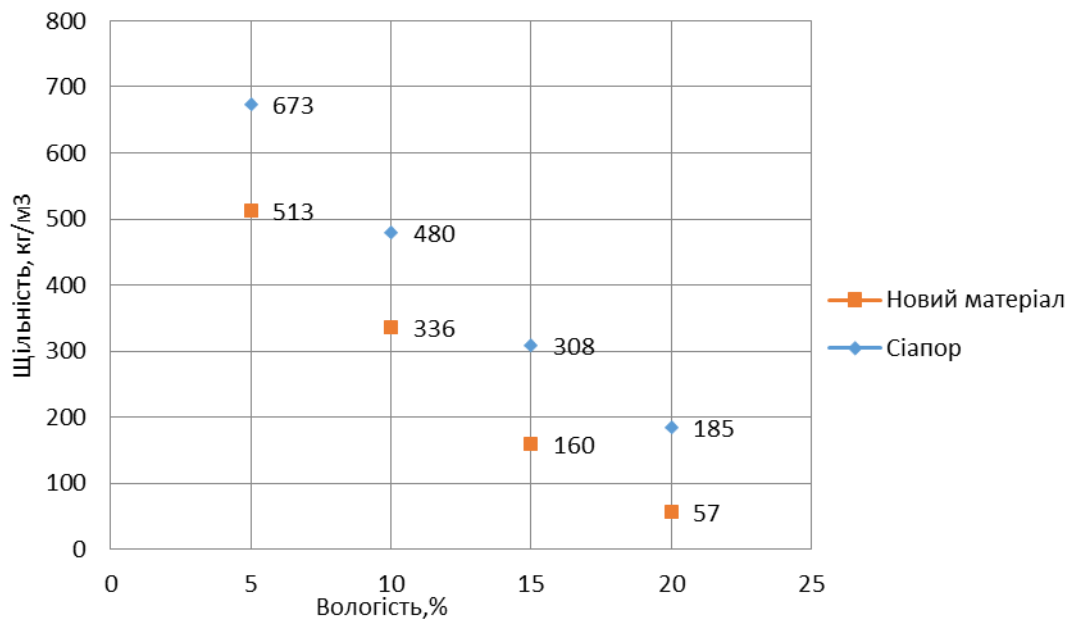


Рисунок 2.9 - Залежність щільності від вологості

Проаналізувавши дані рисунки 2.6 - 2.9 можна зробити висновок про те, що найкращими теплофізичними властивостями володіють зразки

пористого матеріалу з мінімальною щільністю, які утворюються при максимальній вологості. На жаль, як видно з рисунку 2.1, з мінімальною щільністю матеріал має найменшу міцність. Тому вирішуючи теплофізичних завдання, необхідно не забувати про міцності межах.

Також був проведений експеримент по визначенню робочої температури отриманого матеріалу. Заготовки нагрівалися в печі до температури в 1000 °С. При температурі близько 800 °С матеріал починає плавиться, але при цьому не запалюється. Матеріал стає склоподібним (збільшується вміст діоксиду кремнію). В такому стані значно погіршується теплопровідність матеріалу при збереженні пористої структури. Нижче приведена залежність теплопровідності матеріалу від температури отримана за результатами даного досвіду (рис. 2.10).

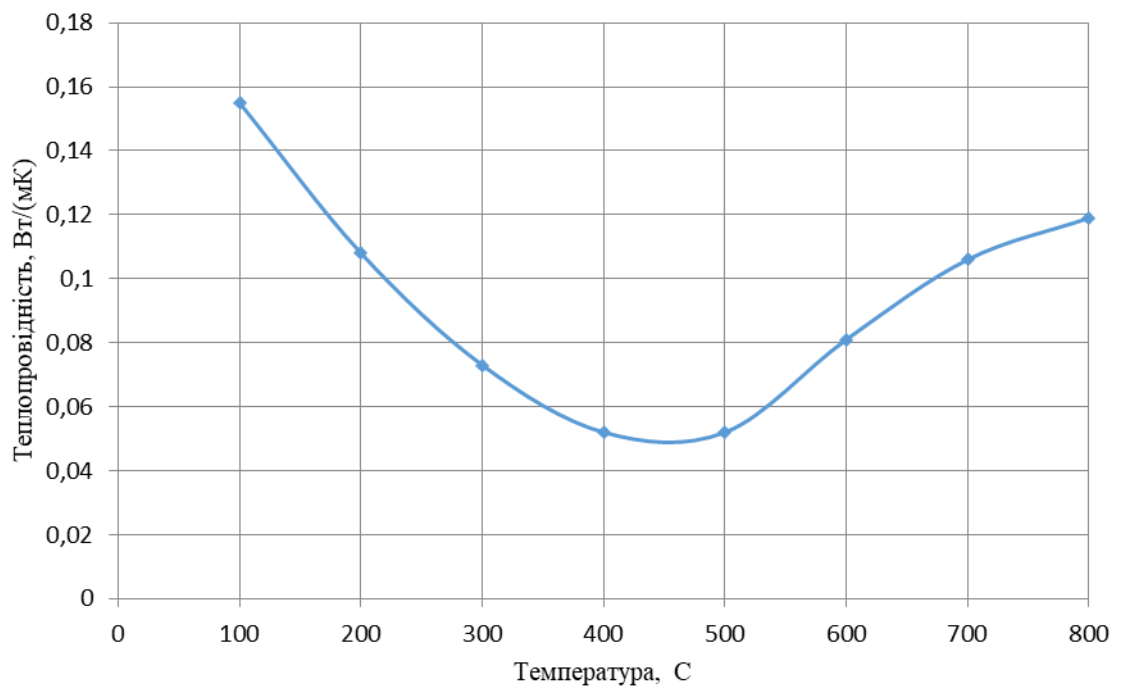


Рисунок 2.10 - Залежність теплопровідності матеріалу від температури термообробки

Таким чином, визначено основні характеристики матеріалу і їх функціональна якісний зв'язок з режимами термообробки.

Для побудови кількісних залежностей виконані більш детальні дослідження, результати яких представлені в наступних розділах.

2.3 Залежність теплофізичних властивостей матеріалу від термічних режимів обробки

Раніше було встановлено, що теплофізичні властивості досліджуваного пористого матеріалу залежать в основному від його щільності. Очевидно, що щільність матеріалу залежить від багатьох факторів, таких як температура обробки, початкова вологість матеріалу і час перебування матеріалу в вихровому апараті. Не варто також забувати про допущення зробленому в першому розділі - час пароутворення в матеріалі прагне до нуля і відбувається у всьому обсязі, безградієнтно. Градієнт температури в матеріалі по перетину виникає після певного часу.

Було проведено ряд експериментів з дослідження теплофізичних властивостей пористого матеріалу при різних термічних режимах його обробки. (див.табл.2.5)

У цих експериментах матеріал нагрівався при різних температурах, різної початкової вологості і витримувався різний час. Температура, початкова вологість і час варіювалися в заданих діапазонах. Зміна властивостей матеріалу досліджувався при стаціонарних умовах. Матеріал нагрівали в муфельній горизонтальній печі СШОЛ, глибиною (200...250) мм, d (100...120) мм, з регульованою на певний режим термопарою ХА 0-1100. Заготовки розміщувалися на поду печі в тиглях. В якості досліджуваного теплофізичні параметра матеріалу була обрана щільність. На підставі отриманих емпіричних значень щільності були отримані залежності, показані на рисунку 2.11 - 2.13. Щільність матеріалу визначалася як середня щільність матеріалу зі зміни ваги заготовок від геометричного розміру.

Теплопровідність отриманих зразків визначалася на вимірнику теплопровідності ІТ λ - 400 [28]. При дослідженнях використовувався метод

динамічного калориметра. У підставі методу лежать закономірності монотонного розігріву тонкої пластини в режимі, коли її температурне поле залишається квазістаціонарним (близьким до стаціонарного).

Таблиця 2.5 - Результати експерименту

№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂
1	+1	+1	+1	580	0,126	9	-1,215	0	0	960	0,08
2	-1	+1	+1	1948	0,093	10	+1,215	0	0	648	0,07
3	+1	-1	+1	2050	0,148	11	0	-1,215	0	2136	0,097
4	-1	-1	+1	2050	0,100	12	0	+1,215	0	1820	0,061
5	+1	+1	-1	683	0,145	13	0	0	-1,215	1192	0,082
6	-1	+1	-1	1450	0,148	14	0	0	+1,215	894	0,061
7	+1	-1	-1	1850	0,135	15	0	0	0	1290	0,076
8	-1	-1	-1	2100	0,143	16					

X₁ – температура (T₋₁=100 °C; T₀=300 °C; T₊₁=500 °C);

X₂ - час термічної дії (t₋₁=1 с; t₀=3 с; t₊₁=5 с);

X₃ – вологість матеріалу (φ₋₁=0 %; φ₀=30 %; φ₊₁=60 %);

Y₁ – щільність матеріалу, кг/м³;

Y₂ – теплопровідність матеріалу, Вт/(мК).

