

**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
і.м. Ю.М.ПОТЕБНІ**

**КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ**

**Кваліфікаційна робота**

**другий магістерський**

(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення теплофізичних характеристик футеровки МНЛЗ  
№5 ВАТ "МК "Азовсталь"

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1440-з  
спеціальності теплоенергетика

(код і назва спеціальності)

освітньої програми теплоенергетика

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації

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

Голобоков Євгеній Михайлович

(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф. Чейлитко А.О.

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

Рецензент проф. д.т.н. Банах В.А.

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

Запоріжжя  
2021

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

Кафедра Теплоенергетики та гідроенергетики  
 Рівень вищої освіти другий магістерський  
 Спеціальність 144 Теплоенергетика  
 Освітня програма Теплоенергетика  
(код та назва)  
 Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
 « 01 » грудень 2021 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Голобоков Євгеній Михайлович  
(прізвище, ім'я, по батькові)


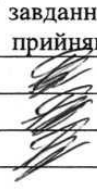




Тема роботи (проекту) Підвищення теплофізичних характеристик футеровки МНЛЗ №5 ВАТ "МК "Азовсталь"  
 керівник роботи Чейлитко Андрій Олександрович, д.т.н., проф.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «30» червня 2021 року № 975-с

- 1 Строк подання студентом роботи: 05 грудня 2021 р.
- 2 Вихідні дані до роботи: виробництво вогнетривів для складання матеріального та енергетичного балансу, тип сталерозливного ковша, теплофізичні характеристики алюмосилікатних вогнетривів;
- 3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): теплофізичні характеристики вогнетривів; матеріальній та енергетичний баланс виробництва, дослідження методів вимірювання ефективного коефіцієнту теплопровідності, знаходження оптимальних теплофізичних характеристик цегли.
- 4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): діаграма Сенкі виробництва шамотної цегли; визагальні витрати

виробництва шамотної цегли, %; втрати виробництва шамотної цегли, %; діаграма Сенкі енергетичного балансу; графіки залежності вогнетривкості та теплопровідності від температури обробки та хімічного складу; контурні графіки бажаності для парних незалежних змінних.

#### 5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Чейлитко А.О.		
2	Чейлитко А.О.		
3	Чейлитко А.О.		


6 Дата видачі завдання 05 травня 2021 р

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Характеристика вогнетривів	25.06.2021	виконано
2	Розрахунок матеріального балансу виробництва вогнетриву	01.08.2021	виконано
3	Розрахунок енергетичного балансу виробництва вогнетриву	01.10.2021	виконано
4	Дослідження методів вимірювання коефіцієнту теплопровідності	05.11.2021	виконано
5	Знаходження оптимальних теплофізичних характеристик цегли за допомогою програми STATISTICA 10	01.12.2021	виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи згідно нормативним вимогам	05.12.2021	виконано

Студент  (підпис)

Є.М.Голобоков  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту)  (підпис)

А.О. Чейлитко  
(ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер  (підпис)

С.Є. Чижов  
(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Є. М. Голобоков. Підвищення теплофізичних характеристик футеровки МНЛЗ №5 ВАТ "МК "Азовсталь"

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник докт. техн. наук, професор Чейлитко А.О. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім.Ю.М.Потебні, кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2021.

У кваліфікаційній роботі магістра розглядалися характеристики вогнетривів, їх класифікація, методи та особливості їх виготовлення. Описано метод розливки сталі на ВАТ "МК "Азовсталь" та витрати та втрати виробництва шамотної цегли для МНЛЗ №5. Було розраховано енергетичний баланс виробництва шамоту. Прибуток теплоти складає теплота горіння палива, фізична теплота, що вноситься паливом та теплота екзотермічної реакції. Теплота витрачається на сушіння, прожарювання, при охолодженні матеріалу, теплота, що відводиться газами, втрати у навколишнє середовище. Також розраховуються невизнані витрати, які теж складають значну частину витрат. Проведено лабораторні дослідження теплофізичних характеристик вогнетриву, в арматурному шарі футеровці сталерозливного ковша для МНЛЗ та проаналізовано результати емпіричних досліджень сучасним програмним середовищем. Розглянуто заходи з охорони праці. Зроблено висновки.

Ключові слова: ТЕПЛООБМІН, ВОГНЕТРИВ, ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, ТЕПЛОВТРАТИ, ШАМОТ, РОЗЛИВ СТАЛІ.

## ABSTRACT

E.M.Golobokov. Improving the Thermophysical Characteristics of Caster №5 MK Azovstal OJSC Lining.

Qualifying final work for obtaining a master's degree in the specialty 144 - Thermal Power Engineering, supervisor Dr. tech. Sciences, Professor Cheilytko A.O. Zaporizhzhya National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Y.M. Potebny, Department of Thermal Power Engineering and Hydro Power Engineering, 2021.

The qualification work of the master considered the characteristics of refractories, their classification, methods and features of their manufacture. The method of casting steel at OJSC MK Azovstal and the costs and losses of fireclay brick production for caster №5 were described. The energy balance of fireclay production was calculated. for drying, calcination, cooling of the material, heat removed by gases, losses to the environment. Unrecognized costs are also calculated, which also make up a significant part of the costs. Laboratory researches of thermophysical characteristics of refractories, in a reinforcing layer lining of a steel ladle for casters are carried out and results of empirical researches by the modern software environment are analyzed. Labor protection measures are considered. Conclusions are made.

Keywords: HEAT EXCHANGE, FIRE-RESISTANCE, THERMAL CONDUCTIVITY, HEAT LOSS, FIREWORKS, STEEL BOTTLING.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	13
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВОГНЕТРИВІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЄТЬСЯ В ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ .....	15
1.1 Теплофізичні характеристики вогнетривів, що застосовуються у енергетичній промисловості .....	15
1.2 Аналіз впливу пористої структури вогнетриву на його коефіцієнт теплопровідності .....	24
1.3 Вогнетриви для сталерозливного ковша МБЛЗ №3-5 .....	28
1.4 Матеріальний баланс виробництва вогнетривкої цегли .....	32
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОГНЕТРИВКОЇ ЦЕГЛИ З МЕТОЮ ЗНАХОДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ .....	53
2.1 Поширені методи дослідження ефективного коефіцієнту теплопровідності .....	53
2.2 Побудова залежності теплопровідності від температури термообробки та хімічного складу .....	61
2.3 Знаходження оптимальних теплофізичних характеристик цегли .....	64
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА .....	76
3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	76
3.2 Заходи з поліпшення умов праці .....	77
3.3 Виробнича санітарія .....	77
3.4 Електробезпека.....	78
3.5 Пожежна безпека.....	80
3.6 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).....	81
3.7 Розрахунок передачі тепла крізь футеровку сталерозливного ковша ....	83
ВИСНОВКИ.....	86
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	88

## ВСТУП

*Актуальність роботи.* Одним із пунктів енергетичної стратегії України на період до 2030 року є зниження питомої вартості продукції за рахунок введення в експлуатацію сучасних теплоізоляційних матеріалів, до яких відноситься і вогнетриви.

Вогнетривкі матеріали дуже поширені в сучасній промисловості. Вони використовуються в металургії, будівництві, атомній промисловості, теплоенергетиці та інше. Вогнетривкі матеріали застосовуються в тих місцях, де використовуються високі температури.

Виготовляються вогнетриви з мінеральної сировини (наприклад глини, піску) і випускаються в різних видах (цеглини, плити).

Сучасна промисловість намагається отримати більш якісний вогнетривкий матеріал, який буде витримувати великі теплові навантаження, мати гарну міцність. Для того, щоб знайти способи поліпшення якостей вогнетривів різні автори підходять до питання з різних сторін. Багато як сучасних, так і класиків займаються проблемою покращення фізичних властивостей вогнетривів. Так, у книзі Кащеєва «Властивості і застосування вогнетривів» розглядає основні властивості вогнетривів, їх застосування в промисловості на основі сучасних досліджень і даних [1]. Автори Каркліт і Тихонова в книзі «Вогнетриви з високогленоземістого сировини» розглянули властивості цього матеріалу, а так же процес виробництва вогнетривів, застосування в промисловості і основні способи, за допомогою яких можна поліпшити якість вогнетривів [2]. Вогнетриви характеризуються таким показником як пористість. Праця Лейбензона «Рух природних рідин і газів в пористому середовищі» можна застосувати для розробки нових пористих вогнетривів [3].

Отже, дослідження ефективного коефіцієнту теплопровідності вогнетривкої цегли з метою знаходження її оптимальних теплофізичних характеристик є актуальною задачею.

*Об'єкт дослідження* – вогнетривка цегла, що використовується в сталерозливних ковшах.

*Предмет дослідження* – вплив хімічного складу вогнетриву на його коефіцієнт теплопровідності.

*Мета роботи* – знайдення оптимальних теплофізичних характеристик вогнетриву.

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

- аналіз літературних джерел за тематикою дослідження;
- дослідження хімічного складу та фізичних властивостей вогнетриву на його коефіцієнт теплопровідності;
- знаходження оптимальних характеристик вогнетриву.

*Методи та засоби дослідження.* Поставлені задачі вирішувались шляхом складання математичної моделі за допомогою програми STATISTIKA 10.

*Наукова новизна отриманих результатів.* Отримані оптимальні характеристики вогнетривкої цегли.

*Практична цінність роботи.* Знайдені характеристики вогнетриву, які у подальшому можна застосувати у виробництві.

*Апробація роботи.* Результати роботи представлені на загальноуніверситетській конференції студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2021» та I Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України» 19-21 жовтня 2021 р.

*Структура та обсяг роботи.* Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилань з 41 позиції. Загальний обсяг складає 85 сторінок, у тому числі 24 ілюстрації та 18 таблиць.



## **1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВОГНЕТРИВІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЄТЬСЯ В ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ**

Вогнетривами називаються матеріали, що використовуються для спорудження та футеровки печей, топок та апаратів, що працюють за умов високотемпературного нагріву (вище 1000 °С). Комплекс вимог до вогнетривів відрізняється від вимог до звичайних будівельних матеріалів і характеризує їх здатність до використання в якості конструкційних матеріалів, що працюють в за умов високих температур (1000...1800 °С та вище) та не розплавляються [1].

Вогнетриви поділяються в залежності від ступеня вогнетривкості на три класи:

- вогнетривкі – вогнетривкістю від 1580 °С до 1770 °С включно;
- високовогнетривкі - від 1770 °С до 2000 °С включно;
- високої вогнетривкості – вище 2000 °С.

Крім вогнетривкості, будівельної міцності при високих температурах і термостійкості (здатності витримувати без руйнування різкі коливання температури), вимогою до них є хімічна стійкість (шлакостійкість).

### **1.1 Теплофізичні характеристики вогнетривів, що застосовуються у енергетичній промисловості**

Вогнетриви – це матеріали, які виготовляються із мінеральної сировини та витримують високі температури. Вогнетриви розрізняються на штучні вироби (цегла) і на не формовані (сипучі). Штучні вироби (цегла) випускаються різних типів: звичайний у вигляді правильного паралелепіпеда (250x120x65 мм), клиновидний і фасонний [4]. До не формованих (сипучих) матеріалами відносять засипку і маси, які застосовують для виготовлення вогнетривких бетонів.

До основних теплотехнічних властивостей вогнетривів відносять вогнетривкість, механічну міцність, термічну та хімічну стійкість, деформацію під навантаженням при високій температурі, сталість форми і об'єму, пористість, газопроникність, теплопровідність [5].

Вогнетривкістю називається здатність матеріалів витримувати високі температури, не деформуючись під дією власної ваги. За вогнетривкістю розрізняють: вогнетривкі (від 1580 °С до 1770 °С), високовогнетривкі (від 1770 °С до 2000 °С) та вищої вогнетривкості (понад 2000 °С) [5].

Температура деформації під навантаженням – це температура, яка є значно нижчою, ніж та, при якій проводились випробування. При цій температурі вогнетривкі матеріали руйнуються під навантаженням [5].

Теплостійкість вогнетриву – стійкість до теплових змін (нагріву та різкому охолодженню). Визначаються теплоємністю, теплопровідністю та коефіцієнтом об'ємного розширення. Показник теплостійкості – кількість водяних теплових змін (нагрів до 1573 °С з різким охолодженням у воді). [6]

Стабільність параметрів – це властивість матеріалу не змінювати параметри в процесі експлуатації. В процесі експлуатації вогнетриви піддається циклам нагрівання-охолодження, що обумовлює розширення або стиснення матеріалу. Це призводить до зменшення механічної міцності і може викликати руйнування вогнетривкої конструкції.

Ще одна властивість вогнетривких матеріалів - це розтріскування. Розтріскування зазвичай являє собою руйнування, утворення сітки тріщин або відшаровування, викликане станом маси матеріалу. Розтріскування переважно спостерігається при наявності градієнта температури за рахунок зміни обсягу і коефіцієнта термічного розширення маси цегли. Допускати розтріскування вкрай небажано, оскільки погіршуються характеристики вогнетривів.

Теплопровідністю називається здатність матеріалів передавати тепло від більш нагрітих частин до більш холодних без помітного руху частинок. Теплопровідність вимірюється коефіцієнтом теплопровідності, який

дорівнює кількості теплоти, що проходить через однорідний зразок матеріалу одиничної довжини і одиничної площі за одиницю часу при одиничній різниці температур  $Вт / (м \cdot К)$  [5].

Механічною міцністю вогнетривких виробів називається межа міцності, який витримує матеріал при стисканні. Визначається при 293 К в нейтральному газовому середовищі.

Хімічна стійкість – це здатність вогнетриву чинити опір руйнуванню, яке виникає в результаті хімічної реакції між вогнетривом і рідиною (шлаками, газами, топкими металами).

Термічна стійкість – властивість матеріалу зберігати механічні характеристики і структуру. Залежить від коефіцієнта теплопровідності та термічного розширення. Термічною стійкістю оцінюють кількість тепло змін.

Газопроникності вогнетриву залежить від його природи, величини відкритої пористості, однорідності структури виробу, температури і тиску газу. З підвищенням температури газопроникність вогнетривів знижується, так як обсяг газу при цьому зростає і збільшується його в'язкість. Вогнетриви повинні мати низьку газопроникність [5].

В вогнетривах розрізняють уявну пористість (відношення відкритих пор до загального об'єму вогнетриву) та істинна (відношення об'єму відкритих та закритих пор до об'єму вогнетриву). Виражається у відсотках. Також розрізняють відкриту ( $P_{від}$ ) та закриту пористість ( $P_{заг}$ ). Відкриті пори з'єднані між собою і з атмосферою, а закриті представляють собою замкнуті простору всередині виробу. Пористість визначається технологією виготовлення вогнетриву. Нульову пористість мають плавлені вогнетриви. Залежно від пористості вогнетривкі вироби підрозділяються на два класи: щільні вогнетриви ( $P_{від} < 30\%$ ); теплоізоляційні вогнетриви ( $P_{від} > 30\%$ ). Мікропори – пори розміром (0,2...3,0) мкм, які виникають у просторі між великими порами, впливають на підвищення міцності та на зниження теплопровідності [7].

Теплоємність вогнетривів визначає швидкість нагріву і охолодження матеріалу і витрати тепла на нагрівання. Залежить від хімічного складу вогнетривів. Незначно зростає зі збільшенням температури [5].

Також вогнетриви розрізняють за хіміко-мінералогічним складом, який приведено у таблиці 1.1 [8].

Таблиця 1.1 – Класифікація вогнетривів за хіміко-мінералогічним складом

Клас	Група	Хімічний склад
1	2	3
Кремнеземисті	З кварцового скла	$\text{SiO}_2 \geq 97 \%$ ; інше $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{CaO}$
	Динасові	$\text{SiO}_2 \geq 93 \%$ ; інше $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{CaO}$
	Динасові з добавками	$80 \leq \text{SiO}_2 < 93 \%$ ; інше $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{CaO}$
	Кварцові	$\alpha$ -кварц $\approx 100 \%$
Алюмосилікатні (Корундові)	Напівкислі	$\text{Al}_2\text{O}_3 < 28 \%$ ; інше $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$
	Шамотні	$28 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 45 \%$ ; інше $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$
	Мулліто-кремнеземисті	$45 < \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 62 \%$ ; інше $\text{SiO}_2$
	Муллітові	$62 < \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 72 \%$ ; інше $\text{SiO}_2$
	Муллітокорундові	$72 < \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 90 \%$ ; інше $\text{SiO}_2$
	Корундові	$\text{Al}_2\text{O}_3 > 90 \%$ ; інше $\text{SiO}_2$
Магнезійальні (періклазові)	Періклазові	$\text{MgO} \geq 80 \%$ ; $(\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 10 \%$
	Періклазові на різних зв'язках	$\text{MgO} \geq 85 \%$ ; $(\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) < 15 \%$
Магнезійально-вапняні та вапняні	Періклазовапняні	$50 < \text{MgO} < 85 \%$ ; $10 \leq \text{CaO} < 45 \%$
	Періклазовапняні стабілізовані	$35 < \text{MgO} < 75 \%$ ; $10 < \text{CaO} \leq 40 \%$ ; $(\text{CaO}/\text{SiO}_2) > 2$
	Вапняно-періклазові	$10 < \text{MgO} < 50 \%$ ; $45 \leq \text{CaO} \leq 85 \%$
Магнезійально-шпинелідні	Періклазо-хромітові	$\text{MgO} \geq 60 \%$ ; $5 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 20 \%$ ; інше $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$
	Хроміто-періклазові	$40 \leq \text{MgO} < 60 \%$ ; $15 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 35 \%$ ; інше $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$
	Хромітові	$\text{MgO} > 40 \%$ ; $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 30 \%$ ; інше $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$
	Періклазо-шпинелідні	$50 \leq \text{MgO} < 85 \%$ ; $5 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 20 \%$ ; $\text{Al}_2\text{O}_3 > 25 \%$ ; інше $\text{SiO}_2 + \text{CaO}$

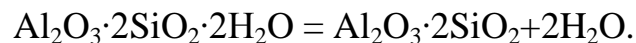
	Периклазо-шпинельні	$MgO > 40 \%$ ; $5 \leq Al_2O_3 \leq 55 \%$ ; інше $SiO_2 + CaO$
	Шпинельні	$25 \leq MgO \leq 40 \%$ ; $55 < Al_2O_3 \leq 70 \%$ ; інше $SiO_2 + CaO$
Магнезіально-силікатні	Периклазо-форстеритові	$65 \leq MgO < 85 \%$ ; $SiO_2 \geq 7 \%$ ; інше $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO$
	Форстеритові	$50 \leq MgO \leq 65 \%$ ; $25 < SiO_2 \leq 40 \%$ ; інше $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO$
	Форстерито-хромитові	$45 \leq MgO \leq 60 \%$ ; $20 \leq SiO_2 \leq 30 \%$ ; $5 \leq Cr_2O_3 \leq 15 \%$ ; інше $Al_2O_3 + Fe_2O_3$
Вуглецеві	Вуглецеві	$C = 88 \dots 90 \%$
	Графітошамотні	$C = 20 \dots 60 \%$
Карбідо-кремнієві	Карбідокремнієві	$SiC > 70 \%$ ; інше $SiO_2 + Al_2O_3$
	Карбідокремно-вмістні	$15 \leq SiC \leq 70 \%$ ; $20 < SiO_2 < 55 \%$ ; $15 < Al_2O_3 < 30 \%$
Цірконісті	Бадделеїтові	$ZrO_2 > 90 \%$ ; інше $Al_2O_3 + SiO_2$
	Бадделеїта-корундові	$20 \leq ZrO_2 \leq 90 \%$ ; $Al_2O_3 < 65 \%$ ; інше $SiO_2$
	Цірконісті	$ZrO_2 > 50 \%$ ; $SiO_2 > 25 \%$ ; інше $Al_2O_3$
Оксидні	З оксида Be	$BeO \approx 100 \%$
	З оксида Mg	$MgO \approx 100 \%$
	З оксида Ca	$CaO \approx 100 \%$
	З оксида Al	$Al_2O_3 \approx 100 \%$
	З оксида Zr	$ZrO_2 \approx 100 \%$
	З оксида Ti	$TiO_2 \approx 100 \%$

Виділяють чотири види вогнетривкої цегли: кварцовий вогнетривка цегла, шамотний (глиноземний) вогнетривка цегла, основний і вуглецевий вогнетривка цегла.

Кварцовий вогнетривка цегла використовується в разі, якщо стінки печі стикаються лише з полум'ям або металами. Така цегла погано контактує з лугами, вапном, оксидами заліза. В основному з нього будують склепіння відбивних печей. У порівнянні зі звичайною цеглою, кварцовий вогнетривка цегла є однорідним, не містить пустот. Кварцову цеглу роблять з чистого піску або кварцу, які цементують невеликою кількістю глини, після закінчення процесу випалу, кварцовий цегла набуває характеристики, близькі до природних [9].