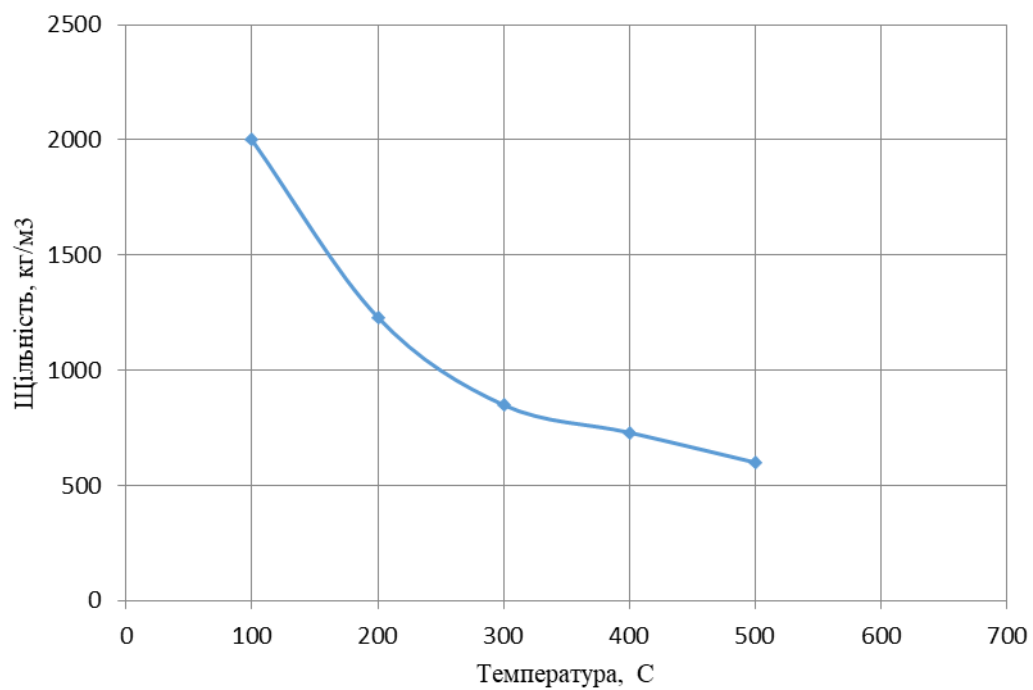


Рисунок 2.11 - Залежність щільності від температури

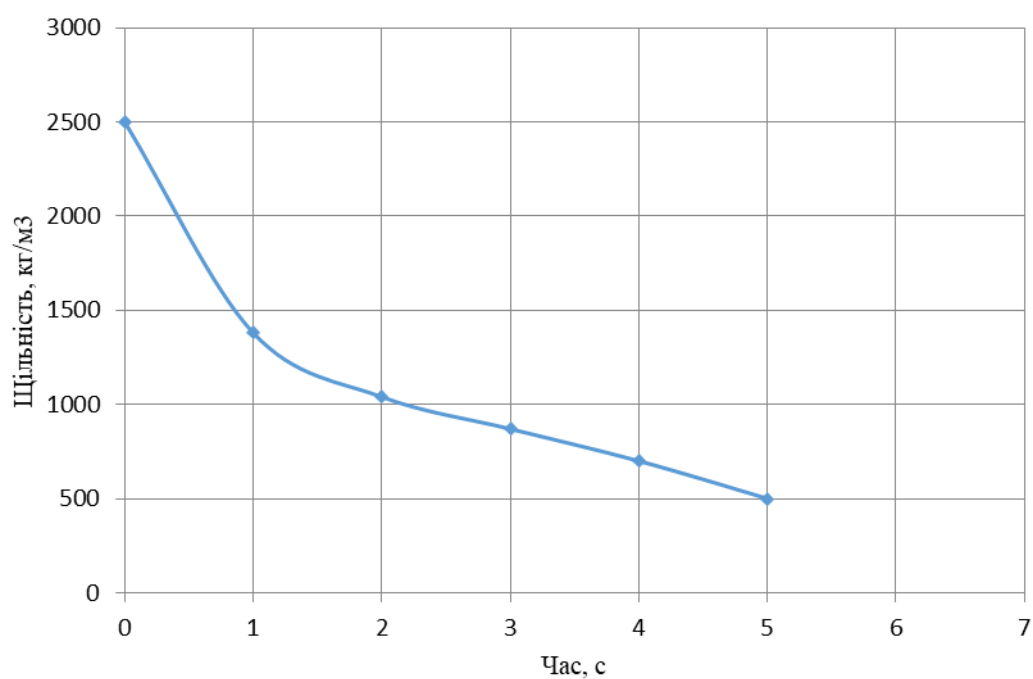


Рисунок 2.12 - Зміна щільності в часі при T = 500 °C

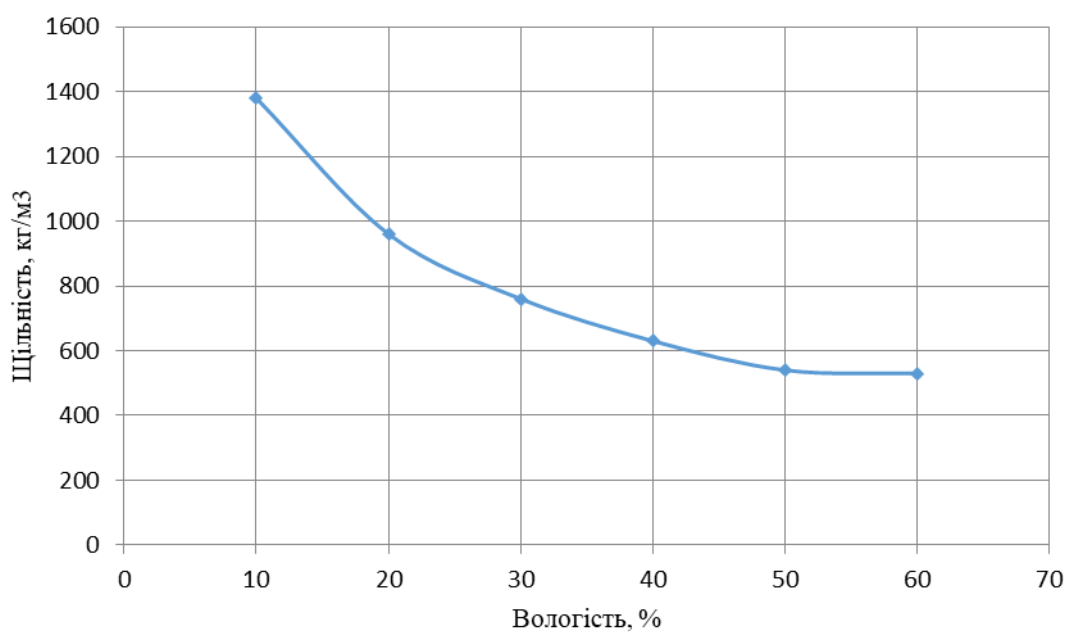
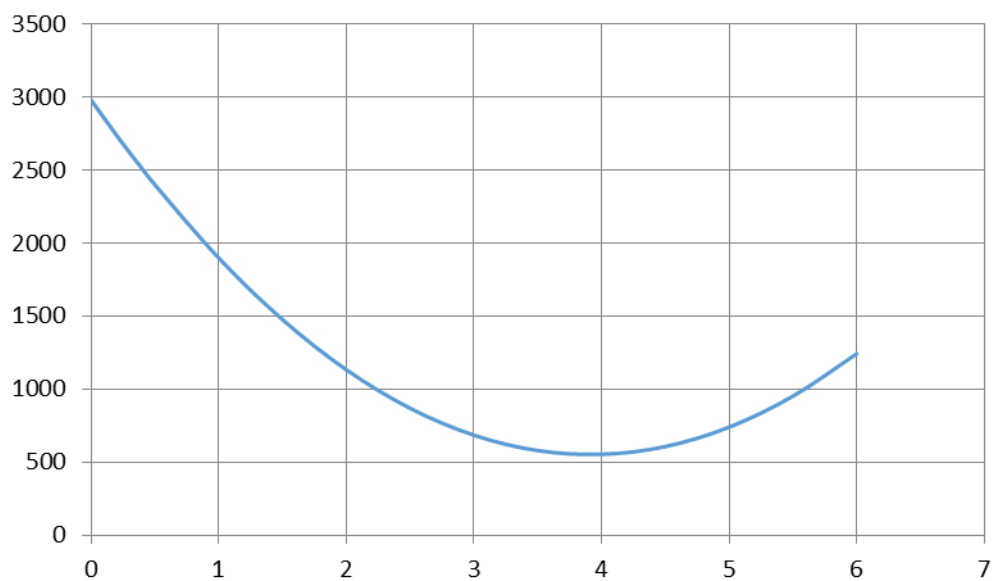


Рисунок 2.13 - Залежність щільності від початкової вологості при $T_{печи} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

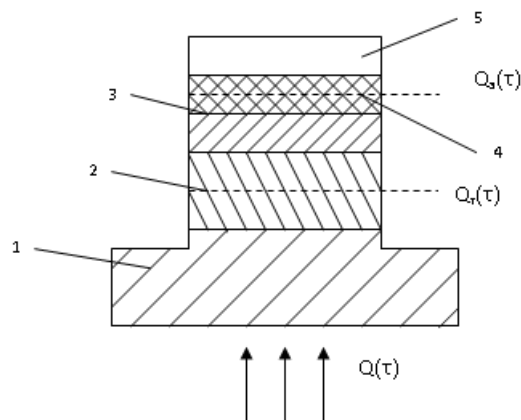
ІТ λ - 400 вимірює значення теплопровідності в діапазоні від 0,1 до 5 Вт/(м·К). Температурний діапазон при цьому дорівнює від - 100 $^\circ\text{C}$ до + 500 $^\circ\text{C}$.

На рисунку 2.14 приведена теплова схема методу вимірювання теплопровідності. Зразок, теплопровідність якого необхідно дізнатися 4, пластина 3 і стрижень 5 монотонно розігріваються тепловим потоком, що надходять від підстави 1.

Бічні поверхні стрижня 5, зразка 4, пластин 2 і 3 адіабатно ізольовані. Стрижень 5 і контактує пластина 3 виготовлені з міді, яка має високу теплопровідність, завдяки чому перепади температур на них незначні.

Тепловий потік проходить через середній розріз пластини 2, частково поглинається в ній і за рахунок нього розігрівається пластина 3, дослідний зразок 4, а також стрижень 5.

Розміри системи були обрані таким чином, щоб теплові потоки, які акумулюються дослідним зразком 4 і пластиною 3, були в 5-10 разів менше тих, які поглинаються стрижнем 5.



1 - основа; 2 пластина; 3 - контактна пластина; 4 досліджуваний зразок; 5 стрижень.

Рисунок 2.14 - Схема методу вимірювання теплопровідності

З огляду на те, що співвідношення електрорухомий сил термопар дорівнює співвідношенню температур, які вимірюються, в формулу (2.5) для розрахунку, замість значення температурного перепаду на досліджуваному зразку необхідно підставляти відповідний перепад електрорухомий сил в

мікровольтгах, а замість перепаду температур на тепломірів підставити - (теж в мкВ).

$$\lambda_3 = \frac{\delta_3}{R_3}, \quad (2.5)$$

$$R_3 = \frac{\Delta t_3 \cdot F(1 + K_c)}{\Delta t_T \cdot K_T} - R_k,$$

де δ_3 - товщина досліджуваного зразка, м;

R_k - поправка, що враховує тепловий опір контактів, (м²·°C) /Вт;

K_c - відносна поправка, що враховує часткове поглинання $Q_{(\tau)}$ досвідченим зразком;

F - площа поперечного перерізу зразка, м²;

K_T - коефіцієнт пропорційності, який характеризує теплову провідність пластини 2, Вт/град;

Δt_3 - перепад температур на дослідному зразку, °C;

Δt_T - перепад температур на пластині 2, °C.