Шамот – це вогнетривка глина, обпалена до втрати пластичності. Шамотні вироби містять глину та шамот. Головним чином шамотні вироби складаються з оксидів ( $\text{SiO}_2$  (50...80) % та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10...45) %). Вироби класифікуються за змістом  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

При обпаленні у глині змінюється мінералогічний состав: при нагріванні до  $400\text{ }^\circ\text{C}$  поступово видаляється слабозв'язна вода з кристалевої решітки; в інтервалі ( $400\text{...}600$ )  $^\circ\text{C}$  видаляється хімічно зв'язана вода за реакцією



Реакція йде з поглинанням тепла. Хімічний зв'язок  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  називається метакарлінітом. При ( $400\text{...}1000$ )  $^\circ\text{C}$  карбонати дисоціюють з виділенням вуглекислоти, сульфідати окислюються з утворенням сірчистого газу, органічні домішки вигорають. При цьому маса значна частина маси втрачається, зменшується обсяг і збільшується пористість.

При температурі  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  з виділенням тепла мета каолініт перебудовується з утворенням в кінцевій стадії муллїта  $3[\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2]$



З ростом температури кількість мулїту безперервно збільшується та досягає максимуму при ( $1250\text{...}1450$ )  $^\circ\text{C}$ . Тривала витримка при температурі вище  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  не впливає на збільшення мулїту, проте сприяє збільшенню кристалів. Теоретично весь глинозем повинен перейти в мулїт [10].

У залежності від наявності у вмісту шамоту розрізняють безшамотні, малошамотні (кількість шамоту не перевищують 30 %), шамотні (кількість шамоту від 40 % до 65 %), багатошамотні (кількість шамоту більш 70 %) вироби [6, 11]. Шамотна цегла набагато краще, ніж кварцова, чинить опір впливу лугів, краще реагує на різкі перепади температури. Вогнетривкість шамоту знаходиться у межах ( $1580\text{...}1770$ )  $^\circ\text{C}$ , має більш високу

термостійкість: (10...20) теплостійкість, але низьку шлакостійкість [12]. Цей тип цегли найбільш розповсюджений. Шамотні вироби застосовуються у доменних печах, повітронагрівачах доменних печей, при сталевому литті, виробництві кольорової металургії, у коксових і газових печах, у скляній і цементній промисловості.

Основні цеглини – це вапняно-магнезіальні вогнестійкі маси, які використовуються в металургійному виробництві при виробленні сталі з фосфористих руд. Вуглецевий цегла використовується лише в деяких галузях промисловості. Вона є пресованим графітом або коксом, застосовується в доменних печах.

Вибір типу вогнетривкої цегли обумовлюється не тільки його температурної стійкістю, але і хімічними особливостями речовини розжарювання, а також властивостями палива або золи.

Для уникнення ефекту розтріскування в процесі випалу вогнетривкої цеглини мають в складі до 70 % шамоту (обпаленої вогнетривкої глини), рідше в суміш для виробництва вогнетривкої цегли додають коксовий або графітовий порошки, великі зерна кварцу. У підсумку можна отримати різні сорти вогнетривкої цегли, призначені для різних областей застосування. Вибір певного сорту вогнетривкої цегли визначається температурою, в якій передбачається його експлуатація, хімічними характеристиками розжарюваного речовини, а також властивостями золи або палива.

Не формовані вогнетриви застосовують для виготовлення монолітних футеровок з вогнетривкого бетону і набивних мас. Вогнетривкий бетон є сумішшю вогнетривкого наповнювача (бій вогнетривких виробів) з частинами розміром від 0,5 мм до 70 мм, в'язучого та добавок. В якості в'язучого використовують твердіючі в холодному стані вогнетривкий цемент (глиноземний, магнезійний), іноді скло. Застосовують монолітну футеровку стін і зводів нагрівальних печей з рідкого (литого) бетону з кріпленням її до металевих каркасів печі за допомогою анкерних цегли, розподілених по площі стін і склепіння [13].

Вогнетривкі матеріали в Україні виготовляються на 18 підприємствах: Ватуїнський, Великоанадольський і Часівоярський вогнетривкий комбінат, ПАТ «Запоріжвогнетрив», «Білокаменські вогнетриви», Овруцький гірничо-збагачувальний комбінат, Дружківське і Кіровоградське рудоуправління, Кондратівський, Пантелеймонівський, Костянтинівський, Красногоровський, Микитівський, Красноармійський динасовий заводи, АТ «Огнеупорметаллсервіс» і компанія «Керамос Мінерал», Христофорівський завод вогнетривких блоків і бетонів, Михайлівське виробництво вогнетривів [14]. Теплофізичні показники вогнетривких виробів і кераміки приведені в таблиці 1.2 [15].



Таблиця 1.2 – Теплофізичні показники вогнетривких виробів і кераміки

Матеріал	Щільність, т/м <sup>3</sup>		Питома теплоємність с, кДж/(кг·°С)	Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/(м·°С)	Питомий електроопір ρ, Ом·см при t, °С		
	з порами	без пор			800	1200	1600
Гранітні вироби	1,6	2,2	0,837	162,8-40,7·10 <sup>-3</sup> tcp	–	–	–
Динасова цегла	1,9...1,93	2,38...2,5	0,837+0,25·10 <sup>-3</sup> tcp	0,93-0,69·10 <sup>-3</sup> tcp	200	9,14	1,5
Карборундові вироби	2,3...2,6	3,1...3,2	0,96+0,147·10 <sup>-3</sup> tcp	20,9-10,5·10 <sup>-3</sup> tcp	800	40	0...0,8
Корундові вироби	2,6...2,9	3,7...3,9	0,79+0,49·10 <sup>-3</sup> tcp	2,1-1,9·10 <sup>-3</sup> tcp	1000	100	5,2-4
Рекристаллізований корунд	3,75...3,85	3,8...3,9	–	29,1* <sup>2</sup> , 5,8* <sup>2</sup>	–	–	–
Магнезитова цегла	2,6...2,8	3,0...3,2	1,05+0,29·10 <sup>-3</sup> tcp	4,7-1,7·10 <sup>-3</sup> tcp	1000	100...200	–
Вироби з плавленого муллиту	2,1...2,4	3,0...3,3	1,05+0,25·10 <sup>-3</sup> tcp	–	–	–	–
Плавлений магнезитова цегла	2,7...2,8	3,5...3,6	–	–	4000	100...200	1,0...2,0
Окис берилію	–	3,0	0,13+0,52·10 <sup>-3</sup> tcp	1,9 – 3,7* <sup>3</sup>	–	10 <sup>9</sup>	–
Окись торія	–	10	0,25* <sup>1</sup>	Дуже низький	–	10 <sup>7</sup>	–
Напівкислі вогнетриви цегли	1,85...1,95	2,5...2,6	0,88+0,23·10 <sup>-3</sup> tcp	0,87+0,52·10 <sup>-3</sup> tcp	–	4-6	–
Будівельна цегла	1,4...1,6	2,5...2,6	0,92	0,81+0,47·10 <sup>-3</sup> tcp	–	–	–
Сіліманітові і муллітові вироби	2,2...2,4	2,8...3,0	0,84+0,25·10 <sup>-3</sup> tcp	1,69+0,23·10 <sup>-3</sup> tcp	180	11,5	3,5
Вугільні вироби	1,35...1,5	1,8...2,1	0,837	23,3±34,9·10 <sup>-3</sup> tcp* <sup>4</sup>	–	–	–
Хроміровий цегла	3,0...3,2	3,8...4,2	0,84+0,29·10 <sup>-3</sup> tcp	1,28+0,41·10 <sup>-3</sup> tcp	3,0	0,5...0,1	0,05...0,01
Хромомагнезитова цегла	2,8...2,9	3,7...3,8	–	1,9 – 2,1* <sup>5</sup>	–	–	–
Термостійкий хромомагнезитова цегла	2,75...2,85	3,6...3,8	–	1,4+1,11·10 <sup>-3</sup> tcp	–	–	–
Цирконієві вироби	3,3	4,5...5,0	0,54+0,13·10 <sup>-3</sup> tcp	1,3+0,64·10 <sup>-3</sup> tcp	1000...10000	10	–
Цирконові вироби	3,2...3,3	4,0...4,5	0,63+0,13·10 <sup>-3</sup> tcp	–	–	10	–
Шамотна цегла	1,8...1,9	2,54...2,6 2	0,88+0,23·10 <sup>-3</sup> tcp	0,84+0,58·10 <sup>-3</sup> tcp	7...15	1...1,5	0,6

Примітки: \*1 При 25 °С \*2 При 100 °С \*3 При 20 °С \*4 При 1000 °С \*5 Від 0 до 75 °С

## 1.2 Аналіз впливу пористої структури вогнетриву на його коефіцієнт теплопровідності

Як показали дослідження [14], коефіцієнт теплопровідності матеріалу залежить не тільки від того, закрита або відкрита пористість, а й від розміру пір і їх розташуванню щодо теплового потоку. Ефективний коефіцієнт теплопровідності для матеріалу з порами, зорієнтованими уздовж теплового потоку, майже у два рази вищий, ніж для матеріалу з порами, зорієнтованими перпендикулярно теплового потоку. Тепловий потік у вогнетриву з порами складається з теплопровідності газу, конвективної теплопровідності та теплопровідності випромінюванням. На практиці конвективну теплопровідність треба враховувати, якщо розмір пор більш ніж 5 мм [16].

Для визначення залежностей розміру та розташування пір на ефективний коефіцієнт теплопровідності матеріалу та виявлення раціональної пористої структури для теплової ізоляції, було проаналізовано окремі випадки впливу пористої структури.

У таблиці 1.3 прийняті наступні позначення:

- $p$  – пористість;
- $\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу (в якості прикладу обрано кремнеземний матеріал з коефіцієнтом теплопровідності  $0,12 \text{ Вт / (м}\cdot\text{К)}$ );
- $\lambda_2$  - коефіцієнт теплопровідності середовища (в якості прикладу обрано повітря з домішками газів має коефіцієнт теплопровідності  $0,019 \text{ Вт / (м}\cdot\text{К)}$ ).

Тепловий потік спрямований знизу вгору. Чорним кольором позначено матеріал.