В ході експериментів досліджувався вплив температури в печі X_1 , часу термічної дії X_2 , вологості матеріалу X_3 на щільність Y_1 і теплопровідність Y_2 матеріалу. Для моделювання процесу термічної обробки використовувалися методи планування експерименту. Для побудови квадратичної моделі залежності показника « Y » від досліджуваних факторів X_i , $i = 1, 2, 3$, використовувався ортогональний центральний композиційний план другого порядку з ядром 2^3 [29]. У таблиці 2.6 наведені рівні факторів в експерименті, і їх фактичні значення

Таблиця 2.6 - Умови проведення експерименту

№ п/п	Фактор	Код	Втрати факторів					
			-1,215	-1	0	1	1,215	Δ
1	Температура, °C	X ₁	57	100	300	500	543	200
2	Час впливу, с	X ₂	0,57	1	3	5	5,43	2
3	Вологість матеріалу, %	X ₃	5,7	10	30	50	54,3	20

Після обробки результатів експериментів отримана наступна модель залежності:

$$Y_1 = 1101,3 - 252X_1 - 344X_2 + 16,7X_3 - 164X_1^2 + 634,4X_2^2 - 1,6X_3^2 - 235,6X_1X_2 - 43,9X_1X_3 + 30,6X_2X_3 \quad (2.6)$$

$$Y_2 = 0,046 + 0,005X_1 - 0,004X_2 - 0,012X_3 + 0,026X_1^2 + 0,031X_2^2 + 0,023X_3^2 - 0,001X_1X_2 + 0,012X_1X_3 - 0,005X_2X_3 \quad (2.7)$$

де X_i, i = 1, 2, 3 - кодовані значення факторів.

Для перевірки значущості відмінності від нуля отриманих коефіцієнтів моделей за результатами чотирьох повторних дослідів в нульовій точці (X₁=X₂=X₃=0) значення Y₁: 1346, 1259, 1389, 1166; та Y₂: 0,076; 0,071; 0,087; 0,071; була знайдена дисперсія помилки дослідів S². Після обчислення за формулою

$$S^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (2.8)$$

отримано S₁ = 98,78 та S₂ = 0,0075.

З урахуванням отриманої дисперсії помилки дослідів були знайдені пороги значущості для різних ефектів факторів $h_k \cdot S$, де $h_k = t_{\text{ТАБЛ}} \sqrt{c_k}$ ($k=1;2;3$), $t_{\text{ТАБЛ}}$ - табличне значення критерія Стьюдента, знайдене для рівня значущості $\alpha = 0,05$ і числа ступенів свободи $\varphi = 3$, $t_{\text{ТАБЛ}}(0,05;3) = 3,18$ [30], c_k - елементи дисперсної матриці для відповідних ефектів факторів.

В результаті були отримані значення для щільності та теплопровідності відповідно: для лінійних ефектів $h_1 = 0,961$ та $h_1 = 0,007$; для квадратичних ефектів $h_2 = 1,525$ та $h_2 = 0,011$; для парних ефектів взаємодії чинників $h_3 = 1,125$ та $h_3 = 0,008$. k -ий ефект факторів вважається значимо відрізняється від нуля, якщо відповідний йому модуль коефіцієнта, що стоїть при ньому в моделі, більше порога значимості для даного ефекту. Для рівняння щільності це: для лінійних ефектів більше - 94,93, для квадратичних ефектів - більше 150,64, для ефектів взаємодії чинників - більше 111,13. Для рівняння теплопровідності пороги значущості будуть відповідати: для лінійних ефектів - 0,0000525, для квадратичних ефектів - 0,0000825, для ефектів взаємодії чинників - 0,00006.

В результаті для значимо впливають факторів і їх ефектів взаємодії були отримані наступні моделі, в кодованих значеннях:

$$Y_1 = 1100,1 - 252X_1 - 344X_2 - 164X_1^2 + 634,4X_2^2 - 235,6X_1X_2, \quad (2.9)$$

$$Y_2 = 0,046 + 0,005X_1 - 0,004X_2 - 0,012X_3 + 0,026X_1^2 + 0,031X_2^2 + 0,023X_3^2 - 0,001X_1X_2 + 0,012X_1X_3 - 0,005X_2X_3$$

В ході досліджень встановлено такі закономірності. Найбільш сильний вплив на щільність надає час термообробки матеріалу в печі. Причому, чим воно більше, тим менше щільність. Це пояснюється тим, що в заданому температурному діапазоні протягом досліджуваного періоду часу в матеріалі

відбувалися процеси зневоднення і зміцнення каркаса. Якби ми істотно (за діапазоном вимірювання) підвищили вологість сировинної заготовки, то в цьому випадку матеріал був би менш щільним і цей фактор став би домінуючим. Але при цьому міцність готового матеріалу не відповідала б споживчим якостям.

Температура також обернено впливає на щільність. Ці залежності відображені і в рівнянні (2.9) відповідними коефіцієнтами і знаками при них.

На теплопровідність впливає крім названих чинників і вологість сировинної заготовки. Причому, чим вище вологість, тим менше значення набуває теплопровідність, що також кількісно відображає рівняння (2.9) для \hat{Y}_2 .

Для перевірки адекватності отриманих моделей (2.8), (2.9) за формулою

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{n - m} \sum_{i=1}^n \left(Y_i - \hat{Y}_i \right)^2 \quad (2.10)$$

була знайдена залишкова дисперсія $S_{\text{ост}}^2$, де Y_i - фактичне \hat{Y}_i - розрахункові значення показника Y в i -му досліді, $i = 1, \dots, 15$, n - число дослідів, m - число коефіцієнтів в моделі, $m = 6$. В результаті розрахунків по формулі (2.10) $S_{\text{ост1}}^2 = 55660,7$ та $S_{\text{ост2}}^2 = 0,00033$.

Перевірка адекватності отриманої моделі істинної залежності проводилась за критерієм Фішера [31]. Розрахункове значення статистики Фішера

$$F_p = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S^2}; \quad (2.11)$$

Розрахунок показує: $F_{p1} = 5,704$ та $F_{p2} = 5,8$, що менше табличного значення $F_{ТАБЛ} = (0,05;9;3) = 8,812$. Так як $F_p < F_{ТАБЛ}$, то отримані моделі адекватні істинної залежності і з вірогідністю 0,95 вона може використовуватися для аналізу і прогнозу залежності щільності і теплопровідності від температури, часу впливу, вологості матеріалу в області близькою до області проведення експерименту.

Виходячи з вище наведених даних щільності і теплопровідності, можна визначити залежність цих двох параметрів один від одного (див.рис. 2.15).

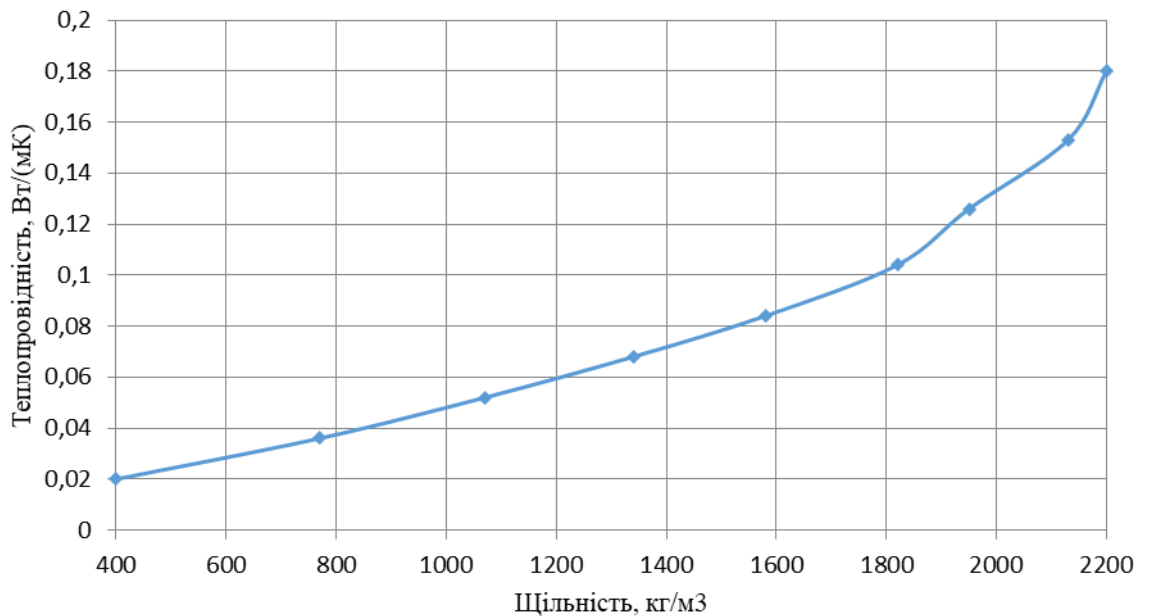


Рисунок 2.15 - Залежність теплопровідності матеріалу від його щільності

Проаналізувавши рисунок 2.15 можна зробити висновок про те, що зі збільшенням щільності також збільшується значення теплопровідності матеріалу. Отже, для отримання матеріалу з найменшою теплопровідністю необхідно досягати мінімально допустимої щільності, з урахуванням межі міцності матеріалу.

Також представляє інтерес знайти мінімальне значення теплопровідності даного матеріалу. Продифференціював рівняння теплопровідності по кожній похідній і прирівняти отримані рівняння до нуля, отримаємо

$$\begin{cases} 0,005 + 0,052 \cdot X_1 - 0,001 \cdot X_2 + 0,012 \cdot X_3 = 0 \\ -0,004 + 0,001 \cdot X_1 + 0,062 \cdot X_2 - 0,005 \cdot X_3 = 0 \\ -0,012 + 0,012 \cdot X_1 - 0,005 \cdot X_2 + 0,046 \cdot X_3 = 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

Вирішивши цю лінійну систему рівнянь матричним способом були знайдені значення невідомих $X_1 = -0,167$, $X_2 = 0,087$, $X_3 = 0,314$, при яких значення функції склало $Y_2 \min = 0,0435$. В натуральних значеннях, мінімальної теплопровідність буде при наступних параметрах: температури $266,6 \text{ }^\circ\text{C}$, часу термічної дії $3,174 \text{ с.}$, Початкової вологості $36,28 \text{ \%}$.

Варто звернути увагу на те, що мінімум теплопровідності матеріалу відповідає встановленим нормам для утеплювачів на основі кремнезему $0,052 + 0,0001 \cdot t_{\text{cp}}$ [32].

2.4 Залежність міцності матеріалу від термічних режимів обробки

Механічні властивості визначають поведінку матеріалу при деформації і руйнуванні від дії зовнішніх навантажень. Від механічних властивостей матеріалу залежить область його застосування.

Для виявлення впливу термічних режимів обробки на механічні властивості оброблюваного матеріалу будується математична модель процесу термічної обробки пористого матеріалу [33,34]. Як показники процесу, що характеризують поведінку матеріалу при деформації і руйнування від дії зовнішніх навантажень, були взяті модуль пружності Y_1 і міцність матеріалу Y_2 . Як фактори, що характеризують термічний режим

обробки, були взяті температура термічного процесу X_1 , час термічної дії X_2 , вологість матеріалу X_3 і пористість матеріалу X_4 .

Для визначення механічних властивостей при статичних випробуваннях найбільш підходящими є дані, отримані при випробуванні на розтяг [20]. Випробування на розтяг проводиться на спеціальних машинах, які записують діаграму розтягування залежності подовження зразка Δl (мм) від діючого навантаження P , тобто $\Delta l = f(P)$. На основі діаграми розтягування будують діаграму «залежність відносного подовження δ (%) від напруги σ ». Згідно із законом Гука (2.13) визначаємо модуль пружності E .

$$\sigma = E\delta. \quad (2.13)$$

Межа міцності визначається

$$\sigma = P / F, \quad (2.14)$$

де P - навантаження, що відповідає межі міцності;

F - вихідне поперечний переріз зразка.

Відносне подовження δ представляє відношення приросту довжини зразка після розтягування до первісної довжині (%)

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100, \quad (2.15)$$

де l_0 та l_1 - довжина зразка до і після пластичної деформації відповідно.

Методика випробувань на міцність здійснюється безпосередньо на готовій деталі без її руйнування. При випробуванні на міцність виробляють вдавлення в випробовуваний матеріал индентора, виготовленого з значно

більш твердого матеріалу, ніж випробуваний. Про твердості випробовуваного матеріалу судять за глибиною проникнення (твердість по Роквеллу). Чим більше опір матеріалу пластичної деформації, тим на меншу глибину проникає індентор і тим вище твердість.

При визначенні міцності по Роквеллу в випробний тіло вдавлюється алмазний конус з кутом при вершині 120 °. Конус вдавлюється при додатку двох послідовних навантажень: попередньої ($P = 10$ кгс) і основний.

Дані, отримані в ході експерименту, наведені в таблицях 2.7 і 2.8. Для побудови моделей використовувався ортогональний центральний композиційний план другого порядку з ядром 2^4 [35].

Таблиця 2.7 - Рівні варіювання

X	-1,414	-1	0	+1	+1,414	Δ
X_1	20	100	300	500	580	200
X_2	0,2	1	3	5	5,8	2
X_3	24	30	45	60	66	15
X_4	56	60	70	80	84	10

Таблиця 2.8 - Отримані значення модуля пружності і міцності

№	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	№	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2
1	+	+	+	+	0,181	0,020	14	-	+	-	-	0,388	0,039
2	-	+	+	+	0,362	0,031	15	+	-	-	-	0,419	0,053
3	+	-	+	+	0,395	0,038	16	-	-	-	-	0,530	0,078
4	-	-	+	+	0,519	0,076	17	-1,414	0	0	0	0,321	0,047
5	+	+	-	+	0,154	0,023	18	+1,414	0	0	0	0,375	0,051

Продовження таблиці 2.8

№	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₁	Y ₂	№	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₁	Y ₂
6	-	+	-	+	0,416	0,035	19	0	-1,414	0	0	0,322	0,046
7	+	-	-	+	0,433	0,041	20	0	+1,414	0	0	0,353	0,050
8	-	-	-	+	0,429	0,039	21	0	0	-1,414	0	0,421	0,056
9	+	+	+	-	0,159	0,018	22	0	0	+1,414	0	0,519	0,076
10	-	+	+	-	0,428	0,044	23	0	0	0	-1,414	0,283	0,038
11	+	-	+	-	0,444	0,048	24	0	0	0	+1,414	0,480	0,063
12	-	-	+	-	0,433	0,046	25	0	0	0	0	0,331	0,027
13	+	+	-	-	0,190	0,025							

X₁ – температура термічного процесу (T₋₁=100 °C; T₀=300 °C; T₊₁=500 °C);

X₂ – час термічного впливу (t₋₁=1 с; t₀=3 с; t₊₁=5 с);

X₃ – вологість матеріалу (φ₋₁=30 %; φ₀=45 %; φ₊₁=60 %);

X₄ - пористість матеріалу (φ₁=60 %; φ₂=70 %; φ₃=80 %);

Y₁ – модуль пружності, МПа;

Y₂ - міцність на стискання, МПа.

Після проведених розрахунків за алгоритмом методу були отримані наступні квадратичні моделі залежності Y₁ та Y₂ від досліджуваних факторів X_к, к = 1, ... 4.

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 0,376 - 0,053X_1 - 0,064X_2 + 0,005X_3 + 0,0009X_4 - 0,020X_1^2 - \\
 & - 0,025X_2^2 + 0,042X_3^2 - 0,003X_4^2 - 0,043X_1X_2 + 0,005X_3X_4
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

$$\begin{aligned}
Y_2 = & 0,05 - 0,0058X_1 - 0,0089X_2 + 0,0008X_3 + 0,0006X_4 - \\
& - 0,0046X_1^2 - 0,0051X_2^2 + 0,004X_3^2 - 0,0038X_4^2 - 0,0003X_1X_2 - 0,0015X_1X_3 + \\
& + 0,0003X_1X_4 - 0,0004X_2X_3 + 0,0009X_2X_4 + 0,0041X_3X_4,
\end{aligned} \quad (2.17)$$

де X_1, X_2, X_3, X_4 кодовані значення факторів [30,31].

Для перевірки залежності впливу факторів і їх взаємодій на показники, а також адекватності отриманих помилок спостережень для S_1^2 і S_2^2 , відповідно для Y_1 та Y_2 . Для цього кожного показника в «нульовий» точці $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 0$ були проведені чотири повторних досвіду. Їх результати для значень Y_1 : 0,300; 0,358; 0,347; 0,319, для значень Y_2 : 0,023; 0,034; 0,024; 0,026.

В результаті при розрахунку за формулою оцінки дисперсії помилки спостереження

$$S^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (Y_i - \bar{Y})^2, \quad (2.18)$$

де Y_i - наблюденное значення показника Y в i -му повторному досвіді, а \bar{Y} - середнє значення Y в «нульовий» точці, отримали $S_1^2 = 0,0007$ та $S_2^2 = 0,0000025$.

Пороги значущості для оцінок коефіцієнтів, що характеризують силу впливу факторів і їх ефектів взаємодії, знаходилися як $h_i \cdot S$, де S - середньоквадратичне відхилення помилки спостереження $h_i = t_{kp}(\alpha; \varphi) \cdot \sqrt{c_i}$, $t_{kp}(\alpha; \varphi)$ - критичне значення розподілу Стьюдента для рівня значущості і числа ступенів свободи φ . У проведених дослідженнях $\varphi = 3$, $c_1 = 0,05$ для x_i , $c_2 = 0,125$, для x_i^2 , $c_3 = 0,0625$, для $x_i \cdot x_j$, $i, j = (1..4)$ [20]. В результаті розрахунків наведеної вище формулою «пороги значущості» для оцінок коефіцієнтів склали для рівня значущості $\alpha = 0,05$, для показника Y_1 : 0,021;

0,033; 0,023, для показника Y_2 : 0,004; 0,0056; 0,004. Для рівня значимості для Y_1 : 0,014; 0,020; 0,015; для Y_2 : 0,003; 0,0042; 0,003. Виключивши з моделей чинники і їх взаємодії, величина коефіцієнтів яких по модулю менше зазначених «порогів значущості», для рівня значущості $\alpha = 0,1$ отримали наступні залежності.

$$\begin{cases} Y_1 = 0,374 - 0,053X_1 - 0,064X_2 - 0,020X_1^2 + 0,025X_2^2 + 0,042X_3^2 - 0,043X_1X_2, \\ Y_2 = 0,05 - 0,0058X_1 - 0,0089X_2 - 0,0046X_1^2 - 0,0051X_2^2 + 0,0041X_3X_4, \end{cases}$$

Треба відзначити, що вплив на Y_1 $X_1, X_2, X_3^2, X_1 \cdot X_2$ значимо з ймовірністю 0,95, а вплив X_1^2 та X_2^2 з ймовірністю 0,90. Аналогічно, вплив на Y_2 $X_1, X_2, X_3 \cdot X_4$ значимо з ймовірністю 0,95, а X_1^2 та X_2^2 з ймовірністю 0,9.

Перевірка адекватності отриманих моделей проводилася за критерієм Фішера. Розрахункове значення F статистики знаходилося по формулі

$$F_p = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S^2}, \quad (2.19)$$

Для отриманих моделей залишкова дисперсія перебувала

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{n - m} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (2.20)$$

де $n = 25$ - число дослідів, m - число коефіцієнтів в моделі.

В результаті для Y_1 : $S_{\text{ост}1}^2 = 0,0053$ та $F_{p1} = 7,56$; для Y_2 : $S_{\text{ост}2}^2 = 0,00002$ та $F_{p2} = 8,00$.

Табличні значення F-статистики для рівня значущості $\alpha = 0,05$ для Y_1 $F_{\text{ТАБЛ}} = F(0,05;18;3) = 8,675$, для Y_2 $F_{\text{ТАБЛ}} = F(0,05;19;3) = 8,667$. Так як F_p для обох

моделей менше $F_{ТАБЛ}$, то обидві моделі адекватні з надійністю 0,95 істинної залежності і можуть бути використані для технологічного аналізу процесу і прогнозу значень показників Y_1 та Y_2 .