До розрахунку коефіцієнта теплопровідності засипок (8 і 9, табл. 1.3) також відноситься формула Ейкена


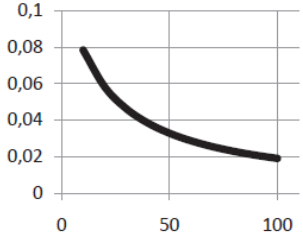
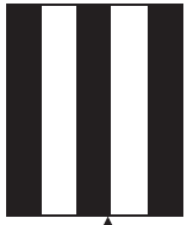
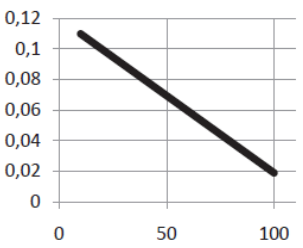
$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\lambda_1 + 1 + \frac{2p \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)}{\frac{2\lambda_1}{\lambda_2} - 1}}{1 - p \frac{1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}{\frac{2\lambda_1}{\lambda_2} + 1}}$$

та формула Торкара

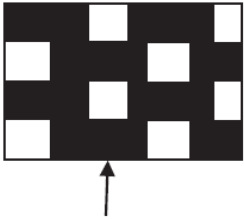
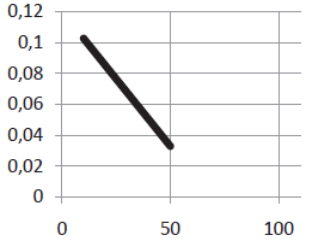
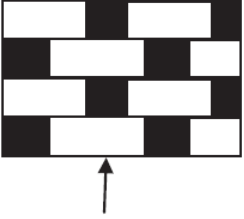
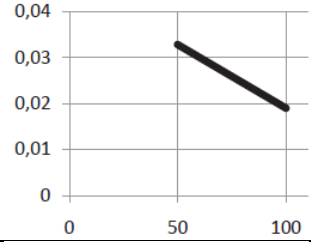
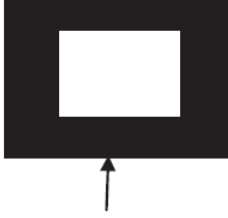
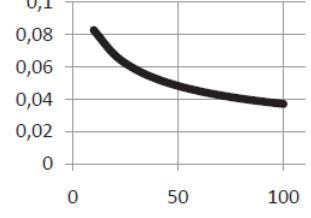
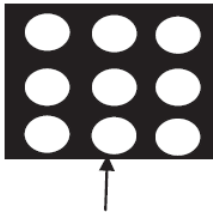
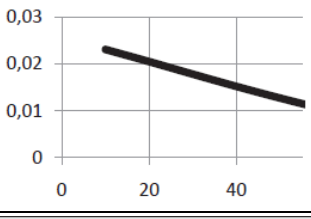
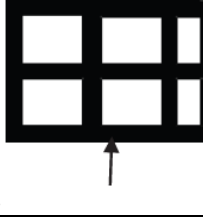
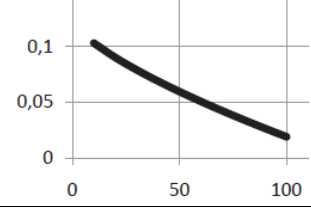
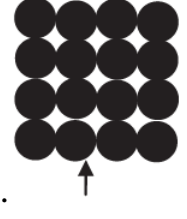
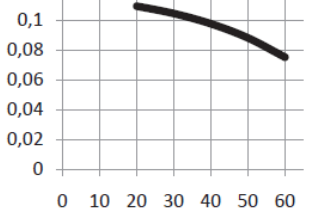
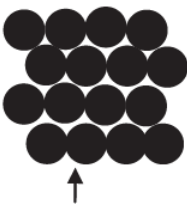
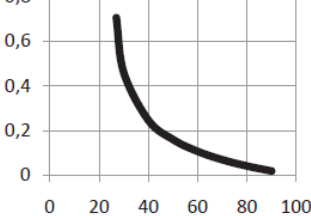
$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\lambda_1}{1 - p}$$

Формула Ейкена дає найменшу помилку при формі часток, яка наближується до сфери, та пористості менш ніж 50 %. Для засипки з дисперсного матеріалу найбільш близький випадок 9, таблиця 1.3.

Таблиця 1.3 – Залежність коефіцієнта теплопровідності від пористості для двофазних систем

Схема розташування пор	Формула для розрахунку ефективного коефіцієнту теплопровідності	Приклад $\lambda_{\text{эф}} = f(p)$
1. 	$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_2 \frac{100}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}(100 - p) + p}$	
2. 	$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_1 \frac{100 - p}{100} + \lambda_2 \frac{p}{100}$	

Продовження таблиці 1.3

1	2	3
<p>3.</p> 	<p>при <math>p \leq 50\%</math></p> $\lambda_{эф} = \lambda_2 \left[ \frac{4p}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + \frac{\lambda_1(1-2p)}{\lambda_2} \right]$	
<p>4.</p> 	<p>при <math>p \geq 50\%</math></p> $\lambda_{эф} = \lambda_2 \left[ \frac{4(1-p)}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + (2p-1) \right]$	
<p>5.</p> 	$\lambda_{эф} = \frac{\lambda_1^2 p^{\frac{2}{3}} + \lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 + (p^{\frac{2}{3}}(\lambda_2 - \lambda_1))}$	
<p>6.</p> 	<p>при <math>p \leq 50\%</math></p> $\lambda_{эф} = \frac{\lambda_2 p + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}(1-p^{\frac{2}{3}})}{p - p^{\frac{2}{3}} \frac{\lambda_1}{\lambda_2}(1-p^{\frac{2}{3}} + p)}$	
<p>7.</p> 	$\lambda_{эф} = \lambda_2 p^{\frac{1}{3}} + \lambda_1(1-p)^{\frac{2}{3}}$	
<p>8.</p> 	<p><math>p \approx 48\%</math></p> $\lambda_{эф} = \frac{1,5\pi\lambda_1(0,9-p)}{(2,1-p)^2}$	
<p>9.</p> 	<p><math>p \approx 30\%</math></p> $\lambda_{эф} = 3\pi\lambda_1 \ln \frac{43 + 0,31p}{p - 26}$	

Проводиться графічний аналіз: окремо пористі матеріали на засипки. Для пористих матеріалів залишається ті ж самі показники, як у прикладі, а для засипок приймається теплопровідність рівну гранулам гідросилікатів на основі сіоліта для середньотемпературної теплової ізоляції енергетичного обладнання та його елементів (0,036 Вт/(м·К)).

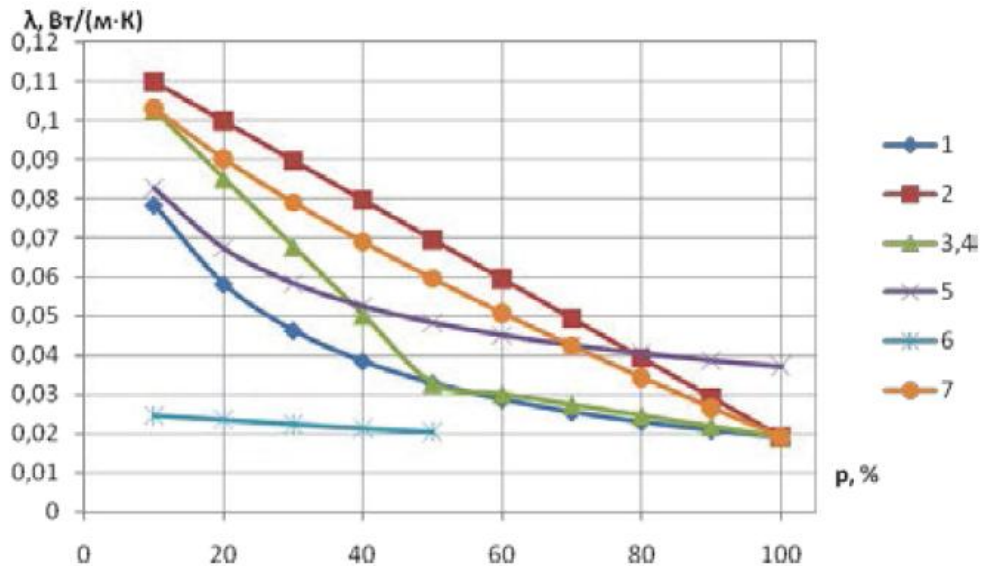


Рисунок 1.1 – Вплив пористості на ефективний коефіцієнт теплопровідності для різних схем пористості

Як видно з рисунку 1.1 структура 6 є оптимальною для теплоізоляційного матеріалу, але при пористості 10% коефіцієнт теплопровідності матеріалу не може бути приблизно рівний коефіцієнту теплопровідності повітря. Тому розрахункова формула 6 є не вірною, а мінімальний коефіцієнт теплопровідності (теоретичний) досягається у структури 1, максимальний – структура 2. Структура 7 є також непридатною для теплоізоляційних матеріалів, так як в ній присутні стоки тепла без контактного опору. Формула для структури 5 рекомендується для пори у якій доведено існування природньої конвекції.

Структура з мінімальним теоретичним ефективним коефіцієнтом теплопровідності є шахове розташування зорієнтованих перпендикулярно теплового потоку пір з об'ємом.

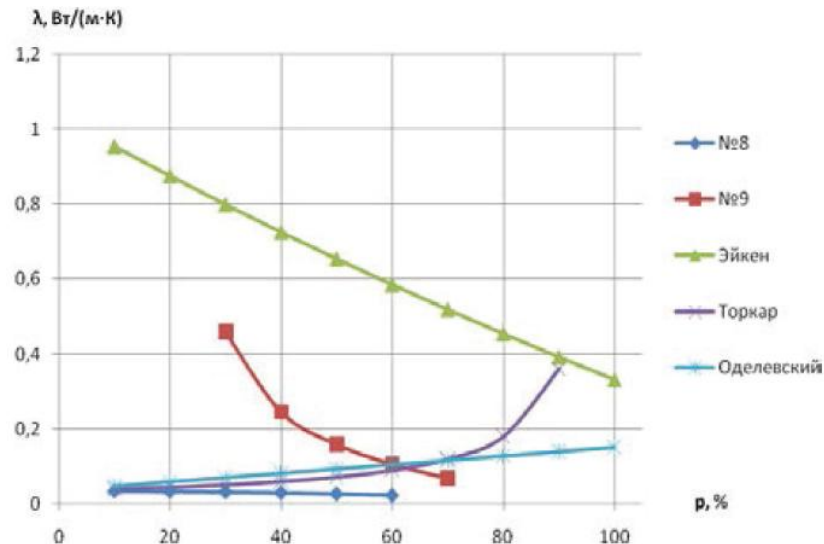


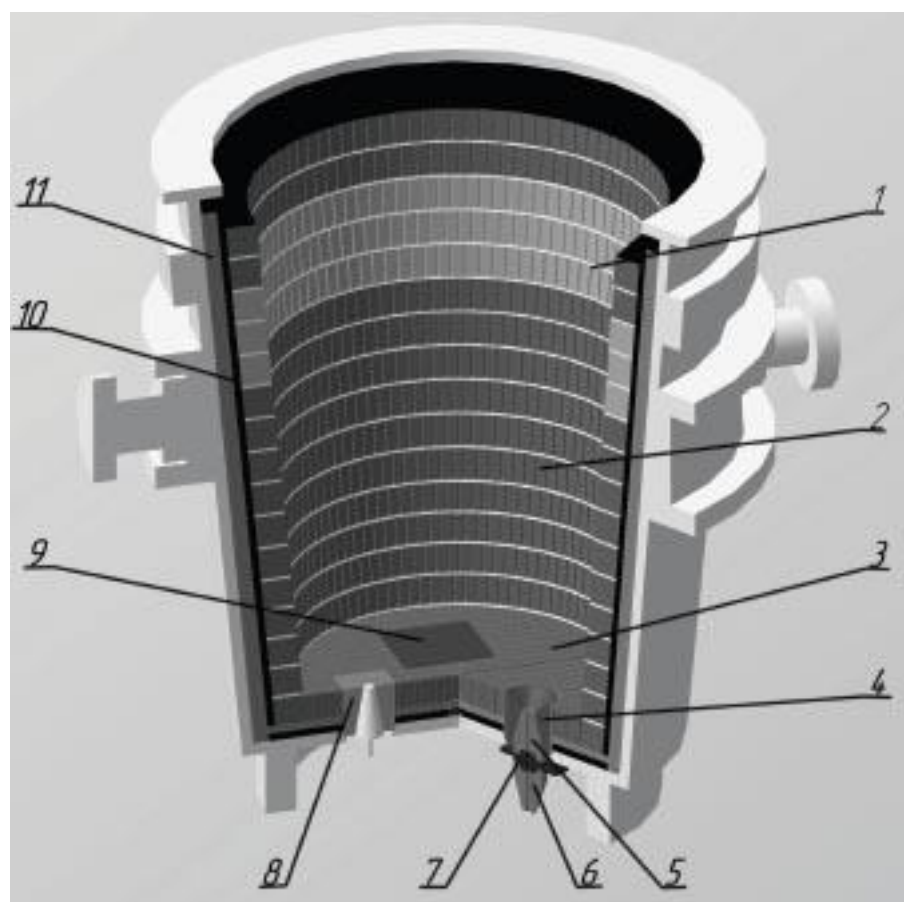
Рисунок 1.2 – Вплив пористості на ефективний коефіцієнт теплопровідності для засипок з дисперсного матеріалу

З рисунку 1.2 можна побачити, що формула Ейкена і Богомолова (9, таблиця 1.3) показує лише загальну залежність і потребує емпіричної коригування. Залежно Торкара і Оделевського висловлюють збільшення коефіцієнта теплопровідності при збільшенні пористості і годяться тільки для вологих дисперсних систем або систем з великим розміром пір. Найбільш прийнятною є залежність Некрасова для ідеалізованої структури (8, табл. 1.3).

### 1.3 Вогнетриви для сталерозливного ковша МБЛЗ

Сталерозливний ківш застосовується для зливу в нього з сталеплавильного агрегату металу і частини шлаку, для витримки, транспортування і розливання металу в злитки або на машину безперервного

лиття заготовок (МБЛЗ), після чого шлак повинен бути прибраний. Як правило, в ковші виробляють розкислення, легування і внеагрегатну обробку сталі, в зв'язку з цим ківш повинен бути обладнаний надійними пристроями, що забезпечують його стійкість на стенді, транспортування, дозовану розливання сталі із заданою швидкістю і подальший слив шлаку [17]. Сталерозливний ківш зображен на рисунку 1.3.



1 – шлаковий пояс; 2 – робочий шар стін ковша; 3 – днище ковша; 4 – гніздовий блок; 5 – верхній стакан розливного вузла; 6 – нижній стакан розливного вузла; 7 – шиберний затвор; 8 – продувний вузол з гніздовим блоком; 9 – бійня місце; 10 – арматурний шар; 11 – теплоізоляційний шар

Рисунок 1.3 – Сталерозливний ківш

Місткість сталерозливних ковшів досягає 480 т. Футеровка днища і стін складається з декількох шарів: теплоізоляційного шару, арматурного шару і робочої футеровки.

Теплоізоляційний і арматурний шари можуть служити кілька місяців, робочий - кілька плавок. На стійкість футеровки впливають такі основні фактори: різкі коливання температури, тривалість контакту з металом і шлаком (тривалість розливання), якість вогнетривів, склад і температура стали.

Для робочої футеровки використовуються періклазоуглеродисті, алюмоперіклазоуглеродисті, безуглеродисті, неформовані (бетони) вогнетриви. Для арматурного шару використовується шамот ( $Al_2O_3 \leq 65$ ), для теплоізоляційного шару використовується волокниста плита з високою міцністю і теплоізолюючою здатністю ( $Al_2O_3 + SiO_2 \geq 95$ ;  $K_2O + Na_2O \leq 0,5$ ; межа міцності при стисненні,  $N/mm^2 \geq 1,5$  (при стисненні 20 %)).

Найбільш слабким місцем футерування є шви. Тому кладку ведуть з мінімальною товщиною швів, використовуючи цегли з мінімальної допустимої усадкою (або з додатковим зростанням) і якісний мертель. Так само використовують набивні або наливну футеровку. Її виготовляють за шаблоном, встановленому на вимощений цеглою дно, з фірмовий маси складу: (90...92) %  $SiO_2$ , (2,0...2,5) %  $Al_2O_3$ , до 1%  $CaO$ , 1,5%  $MgO$ , (2,0...2,5) %  $FeO$ , вологістю (8...10) %. При набивної і наливний футеровці днище і верхні ряди стін виконують з формованих виробів [18].

В даний час для виготовлення монолітної футеровки використовують бетони. Основним компонентом яких є глинозем в поєднанні з іншими вогнетривкими матеріалами. Найбільшого поширення набули гліноземношпінельні ( $Al_2O_3 - MgO \cdot Al_2O_3$ ) та гліноземномагнезіальні ( $Al_2O_3 - MgO$ ) бетони. У складі цих бетонів використовуються синтетичні спечені та плавлені матеріали.

Крім футерування ківш оснащується гніздовим цеглою і дозуючим пристроєм - шиберним затвором і сталерозливних склянкою або стопором і



сталерозливних склянкою. У більшості випадків використовують магнезитові сталерозливні склянки. Також застосовують і шамотні, графіто-шамотні, форстеритові, графітоперіклазові склянки.

Плити і колектори шибєрних затворів виготовляють муллітовими, муллітокорундовими, коруновими і періклазовими, іноді цирконовими з вмістом  $ZrO_2$  60 %.

Після сталерозливного ковша метал потрапляє у проміжний ківш. Він забезпечує прийом металу з сталерозливного ковша, його усереднення і перелив в кристалізатори. Схема переливу металу з сталерозливного ковша в промківш і кристалізатори МНЛЗ зображена на рисунку 1.4.

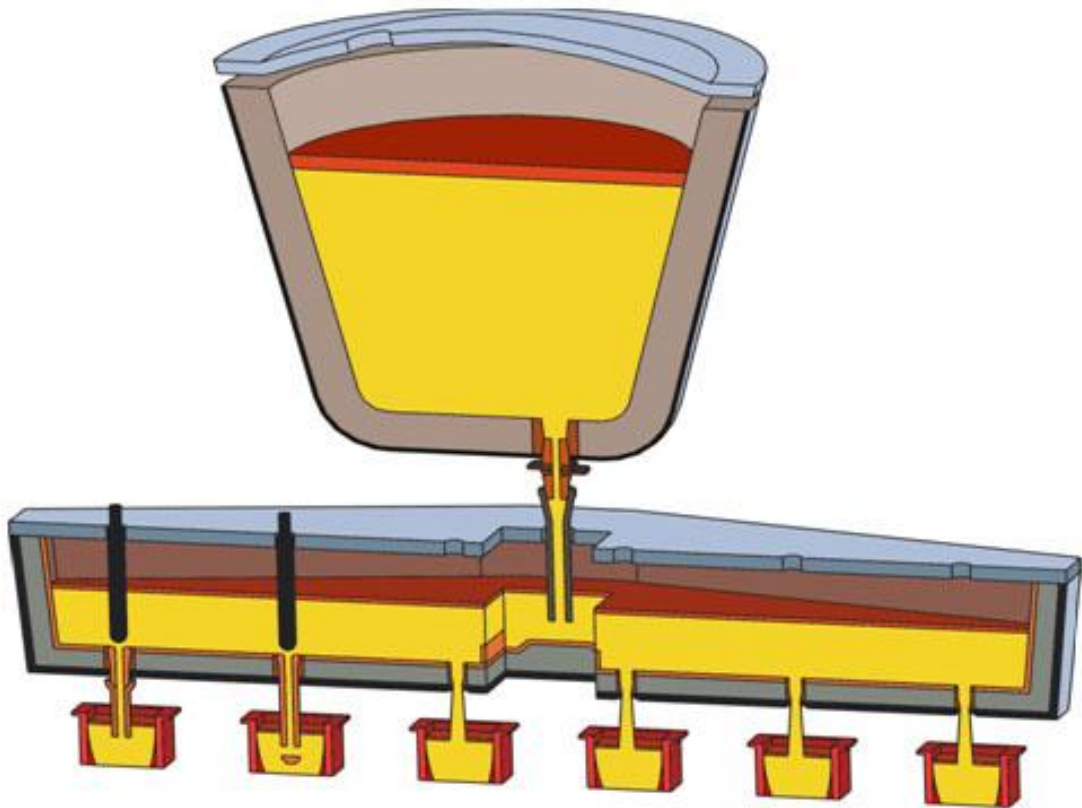


Рисунок 1.4 - Схема переливу металу з сталерозливного ковша в промківш і кристалізатори МНЛЗ

Розглянутий проміжний ківш має ємність 43 т. Тривалість розливання однієї плавки (55...95) хвилин при температурі металу (1495...1470) °С. Він

приймає метал, накопичує метал в обсягах, необхідних для стабільного процесу лиття, забезпечує розподіл і дозування стали при переливу з промківша в кристалізатори МНЛЗ, усереднює сталь по температурі і за хімічним складом в ході розливання, забезпечує рафінування металу за рахунок спливання неметалевих включень [19].

Дозування металу при розливанні з проміжного ковша в кристалізатор здійснюється за допомогою стопор-моноблока і склянки-дозатора.

Футеровка проміжного ковша включає теплоізоляційний, арматурний та робочий шари. Арматурний шар виробляється з вогнетривкого бетону товщиною 110 мм, теплоізоляційний шар – з плит алюмосилікатного волокна товщиною (10...12) мм; теплоізоляційний шар виконується з застосуванням торкрет-мас, а також шамоту [20].