Так як регресійні залежності для модуля пружності Y_1 і міцності Y_2 вийшли адекватними експериментальними даними, то цей факт дозволив використовувати їх для управління процесом термічної обробки. В якості опції ланцюга була взята міцність Y_2 , а модуль пружності Y_1 був включений в обмеження. В результаті отримана наступна оптимізаційна модель процесу термічної обробки.

$$\max Y_2 = 0,05 - 0,0058X_1 - 0,0089X_2 - 0,0046X_1^2 - 0,0051X_2^2 + 0,0041X_3X_4 \quad (2.21)$$

$$Y_1 = 0,374 - 0,053X_1 - 0,064X_2 - 0,020X_1^2 - 0,025X_2^2 + 0,042X_3^2 - 0,043X_1 \cdot X_2 \leq 0,45 \quad (2.22)$$

Для визначення оптимального режиму термічної обробки складалася функція Лагранжа

$$L = Y_2 + \lambda(Y_1 + X_5 - 0,45). \quad (2.23)$$

Для визначення оптимальних значень $X_i, i = 1, \dots, 5$ отримана система рівнянь.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial X_1} = -0,0058 - 0,0092X_1 + \lambda(-0,53 - 0,4X_1 - 0,43X_2) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial X_2} = -0,0089 - 0,0102X_2 + \lambda(-0,64 - 0,5X_2 - 0,43X_1) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial X_3} = 0,0041X_4 + 0,84 \cdot \lambda \cdot X_3 = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial X_4} = 0,0041X_3 = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial X_5} = \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0,374 - 0,053X_1 - 0,064X_2 - 0,02X_1^2 - 0,025X_2^2 + \\ + 0,042X_3^2 - 0,043X_1 \cdot X_2 + X_4 - 0,45 = 0 \end{array} \right.$$

В результаті рішення даної системи рівнянь отримана стаціонарна точка функції Лагранжа в кодованих значеннях змінних X_i : $X_1 = -0,63$; $X_2 = -0,87$; $X_3 = 0$; $X_4 = 0$; $X_5 = 0,076$; $\lambda = 0$; в натуральних величинах: $X_1=174$ °С, $X_2=1,3$ с., $X_3=45$ %, $X_4=70$ %. Точковий прогноз показників за отриманими моделям для даного термічного режиму обробки пористого матеріалу склав: значення модуля пружності одно 0,413, значення міцності матеріалу на стиск одно 0,056.

Звідси випливає, що основним чинником, що визначає міцність теплоізоляційного пористого матеріалу, є тривалість термічної дії. Очевидно, що саме цей фактор визначає інтенсивність тепломасообмінних процесів у вихідному матеріалі, яка взаємопов'язана з основним технологічним показником - температурою зовнішнього теплоносія. Відзначено також, що термодинамічні параметри пара визначаються температурою і тривалістю

термічного контакту з теплоносієм. Таким чином, використовуючи отримані дані можна прогнозувати властивості пористого матеріалу.

2.5 Кінетика теплової обробки і розробка основ технологічного процесу термічної обробки

Спосіб отримання даного пористого теплоізоляційного матеріалу включає в себе наступні етапи: подрібнення активного кремнеземистого матеріалу і мінерального наповнювача, перемішування компонентів сировинної суміші з водним розчином гідроксиду лужного металу, пропарювання до необхідної вологості, грануляцію отриманої суміші і спучування гранул

Було встановлено експериментально, що істотними факторами керованого впливу на кінетику газоутворення і формування пористої структури є температура, час термообробки і початкова вологість матеріалу. Процес спучування на стадії оптимальних пластично-в'язких властивостей суміші в поєднанні з пропонованими газообразователями інтенсифікує процес газовиділення, який протікає рівномірно у всьому обсязі сировинного матеріалу, забезпечуючи освіту замкнутих пір, результати експерименту представлення на рисунках 2.16 – 2.21.

Низькотемпературними газообразователями служать: гидратная вода, яка є складовою частиною вихідних компонентів суміші, бікарбонат натрію і глина. Застосування пропонованих газообразователей і технологічних режимів сприяє реалізації інтенсивного і керованого процесу виділення нетоксичних і не викликають корозію газів. При цьому їх обсяг істотно збільшується, в порівнянні з початковим обсягом