## 1.4 Матеріальний баланс виробництва вогнетривкої цегли

### 1.4.1 Приклад виробництва вогнетривких матеріалів

Тип вогнетривкого матеріалу залежить від конкретної сфери застосування і вимог технології. Для кожного матеріалу застосовується свій спосіб виробництва, який відрізняється від виробництва інших матеріалів. Взагалі приготування включає такі етапи, як приготування сировинних матеріалів, суміші, формування, сушка, формування та упаковка вихідних матеріалів.

Всі способи виробництва можна звести в одну технологічну схему, яка зображена на рисунку 1.5.

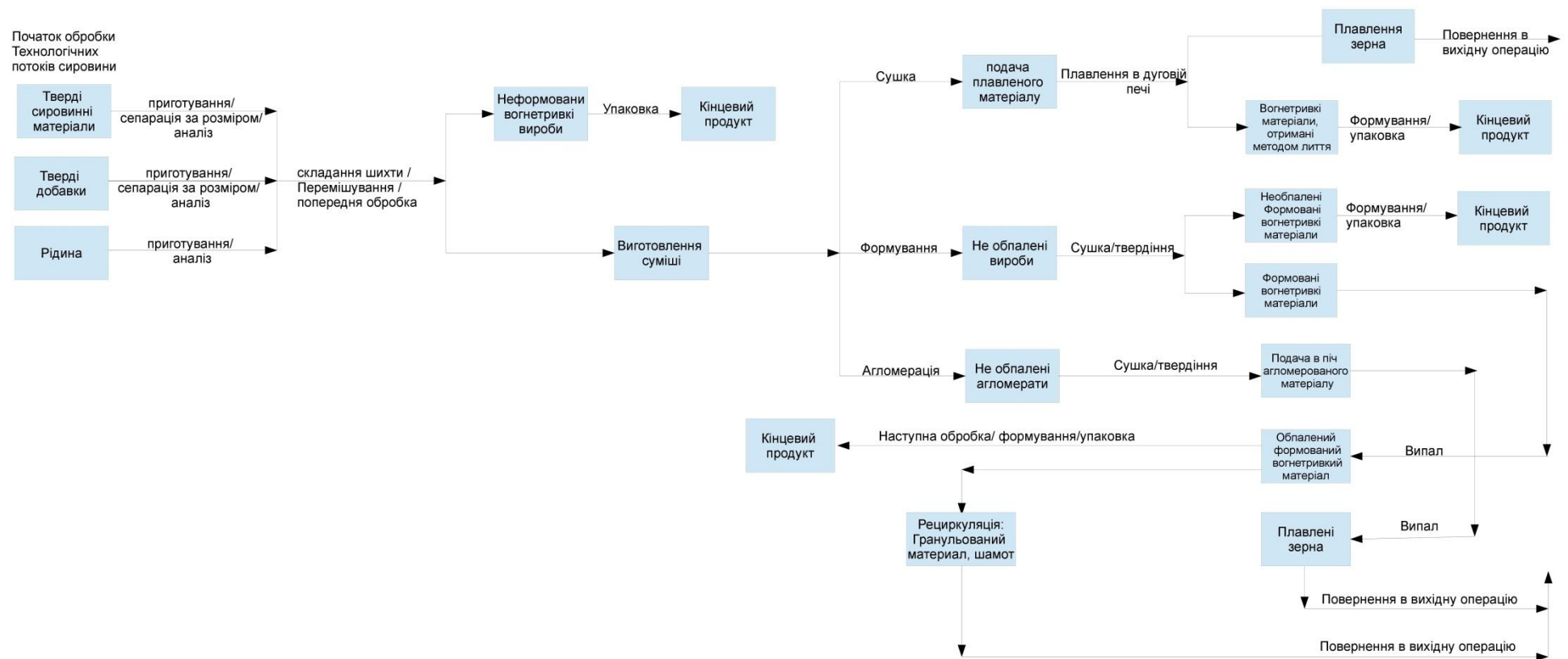


Рисунок 1.5 – Технологічна схема виробництва вогнетривких матеріалів

#### 1.4.2 Матеріальний баланс виробництва шамоту

Шамотна цегла виробляється з шамотної глини, глини-зв'язки та води. Шамотна глина виготовляється у обертовій печі, глина-зв'язка у сушильному барабані, опал суміші у тунельній печі.

В обертovu піч подається глина на шамот кількістю 4,48 кг/с з вологістю 22 % [10].

Кількість глини після сушіння, кг/с

$$G_{ш.суш} = 4,48 \cdot \frac{100 - 22}{100} = 3,49.$$

Втрати при сушінні, кг/с

$$\Delta G_{ш.суш} = 4,48 - 3,49 = 0,99.$$

Кількість глини після прожарювання, кг/с

$$G_{ш.пр} = 3,49 \cdot \frac{100 - 13}{100} = 3,04,$$

де 13 % - втрати при прожарюванні глини на шамот.

Втрати після прожарювання, кг/с

$$\Delta G_{ш.пр} = 3,49 - 3,04 = 0,45.$$

Кількість глини після транспортування, кг/с

$$G_{ш.тр} = 3,04 \cdot \frac{100 - 0,1}{100} = 3,037,$$

де 0,1 % - втрати при транспортуванні.

Втрати на транспортування, кг/с

$$\Delta G_{\text{и.тр}} = 3,04 - 3,037 = 0,003.$$

Глина для зв'язки подається у сушильний барабан 1,9 кг/с з вологістю 22 %.

Кількість глини після сушіння, кг/с

$$G_{\text{гл.суш}} = 1,9 \cdot \frac{100 - 22}{100} = 1,48.$$

Втрати при сушінні, кг/с

$$\Delta G_{\text{гл.сул}} = 1,9 - 1,48 = 0,42.$$

Кількість глини після прожарювання, кг/с

$$G_{\text{гл.пр}} = 1,48 \cdot \frac{100 - 12}{100} = 1,302,$$

де 12 % - втрати при прожарюванні глини для зв'язки.

Втрати після прожарювання, кг/с

$$\Delta G_{\text{гл.пр}} = 1,48 - 1,302 = 0,178.$$

Кількість глини після транспортування, кг/с

$$G_{\text{гл.суш}} = 1,302 \cdot \frac{100 - 0,1}{100} = 1,301,$$

де 0,1 % - втрати при транспортуванні.

Втрати на транспортування, кг/с

$$\Delta G_{\text{гл.суш}} = 1,302 - 1,301 = 0,001.$$

Кількість води, що подається у суміш глини на шамот та для зв'язки  
0,32 кг/с.

Сума води, глини на шамот та глини для зв'язки, кг/с

$$0,32 + 3,037 + 1,302 = 4,658.$$

Кількість суміші після пресу, кг/с

$$G_{\text{прес}} = 4,658 \cdot \frac{100 - 0,2}{100} = 4,649,$$

де 0,2 % - втрати на пресування.

Втрати на пресування, кг/с

$$4,658 - 4,649 = 0,009.$$

Сушіння матеріалу, кг/с

$$G_{\text{суш}} = 4,649 \cdot \frac{100 - 8}{100} \cdot \frac{100 - 0,5}{100} = 4,343,$$

де 8 % - вологість маси;

2 % - вологість виробу після сушіння;

0,5 % - брак виробу при сушіння.

Втрати на сушіння, кг/с

$$G_{суш} = 4,649 - 4,343 = 0,306.$$

Втрати вологи у печі, кг/с

$$G_{вол} = 4,343 \cdot \frac{100 - 2}{100} = 4,256.$$

Кількість матеріалу при виходу із печі, кг/с

$$G_{ш.суш} = 4,256 \cdot \frac{100 - 1,5}{100} = 4,192,$$

де 1,5% - втрати матеріалу на випал.

Витрати матеріалу у печі, кг/с

$$\Delta G_{печ} = 4,343 - 4,192 = 0,151.$$

Прибуткова частина та витрати внесені у таблицю 1.4 та представлені на рисунках 1.6 та 1.7 у вигляді діаграм.

З кругової діаграми прибуткової частини, зображеної на рисунку 1.6 видно, що найбільша частина матеріалів для виробництва шамоту припадає на шамотну глину. Найменший вміст у воді, яка застосовується для створення суміші.

Таблиця 1.4 – Витрати та втрати виробництва шамотної цегли

Витрати			Втрати		
Значення	Кількість		Значення	Кількість	
	кг/с	%		кг/с	%
Глина на шамот	4,48	66,87	Глини на шамот при сушінні	0,99	39,47
Глина для зв'язки	1,9	28,4	Глини на шамот після прожарювання	0,45	17,94
Вода	0,32	4,73	Глини на шамот при транспортуванні	0,003	0,12
			Глини для зв'язки при сушінні	0,42	16,75
			Глини для зв'язки після прожарювання	0,178	7,1
			Глини для зв'язки при транспортуванні	0,001	0,04
			Суміші при пресування	0,009	0,36
			Суміші при сушінні	0,306	12,2
			Матеріалу у печі	0,151	6,02
Сума витрат	6,7	100	Сума втрат	2,508	100
Кількість кінцевого матеріалу				4,192 кг/с	

З кругової діаграми прибуткової частини, зображеної на рисунку 1.6 видно, що найбільша частина матеріалів для виробництва шамоту припадає на шамотну глину. Найменший вміст у воді, яка застосовується для створення суміші.

Схема виробництва шамотної цегли представлена на рисунку 1.8. Графічне зображення процесу виробництва шамотної цегли потрібно для аналізу витрат та їх зменшення, а також для заходів щодо знаходження більш високого коефіцієнта теплопровідності. Це може бути співвідношення шамотна глина – глина для зв'язки або інше.