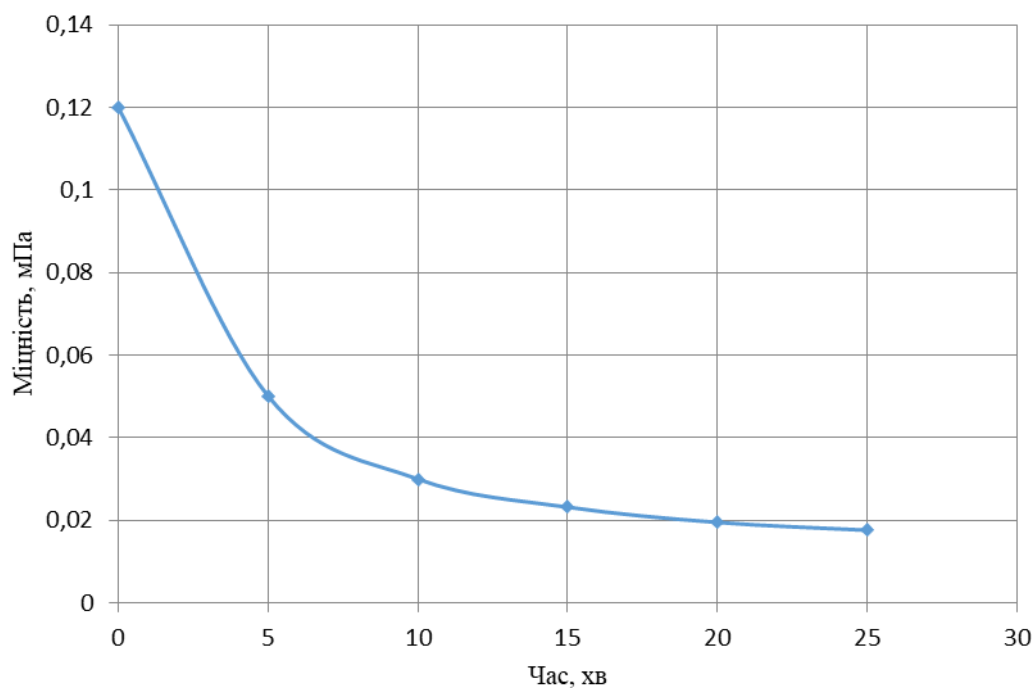


Рисунок 2.16 - Залежність міцності від часу спучування

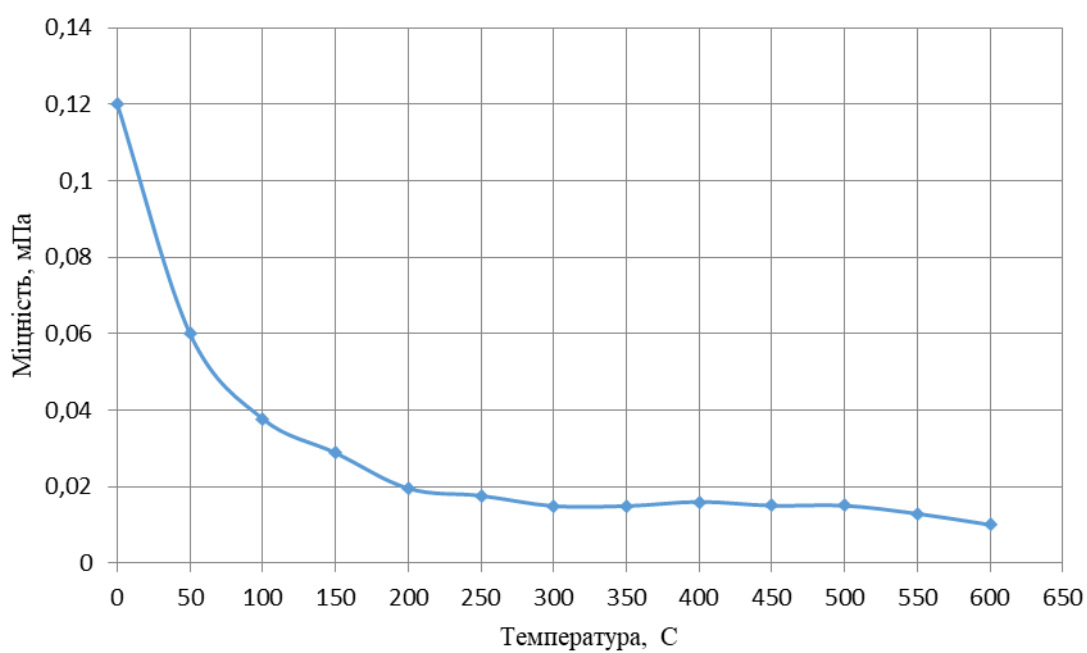


Рисунок 2.17 - Залежність міцності від температури режиму термообробки

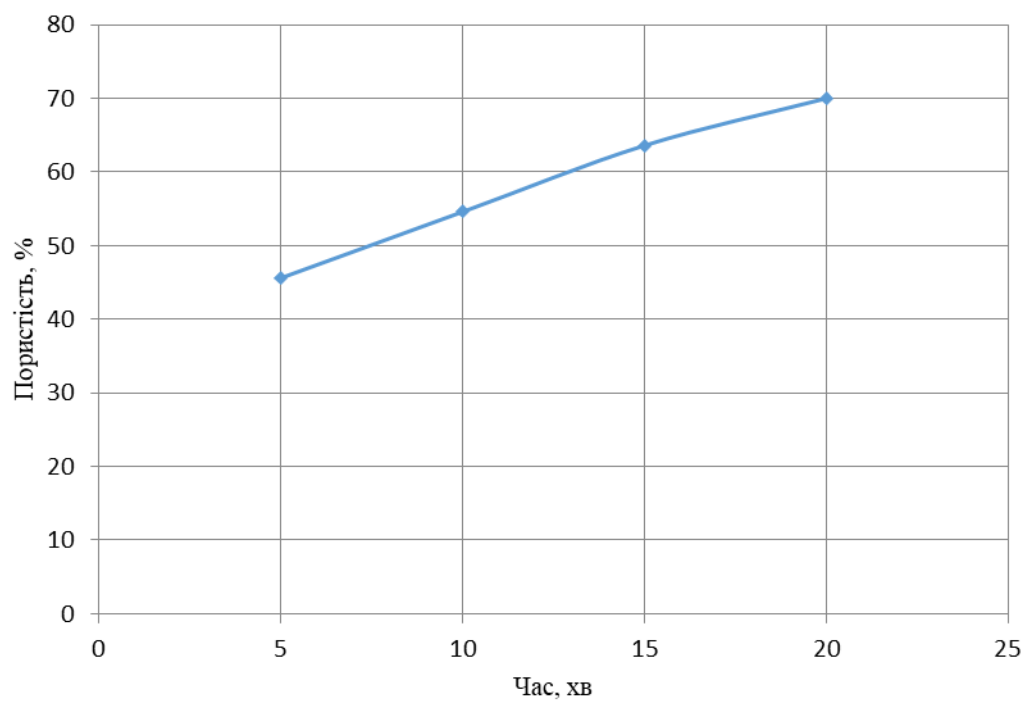


Рисунок 2.18 - Залежність пористості від часу режиму термообробки

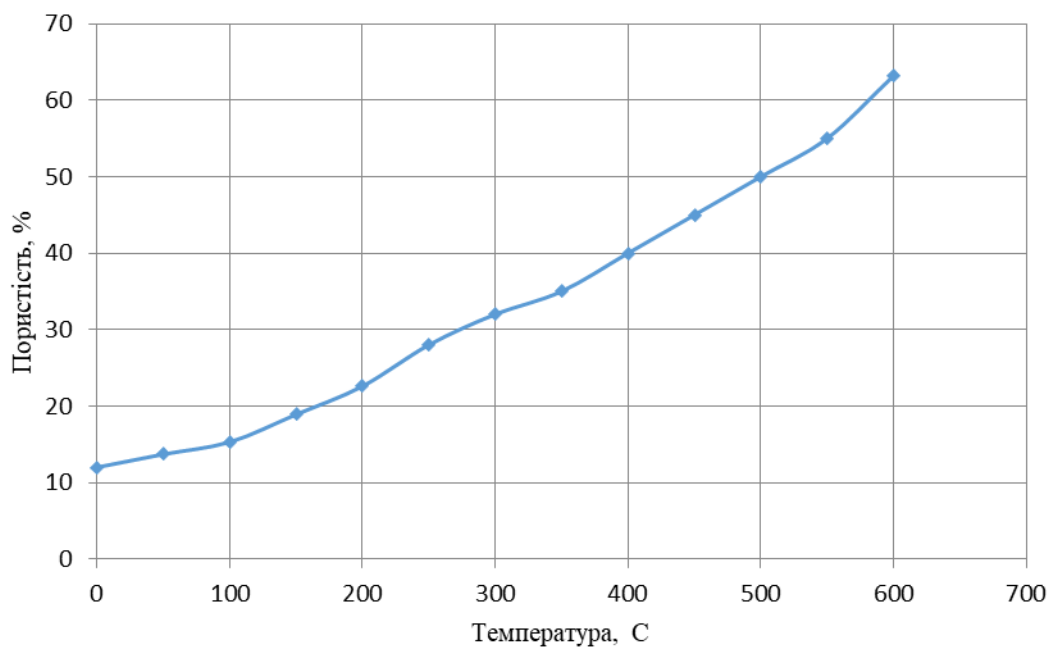


Рисунок 2.19 - Залежність пористості від температури режиму термообробки

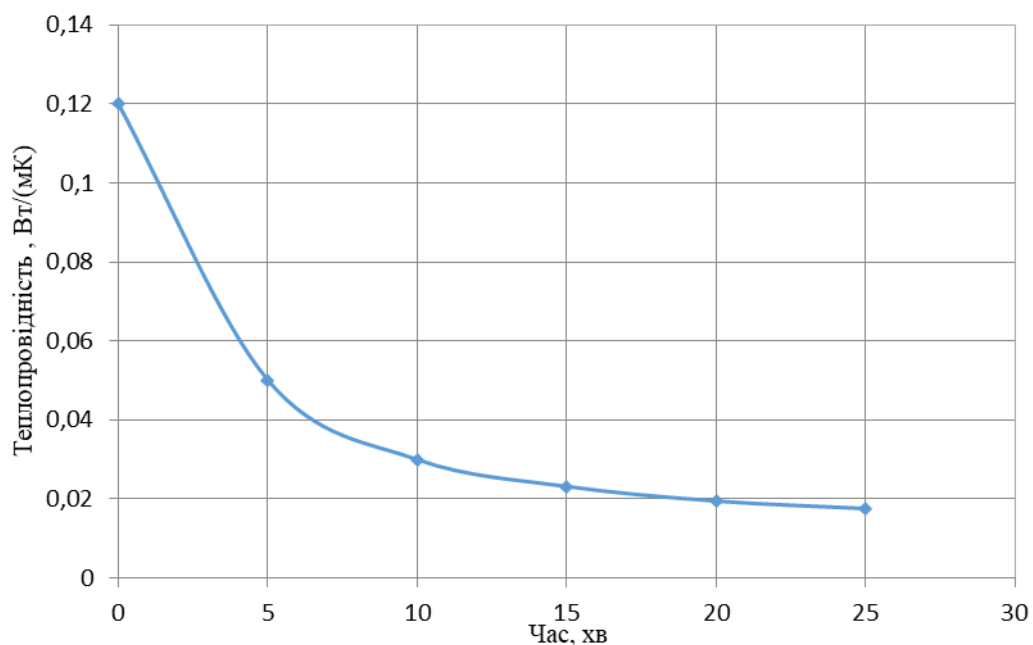


Рисунок 2.20 – Залежність коефіцієнту теплопровідності розробленого матеріалу від часу режиму термообробки

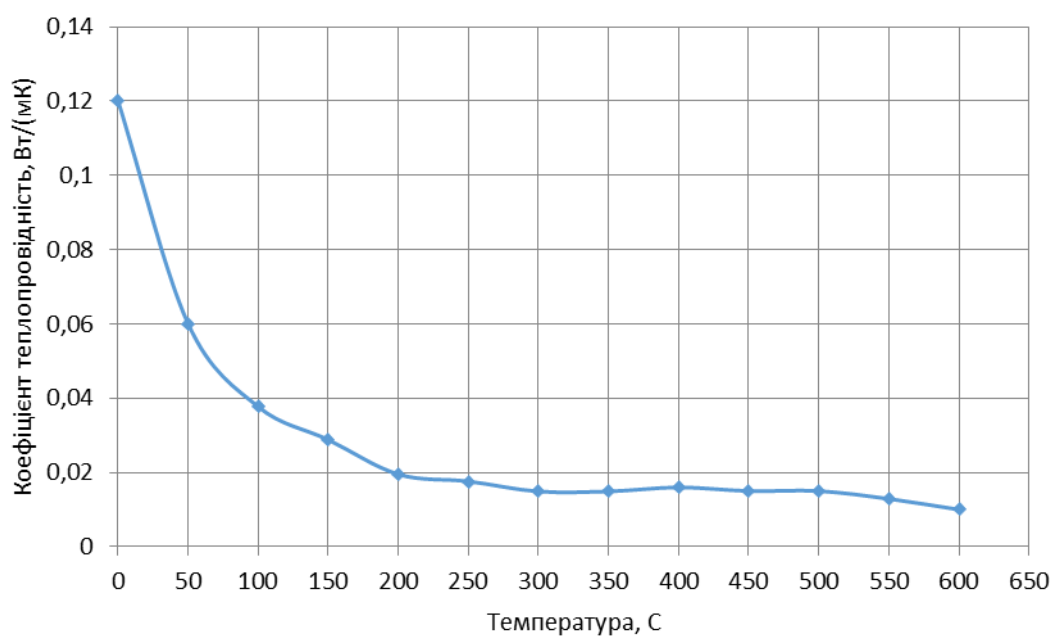


Рисунок 2.21 – Залежність коефіцієнту теплопровідності розробленого матеріалу від температури режиму термообробки

Складанням функції Лагранжа були визначені оптимальні характеристики міцності: значення модуля пружності одно 0,413, значення міцності матеріалу на стиск дорівнює 0,056 при $t = 174$ °С, $\tau = 13$ хв., $W = 45$ %, $\Pi = 70$ %. При даних характеристиках визначимо коефіцієнт теплопровідності матеріалу: $\lambda = 0,08$.

Також, в розділі 2.3, рішенням системи лінійних алгебраїчних рівнянь був знайдений мінімально можливий коефіцієнт теплопровідності матеріалу який становить 0,0435 Вт/(мК), при цьому міцність матеріалу на стиск дорівнює 0,051.

Виходячи з вище наведених залежностей, можна зробити наступні висновки: зі збільшенням тривалості та інтенсивності температурного впливу погіршуються характеристики міцності матеріалу, збільшується пористість, але в той же час зменшується теплопровідність. Отже, для отримання матеріалу з необхідними характеристиками міцності і необхідної теплопровідністю, аналогічними методами можна підібрати оптимальний технологічний режим обробки пористого теплоізоляційного матеріалу. У другому розділі розглянуті ж тільки крайові задачі - на оптимальну міцність і на оптимальну теплопровідність. Максимальна міцність необхідно, якщо дисперсний матеріал буде використовуватися як засипка для бетону. Мінімальна теплопровідність необхідна, якщо матеріал буде використовуватися як засипка для утеплення.

3 ВИБІР ЗАСОБІВ ІЗ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Технологічна частина проекту подає інформацію про те, що у проєктованому виробництві використовуються шкідливі й небезпечні виробничі фактори, до складу яких входять: пожежонебезпечні матеріали та речовини, електроенергія, механічна, теплова енергії, енергія стисненого газу.

Цеха, обладнані стрічковими конвеєрами живильниками, (пневматичними полюсами) та рейковим транспортом.

При проєктуванні виробництва прийняті проєктні рішення, які відповідають вимогам охорони праці та пожежної профілактики.

Проаналізувавши шкідливі і небезпечні виробничі фактори на даному виробництві, розроблено заходи щодо створення у виробничих приміщеннях оптимальних умов праці та пожежної профілактики.

3.1 Виявлення та аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів.
Заходи з охорони праці

3.1.1 Повітря робочої зони

Відповідно до ДСН 3.3.6.042 – 99, роботи у виробничому цеху відносяться до категорії середньої важкості Пб. Оптимальні значення параметрів мікроклімату, прийняті проєктом, наведені в таблиці 3.1.

На заводі з виробництва керамзитового піску передбачається виділення шкідливих речовин, тому представлено коротку санітарну характеристику виробничих приміщень проєктованого об'єкта, викладена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Оптимальні і допустимі значення параметрів мікроклімату заводу з виробництва керамзитового піску

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна волога, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	Середньої важкості Пб	17 – 19	40 – 60	0,2
Теплий		20 – 22	40 – 60	0,3

Для нормалізації повітря робочої зони проектом передбачена теплоізоляція обертової печі, пристрій штучної вентиляції. Природний обмін повітря приміщення здійснюється за допомогою віконних прорізів, кватирок. Передбачено повітряні душі пультів операторів обертової печі.