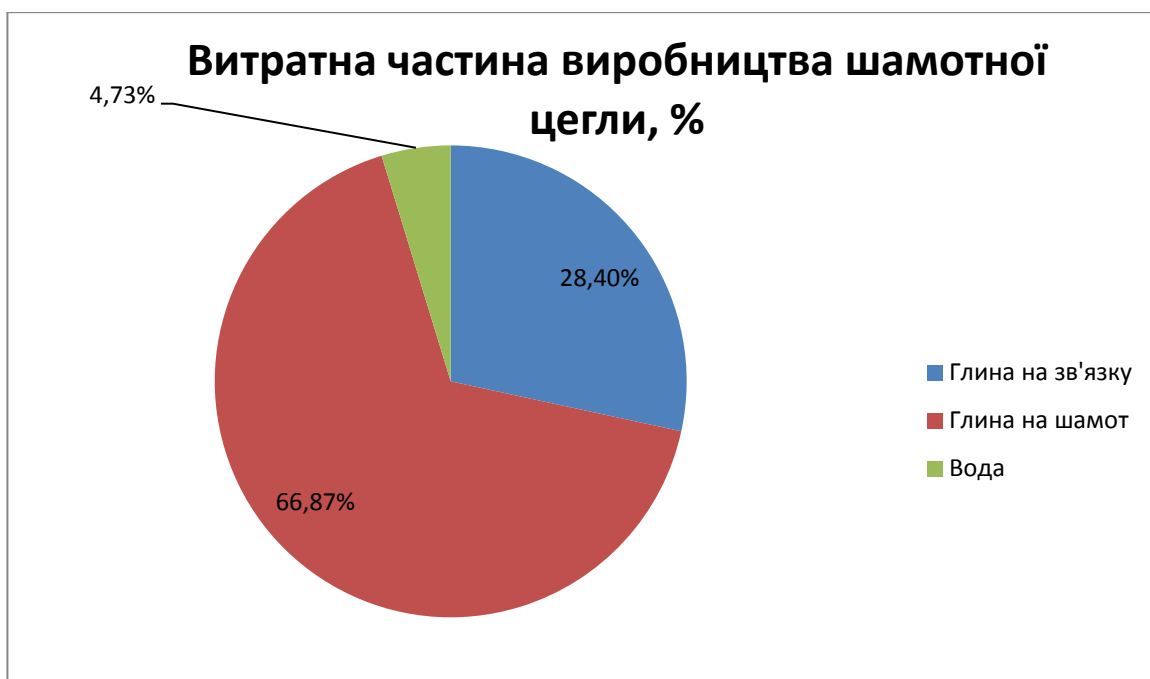


Рисунок 1.6 – Витратна частина виробництва шамотної цегли, %

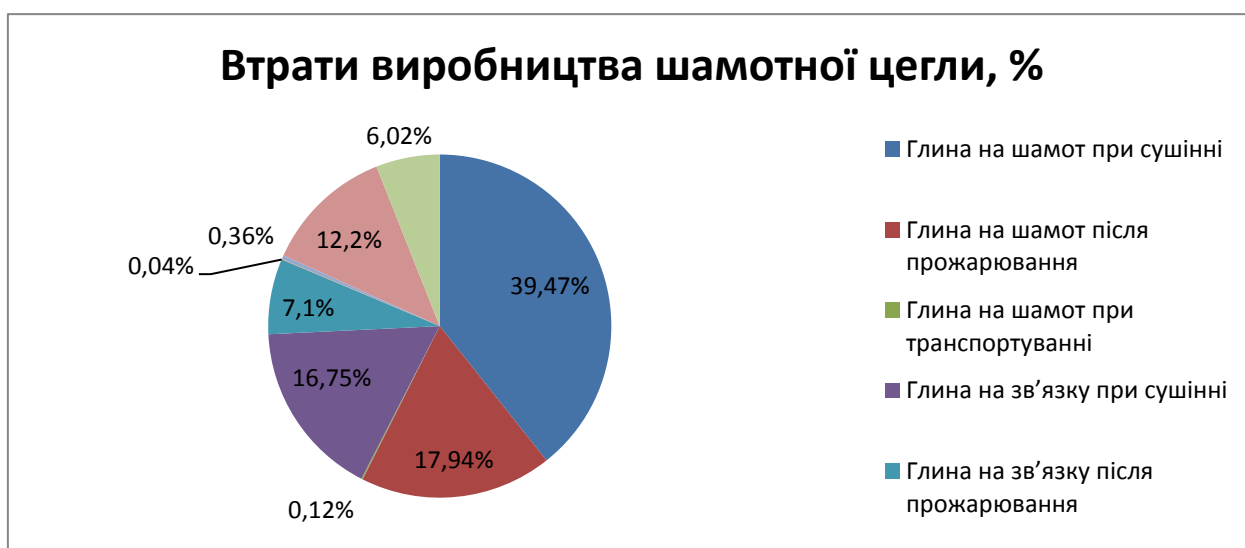


Рисунок 1.7 – Втрати виробництва шамотної цегли, %

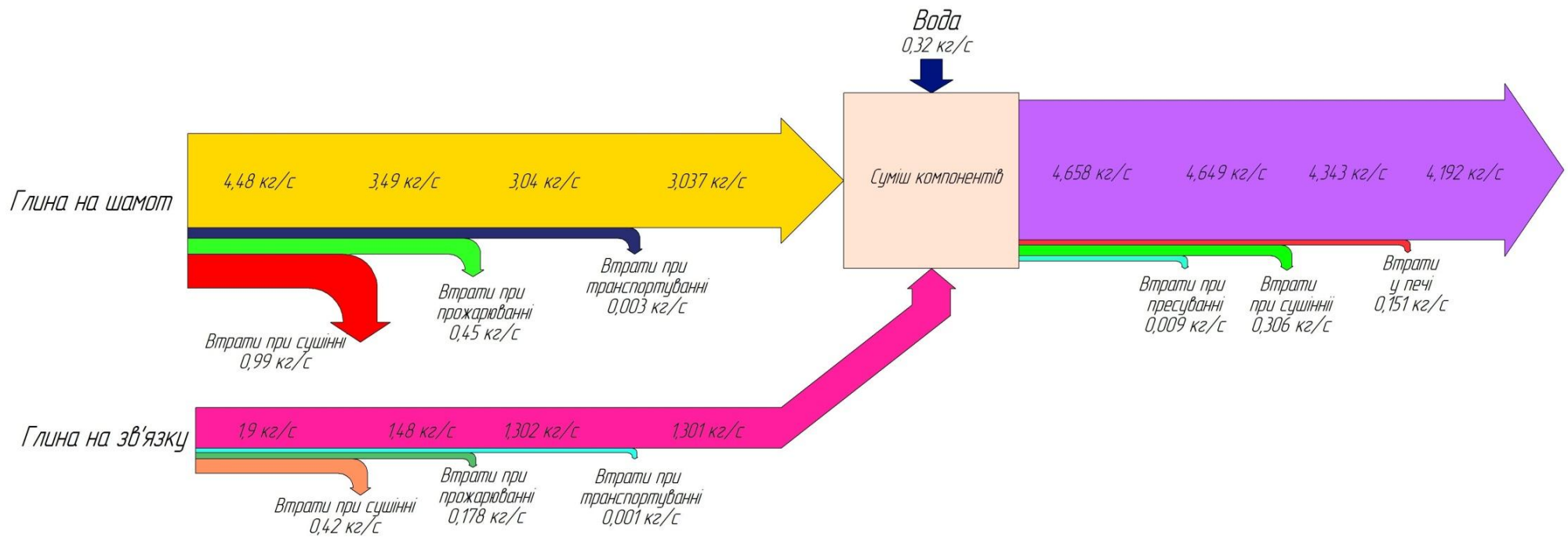


Рисунок 1.8 – Діаграма Сенкі виробництва шамотної цегли

Виробництво вогнетривів має складну технологічну схему (рисунок 1.5), яка включає до себе подачу необхідних матеріалів, їх змішання, сушку, формування. Для кожного матеріалу це своя послідовність, температурні режими, кількість поданої сировини та інше. На цій технологічній схемі не позначені витрат, які виникають при виробництві, але при детальному розгляді виробництва будь якого матеріалу їх потрібно враховувати. Це показано на схемі виробництва шамотної цегли, яка приведена на рисунку 1.8. в шамот входить три компонента – глина на шамот, глина для зв'язки та вода для суміші. При обробці глини спостерігається витрати (при сушки, прожарюванні та транспортуванні). Також витрати є і при обробці вже сформованого матеріалу. Построєні таблиця та діаграми показують процентне співвідношення прибуткової та витратної частини.

## 1.5 Енергетичний баланс виробництва вогнетривкої цегли

### 1.5.1 Енергетичний баланс обертової печі для опалу глини на шамот

Теплота горіння палива [21], кВт

де  $V$ -годинна витрата палива, м<sup>3</sup>/с;

– нижча теплота згорання, кДж/м<sup>3</sup>.

Фізична теплота, що вноситься паливом, кВт

де  $H$  – ентальпія палива, що надходить на горіння, при  $t_T = 75^\circ\text{C}$ , кДж/м<sup>3</sup>;

– необхідний об'єм повітря, \_\_\_\_\_

Теплота екзотермічної реакції, кВт

де  $G$  - маса матеріалу, кг/с.

Сумарна теплота витрат, кВт

Теплота, яка втрачається на сушіння матеріалу, кВт

$\Delta$

де  $W_1$  – початкова волога, %;

$W_2$  – кінцева волога, %;

$G$  – маса поданого на сушіння матеріалу, кг/с;

$c$  – теплоємність глини, кДж/(кг К).

Теплота, яка втрачається на кальцинацію матеріалу, кВт

$\Delta$

Теплота, яка втрачається на спікання матеріалу, кВт

$$\Delta$$

Теплота, яка втрачається при охолодження матеріалу, кВт

$$\Delta$$

Теплота, яка відводиться газами, кВт

де  $c_{ог}$  – питома теплоємність газів, що відходять при їх температурі на виході з печі,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  [22]

$$C_{ог} = 4,2 \cdot (0,323 + 0,000018 t_{ог}) = 4,2 \cdot (0,323 + 0,000018 \cdot 300) = 1,38,$$

– об'ємні частки димових газів,  $\text{м}^3/\text{м}^3$

,269.

Теоретичний об'єм азоту, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Визначаємо об'єм трьохатомних газів, \_\_\_\_\_

$$85,8+2\cdot 0,2+3\cdot 0,1+4\cdot 0,1=0,87.$$

Теоретичний об'єм водяних парів визначимо за формулою, —————

—

$$85,8+3\cdot 0,2+4\cdot 0,1+5\cdot 0,1+0,124\cdot 10=1,74,$$

де  $d_{г.тл.}$  вологовміст газоподібного палива,  $d_{г.тл.} = 10 \text{ г/м}^3$ .

Втрати тепла в навколишнє середовище, кВт

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

Сумарна теплота витрат, кВт

Невизначені витрати, кВт

Таблиця 1.5 – Енергетичний баланс обертової печі

Витрати			Втрати		
Значення	Розмір		Значення	Розмір	
	кВт	%		кВт	%
Теплота горіння палива	12737,6	97,5	Теплота на сушіння матеріалу	2815,27	22,38
Фізична теплота, що вноситься паливом	326,21	2,48	Теплота на кальцінацію матеріалу	1141,23	9,07
Теплота екзотермічної реакції	0,253	0,02	Теплота на спікання матеріалу	760,82	6,05
Сумарна теплота прибутку	13063,063	100	Теплота, яка втрачається при охолодження матеріалу	3777,5	30
			Теплота, що відводиться газами	1534,95	12,2
			Втрати тепла в навколишнє середовище	2547,52	20,3
			Сумарна теплота втрат	12577,29	100
Невизначені витрати	486,773				



Рисунок 1.9 – Діаграма Сенкі енергетичного балансу обертової печі

З діаграми, зображеної на рисунку 1.9 видно, що найбільші витрати – витрати при охолодженні матеріалу та витрати теплоти на сушіння матеріалу.