Для нормалізації мікроклімату застосовуємо змішану загально обмінну вентиляцію, для рівномірного повітрообміну. Місцева вентиляція служить для подачі свіжого повітря до робочого місця. Витяжна вентиляція - передбачена для видалення перегрітого та забрудненого повітря з місця його утворення. Для підвищення ефективності вентиляційних систем передбачена герметизація всього технологічного обладнання та укриття місць пиловидалення із пристроєм місцевих відсмоктувачів. Передбачено аварійну вентиляцію (тільки витяжна), призначена для швидкого видалення великих кількостей шкідливих та вибухонебезпечних речовин, а також забрудненого пилом повітря, що виникає при порушеннях технологічного процесу або аваріях технологічного обладнання.

У холодну пору року буде використатися система центрального парового опалення, що забезпечує необхідний температурний режим у цехах. Також у холодний період у дверних прорізах буде працювати повітряна завіса. Для контролю мікроклімату використовуються: термометри, психрометри.

Розрахунок аерації приміщення.

При розрахунку аерації визначаються площі нижніх та верхніх вентиляційних отворів. Розрахунок проводиться для найбільш несприятливих умов: літній час, швидкість вітру дорівнює нулю.

Температура повітря всередині приміщення в площині припливних отворів дорівнює температурі робочої зони, °C

$$t_{e1} = t_{p3} = 24.$$

Температура в площині витяжних отворів

$$t_{e1} = t_{p3} + \Delta t \cdot (H - 2),$$

де Δt = температурний градієнт $(0,8 \div 1,5)^\circ\text{C}/\text{м}$, приймаємо = $1,2^\circ\text{C}/\text{м}$;

H = висота розміщення витяжного отвору.

$$t_{e1} = 24 + 1,2 \cdot (2,9 - 2) = 25,1.$$

Вважаємо, що температура зовнішнього повітря по висоті від площини припливних отворів до площини витяжних отворів однакова

$$t_n = 22,3^\circ\text{C}.$$

Густина зовнішнього повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$

$$\rho_n = \frac{353}{273 + t_n} = 1,2.$$

Густина внутрішнього повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$:

– знизу приміщення

$$\rho_{\theta 1} = \frac{353}{273 + t_{\theta 1}} = 1,188;$$

– зверху приміщення

$$\rho_{\theta 2} = \frac{353}{273 + t_{\theta 2}} = 1,184.$$

Різниця тисків на рівні припливних та витяжних отворів ззовні та зсередини приміщення Па:

– припливний отвір

$$\Delta P_1 = g \cdot h_1 \cdot (\rho_n \cdot \rho_{\theta 1}) = 0,64;$$

– витяжний отвір

$$\Delta P_2 = g \cdot h_2 \cdot (\rho_n \cdot \rho_{\theta 2}) = 0,84,$$

де $h_1 = 1,1\text{м}; h_2 = 1,4\text{м}; g = 9,81\text{м/с}.$

Визначимо мінімальні значення площ припливного та витяжного отворів.

Вікна верхнього ярусу мають середньопідвісні ставні з кутом відкриття 60° , $\xi_{\text{вн}} = 3,2$ - коефіцієнт місцевого опору. Вікна нижнього ярусу мають верхньопідвісні ставні з кутом відкриття 45° , $\xi_{\text{нп}} = 3,7$.

Звідси знайдемо:

$$F_1 = \frac{G}{3600} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{нп}} \cdot \rho_{\theta 1}}{g \cdot h_1 \cdot (\rho_n - \rho_{\theta 1})}} \text{м}^2;$$

$$F_1 = \frac{1242}{3600} \cdot \sqrt{\frac{3,7 \cdot 1,188}{9,81 \cdot 1,1 \cdot (1,2 - 1,188)}} = 0,77 \text{ м}^2;$$

$$F_1 = \frac{G}{3600} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{вум}} \cdot \rho_{\text{в2}}}{g \cdot h_1 \cdot (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в2}})}} \text{ м}^2;$$

$$F_1 = \frac{1242}{3600} \cdot \sqrt{\frac{3,7 \cdot 1,184}{9,81 \cdot 1,4 \cdot (1,2 - 1,184)}} = 1,28 \text{ м}^2.$$

Площа припливних отворів складає: $F_1 = 0,78 \text{ м}^2$;

Площа витяжних отворів складає: $F_2 = 1,28 \text{ м}^2$.

3.1.2 Виробниче освітлення

Згідно ДБН В.2.5-28-06, на підприємстві виконуються роботи III розряду зорових умов.

У проекті передбачене комбіноване освітлення, причому природне освітлення комбіноване - бічне з верхнім. Проектом прийняті наступні системи освітлення: робоче, аварійне, ремонтне.

Нижче в таблиці 3.2 представлені санітарні норми освітлення, наведені значення параметрів освітлення, прийняті проектом.

Система штучного освітлення – комбінована, на виробництві прийняті люмінесцентні лампи низького тиску типу ЛД. У місцях установки обладнання з обертовими робочими органами освітлення здійснюється лампами накалювання, установленими у світильники прямого світла "Універсаль", "Глибокоизлучатель". Для аварійного й евакуаційного освітлення передбачене застосування ламп накалювання, поміщених у світильник "Альфа", а також переносних світильників "Універсаль" УП-200, напругою 12 В.

Таблиця 3.2 - Норми параметрів освітлення

Розряд зорових робіт	Характер зорових робіт	Освітленість При штучному освітленні, Е,ЛК	Значення КЕО, %			
			при природному освітленні		при сполученому освітленні	
			спеціальн е	верхнє	спеціальн е	верхнє
ІІІ	Загальне постійне спостереження за ходом виробничого процесу	300	0,2	1	0,2	0,7

При відключенні робочого освітлення передбачена система аварійного освітлення. Світильники аварійного освітлення приєднуються до мережі робочого освітлення з автоматичним перемиканням на незалежне харчування.

Стіни й стелі пофарбовані у світлі тони, внутрішні поверхні огорожень і небезпечні елементи механізмів - у червоний.

Контроль освітленості здійснюється люксометром Ю - 116 не менше 1 разу на рік, а також після ремонту приміщень.

3.1.3 Виробничий шум і вібрації

Основними джерелами шуму на заводі з виробництва керамзитового піску є вентилятори гострого дуття холодильника - 1 агрегат на одній технологічній лінії. Крім цього, джерелами шуму є циклон, газодувки, вентилятори загального дуття та охолодження електродвигунів, стрічкові

конвеєри для транспортування глиняної крихти та керамзитового піску, електроприводи обладнання. За ДСН 3.3.6.037 - 99 допустимий рівень звуку у виробничих приміщеннях - 80 дБА. Фактичний рівень становить 77 дБА.

Також в приміщенні існують джерела, що викликають вібрацію. До них відносяться габаритне устаткування і його вузли, які обертаються з великою швидкістю.

Для боротьби із шумом передбачаються наступні заходи: керування всіма агрегатами зі спеціальних звукоізолюючих кабін; внутрішні поверхні облицьовані матеріалами, які вбирають шум. Для зменшення вібрації використовується віброізоляція. В якості таких пристроїв використовуються амортизатори під обладнання, що вібрує. В пристроях повітреводів та у місцях їх проходження через будівельні конструкції передбачені гнучі вставки.

3.1.4 Електробезпека

Проектом передбачено здійснювати живлення електроустаткування від трифазної 4-х провідної електричної мережі змінного струму промислової частоти із глухозаземленою нейтраллю напругою 380/220 В.

Можливе ураження електричним струмом у результаті дотику з струмопровідними неструмоведучими частинами обладнання, що опинилися під напругою в результаті порушення ізоляції, а також ураження кроковою напругою та через електричну дугу.

Відповідно до ГОСТ 12.1.038 – 82, допустимі рівні напруги дотику (Уд) і струму, що проходить через тіло людини (Іл) дорівнює: при нормальному режимі роботи електроустаткування $U_d = 2$ В, а $I_l = 0,3$ мА; при аварійному - відповідно 36 В і 6 мА. Припустимі значення струму й напруги:

– у нормальному режимі роботи

$I_l = 0,3$ ма і $U_{np} = 2$ В, при часі дії до 10 хв/добу;

– в аварійному режимі роботи

$I_{л} = 6$ ма і $U_{пр} = 36$ В, при контакті більше 1 с.

Однофазний дотик зустрічається набагато частіше, ніж двофазний.

Такий дотик менш небезпечний, тому що до тіла людини прикладається лінійна напруга.

Струм, що проходить через людину в цьому випадку, складе мА

$$I_{л} = \frac{U_{\phi} \cdot 10^3}{R_{л} + R_0},$$

де,

$U_{\phi} = 220$ В – фазна напруга, В;

$R_{л} = 2000$ Ом – опір тіла людини, Ом;

$R_0 = 30$ Ом – опір нейтралі заземлення, Ом.

$$I_{л} = \frac{220 \cdot 10^3}{2000 + 30} = 109,8.$$

При цьому напруга дотику складе В

$$U_{дот} = I_{л} \cdot R_{л} = 0,1098 \cdot 2000 = 219,6.$$

Для електробезпечності на заводі розроблені наступні заходи:
занулення електроустаткування; захист електропроводки від механічних ушкоджень

прокладкою проводів у металевих трубах, схованої, у металорукавах;
установка електроустаткування відповідно до умов навколишнього середовища, закриті пилонепроникні електродвигуни та світильники; захисне відключення електроустаткування; електрозахистні засоби: діелектричні

рукавички, інструменти з ізолюючими рукоятками, покажчики напруги, діелектричні калоші, що ізолюють підставки, тимчасові огороження, захисні окуляри, подвійна ізоляція, застосування малих напруг.

3.1.5 Безпека технологічних процесів і обслуговування обладнання

Небезпечним обладнанням на підприємстві є обертова піч, що працює при температурі випалу сировинної суміші до спалення при 1000 °С. Загрозу для працюючих ставлять мазутопроводи, паропроводи. У ході технологічного процесу крім пилу, виділяється окис вуглецю, що негативно позначається на здоров'ї людей.

На технологічному обладнанні є робочі площадки, розташовані на висоті до 10 м, небезпечні тим, що не виключено можливість падіння людей з висоти. Тому вони огорожені перилами висотою до 1 м.

Для захисту людей від деталей, що обертаються і рухаються, устаткування змонтоване так, що вони вкриті в корпусі та немає необхідності обгороджувати корпус устаткування. В устаткуванні, де не передбачене приховання в корпус частин, що рухаються і обертаються, вони будуть розташовані на висоті не менш ніж 2 м від підлоги й захищатися захисними кожухами та сітками.

3.2 Пожежна безпека

На заводі з виробництва керамзитового піску горючими елементами є дерев'яні двері, віконні рами, покрівля, шафи і одяг у побутових приміщеннях, фарба на устаткуванні, а також при викиді мазути може виникнути пожежа.

Проектом [36] передбачені наступні заходи пожежної безпеки: у цехах є протипожежний водопровід, пожежні крани, діаметром 50мм і довжиною рукава 20 м згідно СНиП 2.09. 02-85; застосовуються пінні вогнегасники

ОХП-10; у приміщенні є ємності з піском і пожежні щити; змонтований сигналізація з датчиками РП-50 і СТХ-174; підтримка опору ізоляції струмоведучих частин; захист ізоляції від теплового, механічного та агресивного впливу; Для забезпечення максимальної безпеки кабелі будуть укладатися в спеціальні канали, проводку - у металеві рукава, у металеві труби, використовуються плавкі запобіжники.

Для захисту від прямого удару блискавки передбачений стрижньовий блискавковідвід. Підприємство буде підключатися до міської газової сітки через засувку, що відключає. Тиск газу, що надходить на завод, буде знижуватися до необхідної величини в газорегуляторному пункті. Газові пальники будуть випробовуватися на повноту спалювання газу, меж регулювання. Газові агрегати будуть мати автоматичне регулювання процесу горіння, автоматику безпеки. До обслуговування печей, теплообмінників і інших газифікованих агрегатів будуть допускатися обличчя, що здали технімум і посвідчення, що мають, на право роботи на цих агрегатах.

ВИСНОВКИ

В ході виконня диплоної роботи був проведений перерахунок енергетичного та ексергетичного балансу барабанної печі, з якого нев'язка баланса складає 1,06 %.

Описана принципова схема пороутворення у сировинній суміші гранули керамзиту та визначено, що для створення рівномірної пористості необхідно звести температурний градієнт до мінімуму, а також необхідно дотримуватися однорідної в'язкості в матеріалі.

Доведено наявність внутрішніх структурних зрушень під час пороутворення, що свідчить про неможливість впливати на формування пористої структури теплоізоляційного матеріалу завдяки сторонніх включень, які не вступають до хімічної реакції з сировинною сумішшю.

Визначено можливості формування пористої структури дифузійним та деструкційним генезисом пір. Генезис пористої структури матеріалу впливає на швидкість утворення пір та швидкість їх зростання у суміші матеріалів. На основі експериментального дослідження особливостей процесу формування пористої структури у глиноземистих теплоізоляційних матеріалів визначено функціональні залежності ефективного коефіцієнту теплопровідності пористих теплоізоляційних матеріалів від підведеної енергії.

Висунуто та підтверджено гіпотезу про поетапну зміну кількості пір та їх об'єму під час термообробки сировинної суміші теплоізоляційного матеріал

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Картушина Ю. Н. Определение оптимального соотношения исходных компонентов в сырьевой смеси для производства керамзита с использованием осадка после биологической очистки сточных вод / Ю. Н. Картушина, Д. С. Ананьев. // Инженерный вестник Дона. – 2014. – №4. – С. 17–24.
2. Чейлитко, А.О. Дослідження можливості зміни коефіцієнту теплопровідності металів шляхом зміни розмірів та розташування пор [Текст] / А.О. Чейлитко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2016. – № 2– С. 82 – 89
3. Картушина Ю. Н. Исследование прочностных характеристик керамзита, полученного с использованием отходов очистных сооружений и древесноугольного производства / Ю. Н. Картушина, И. Г. Шайхиев. // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – №5. – С. 261–263.
4. Мельничук М. Д. Розробка монолітного теплоізоляційного матеріалу на основі спученого перліту / М. Д. Мельничук, В. М. Скуба, Д. А. Гусачук. // Наукові нотатки Луцького національного технічного університету. – 2016. – №54. – С. 214–219.
5. Ратушняк Г. С. Вплив характеристик сучасних теплоізоляційних матеріалів на енергоефективність термостабілізації процесу виробництва біогазу / Г. С. Ратушняк, К. В. Колесник, В. О. Каташинський. // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2015. – №2. – С. 153–157.
6. Semko V. Experimental study of variability of thermal conductivity of insulation materials / V. Semko, M. Leshchenko, A. Rud. // Збірник наукових праць ПолНТУ. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2016. – №1. – С. 60–67.

7. Бурова З. А. Еталонування визначення теплопровідності теплоізоляційних будівельних матеріалів / З. А. Бурова, Л. В. Декуша, Л. Й. Воробйов. // Будівельні конструкції. – 2014. – №80. – С. 78–84.

8. Баданина Ю. В. Моделирование и экспериментальное определение технологических параметров жидкостного формования базальтовой теплоизоляции насосно-компрессорных труб / Ю. В. Баданина, М. А. Комков, В. А. Тарасов. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. НЭ Баумана. – 2015. – №4. – С. 46–55.

9. Н.А. Семененко. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. – К. :Вища школа, 1979. – 296 с

10. В.С. Самохвалов. Вторинні енергетичні ресурси та енергозбереження: Навч. посібник. – К.: Центр учбової літератури, 2008. – 224 с.

11. Л.И. Куперман, С.А. Романовский, Л.Н. Сидельковский. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. – К.: Вища школа, 1986. – 303 с

12. Ліпатніков Г.А., Гузеєв М.С. Автоматичне регулювання об'єктів теплоенергетики.-К.:Знання, 2009 – 148 с.

13. Шилкін Н.В. Техніко-економічна оцінка методів підвищення теплової ефективності будівель (стаття). 2010 р.

14. Ганжа В.Л. Основи ефективного використання енергоресурсів.-К.: Знання, 2007. – 32 с.

15. Болтон У. Кишеньковий довідник інженера-метролога. 2002. – 69 с.

16. Гуринович, А.Д. Регулює режими роботи систем теплопостачання будівель / А.Д. Гуринович / Енергоефективність. - К.:Знання, 2005. – 93 с.

17. Андріжієвський, А.А. Енергозбереження та енергетичний менеджмент: підручник / А.А. Андріжієвській, В.І. Володін. - К.:Знання, 2003. - 113 с.

18. Навоша, А.І. Оцінка способів передачі електроенергії. - К.:Знання, 2007. - 18 с
19. Голіцин, М.В Альтернатива керамзиту: навчальний посібник / М.В.Голіцин, Л. М. Прокоф'єва. - К.:Знання, 2013.- 48 с.
- 20.Спосіб одержання пористого гранульованого матеріалу на основі кремнезему : пат. 76027 Україна / А.О. Чейлітко, А.М. Павленко. – від 25.12.2012.
21. Pavlenko A.M., Koshlak H.V. (2015). Design of processes of thermal bloating of silicates, No 1, p.p. 118-122.
22. Bajare, D. Lightweight concrete with aggregates made by using industrial waste / D. Bajare, J. Kazjonovs, A. Korjakins // Journal of sustainable architecture and civil engineering. – 2013. – No. 4(5). – P. 67-73
23. Bodnárová L., Hela R., Hubertová M., Nováková I. Behaviour of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete Exposed to High Temperatures: International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, Vol:8, – 2014. – No:12, – p.1205–1208.
24. Демидович, Б.К. Производство и применение пеностекла [Текст] / Б.К. Демидович. - Минск: Наука и техника, 1972. – 304 с
25. Pavlenko, A. The rate of formation pores in the material which swells / A.Pavlenko, A. Cheylyitko // Energy, Energy saving and ration Nature Use. Kazimierz Pułaski University of Technology and Humanities in Radom, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. – 2014. – p. 31 – 37
26. Павленко, А.М. Моделирование процесса производства материала с прогнозируемой теплопроводностью [Текст] / А.М. Павленко, А.В. Кошлак, В.Е. Черниченко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського – Вип. 2/2008 (49), част. 2. - С. 25-28.
27. Степанов, А.В. Теплофизические свойства дисперсных материалов / А.В. Степанов, А.М. Тимофеев. Якутск, ЯНЦ СО РАН, 1994, 124 с.
28. Соколовський, Я. Математичне моделювання просторового

тепломасоперенесення в анізотропних капілярно-пористих матеріалах / Я. Соколовський, О. Герасимчук // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології : збірник наукових праць. – 2016. – № 843. – С. 316–324.

29. Соколовская, И.Е. Разработка технологического оборудования и развитие теоретических основ производства высокоэффективных теплоизоляционных материалов: дис. ... кандидата техн. наук : 05.14.06 / Соколовская Ирина Евгеньевна. – Д., 2008.

30. Курницький Т. Л., Гачкевич О. Р. Температурне поле шару з волокнистого композитного матеріалу за умов дії зовнішнього теплового випромінювання // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2016. – Т. 51. – №. 1. – С. 185-193.

31. Бердишев М.Ю. Прикладні питання тепломасообміну [Текст] : навч.-метод. посібник для студ. ЗДІА спец. 7.090510 і 8.090510 "ТЕ" всіх форм навчання : навч. посібник / М. Ю. Бердишев, І. Г. Яковлева ; ЗДІА. - Запоріжжя: ЗДІА, 2012. - 134 с.

32. Чудновский, А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов [Текст] / А.Ф. Чудновский. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 456 с.

33. Павленко, А.М. Моделирование процесса производства материала с прогнозируемой теплопроводностью [Текст] / А.М. Павленко, А.В. Кошлак, В.Е. Черниченко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського – Вип. 2/2008 (49), част. 2. - С. 25-28.

34. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов [Текст] / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. - Ленинград : Энергия, 1974. - 264 с.

35. Чейлытко, А.А. Моделирование процесса сушки влажного дисперсного материала с переменной плотностью в вихревом потоке / А.А. Чейлытко, А.М. Павленко // Восточно–европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №37. – С. 19 – 22/.

36. Законодавство про охорону праці [Електронний ресурс] :– Режим доступу.: <https://refdb.ru/look/1076513-pall.html>.