### 1.5.2 Енергетичний баланс сушильного барабана для опалу глини для зв'язки

Теплота від горіння палива, кВт

де  $B$  – витрата палива за 1 секунду,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

– нижча теплота згорання,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ .

Фізична теплота, що вноситься паливом, кВт

де  $H$  – ентальпія палива, що надходить на горіння, при  $t_{\tau} = 75^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;

– необхідний об'єм повітря, \_\_\_\_\_.

Теплота екзотермічної реакції, кВт

де  $G$  – маса матеріалу,  $\text{кг}/\text{с}$ .

Сумарна теплота витрат, кВт

Теплота, яка втрачається на сушіння матеріалу, кВт

$\Delta$



– маса поданого на сушіння матеріалу, кг/с;

теплоємність глини, кДж/(кг К).

Теплота, яка втрачається на прожарювання матеріалу, кВт

$\Delta$

Теплота, яка втрачається на охолодження матеріалу, кВт

$\Delta$

Теплота, яка відводиться газами, кВт,

– питома теплоємність газів, що відходять при їх температурі на виході з печі, кДж/(кг К)

$$C_{ог} = 4,2 \cdot (0,323 + 0,000018 t_{ог}) = 4,2 \cdot (0,323 + 0,000018 \cdot 150) = 1,37;$$

– об'ємні частки димових газів, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Втрати тепла в навколишнє середовище, кВт

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

## Сумарна теплота втрат, кВт

## Невизначені витрати, кВт

Таблиця 1.6 – Енергетичний баланс сушильного барабана

Витрати			Втрати		
Значення	Розмір		Значення	Розмір	
	кВт	%		кВт	%
Теплота горіння палива	1592,2	97,5	Теплота на сушіння матеріалу	155,33	15,3
Фізична теплота, що вноситься паливом	40,78	2,49	Теплота на прожарювання матеріалу	209,72	20,7
Теплота екзотермічної реакції	0,107	0,01	Теплота, яка втрачається при охолодженні матеріалу	233,81	23,1
Сумарна теплота прибутку	1633,087	100	Теплота, що відводиться газами	95,24	9,4
			Втрати тепла в навколишнє середовище	318,44	31,5
			Сумарна теплота втрат	1012,5	100
Невизначені витрати	620,59				



Рисунок 1.10 – Діаграма Сенкі енергетичного балансу сушильного барабана

З діаграми, зображеної на рисунку 1.10 видно, що найбільші витрати – невизначені витрати; найменші – витрати теплоти, що відводиться газами.

### 1.5.3 Опал цегли у тунельній печі

Теплота від горіння палива, кВт

де  $B$ -годинна витрата палива,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

– нижча теплота згорання,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ .

Фізична теплота, що вноситься паливом, кВт

де  $H$  – ентальпія палива, що надходить на горіння, при  $t_{\tau} = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;

– необхідний об'єм повітря, \_\_\_\_\_.

Теплота екзотермічної реакції, кВт

де  $G$  - маса матеріалу,  $\text{кг}/\text{с}$ .

Сумарна теплота прибутку, кВт

Теплота на сушіння матеріалу, кВт

$$\Delta \quad ,$$

де  $m$  – маса поданого на сушіння матеріалу, кг/с;  
 $c$  – теплоємність цегли, кДж/(кг К).

Теплота на прожарювання матеріалу, кВт

$$\Delta \quad .$$

Теплота, що втрачається при охолодження матеріалу, кВт

$$\Delta \quad .$$

Теплота, що відводиться газами, кВт

,

де  $C_{ог}$  – питома теплоємність газів, що відходять при їх температурі на виході з печі, кДж/(кг К)

$$C_{ог}=4,2 \cdot (0,323+0,000018t_{ог}) = 4,2 \cdot (0,323+0,000018 \cdot 100)=1,37;$$

$V$  – об'ємні частки димових газів, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Втрати тепла в навколишнє середовище, кВт

.

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

Сумарна теплота витрат, кВт,

Невизначені витрати, кВт

Таблиця 1.7 – Енергетичний баланс тунельної печі

Витрати			Втрати		
Значення	Розмір		Значення	Розмір	
	кВт	%		кВт	%
Теплота горіння палива	17195,76	97,5	Теплота на сушіння матеріалу	202,7	1,2
Фізична теплота, що вноситься паливом	440,38	2,497	Теплота на прожарювання матеріал	6391,29	37,4
Теплота екзотермічної реакції	0,26	0,003	Теплота, яка втрачається при охолодження матеріалу	6378,68	37,3
Сумарна теплота прибутку	17636,4	100	Теплота, що відводиться газами	685,72	4
			Втрати тепла в навколишнє середовище	3439,15	20,1
			Сумарна теплота витрат	17097,5	100
Невизначені витрати	538,9				

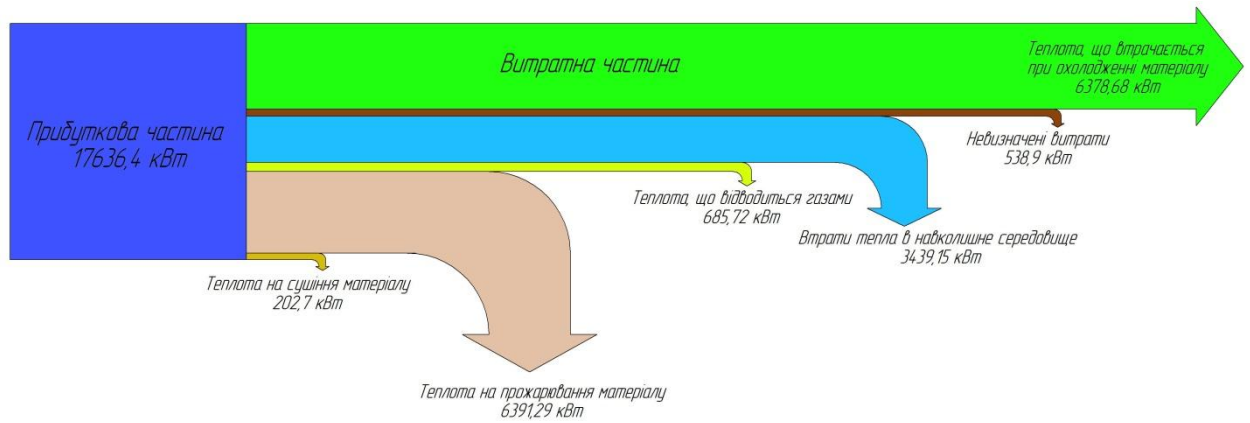


Рисунок 1.11 – Діаграма Сенкі енергетичного балансу тунельної печі

З діаграми, зображеної на рисунку 1.11 видно, що найбільші витрати – витрати при охолодженні матеріалу та витрати теплоти на прожарювання матеріалу; найменші – витрати теплоти на сушіння матеріалу.

## **2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОГНЕТРИВКОЇ ЦЕГЛИ З МЕТОЮ ЗНАХОДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

2.1 Поширені методи дослідження ефективного коефіцієнту теплопровідності

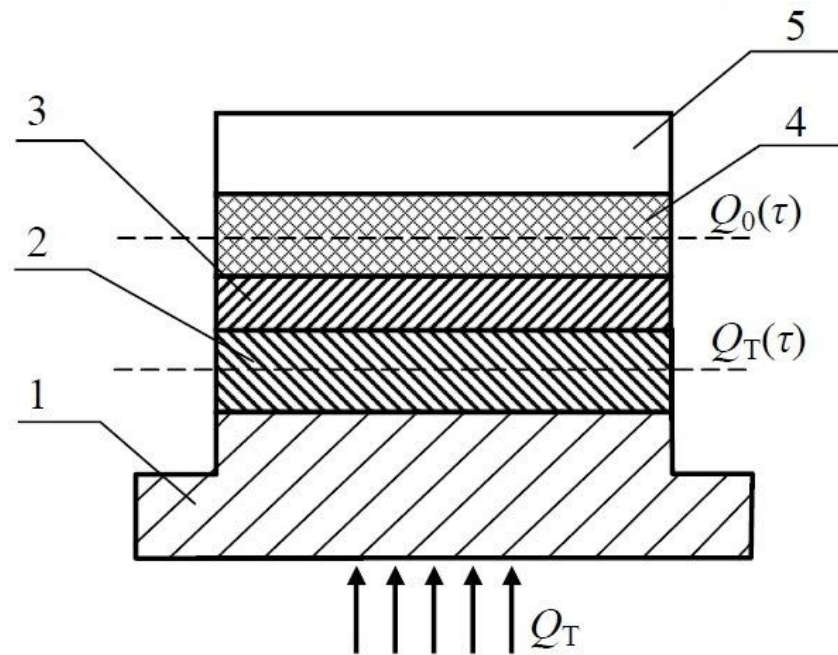
При виборі методу дослідження теплових властивостей матеріалів потрібно враховувати можливість технічної реалізації і склад матеріалу, а так же спосіб отримання об'єкта. Так само об'єкт повинен бути в тому стані, в якому використовується в промисловості (у вигляді цегли, сипучих матеріалів або пластини) [23].

Для дослідження теплопровідності матеріалів проводять в двох режимах - стаціонарних і нестаціонарних. При стаціонарному дослідженні немає зміни температури в часі [24].

### 2.1.1 Стаціонарний метод плоского шару

Для визначення коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів використовується метод динамічного калориметра з тепломіром і адіабатичній оболонкою, дослідження проводиться на вимірювачі ИТ- $\lambda$ -400 [25].

Досліджуваний зразок 4 поміщається між опорним мідним стрижнем 5 і мідної контактної пластиною 3. Досліджуваний зразок монотонно нагрівається тепловим потоком, що поступає від підставки 1. Частина надходить через тепломір теплового потоку  $Q_T(\tau)$  витрачається на нагрів зразка ( $Q_0(\tau)$ ). Температурне поле в зразку 4 і пластині 2 можна вважати лінійним.



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

Рисунок 2.1 – Схема установки з методу плоского шару

Коефіцієнт теплопровідності зразка визначається за формулою,  
Вт/(м · К)

—

де  $h$  – висота зразка, м;

$R$  – тепловий опір зразка,  $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$

\_\_\_\_\_ ,

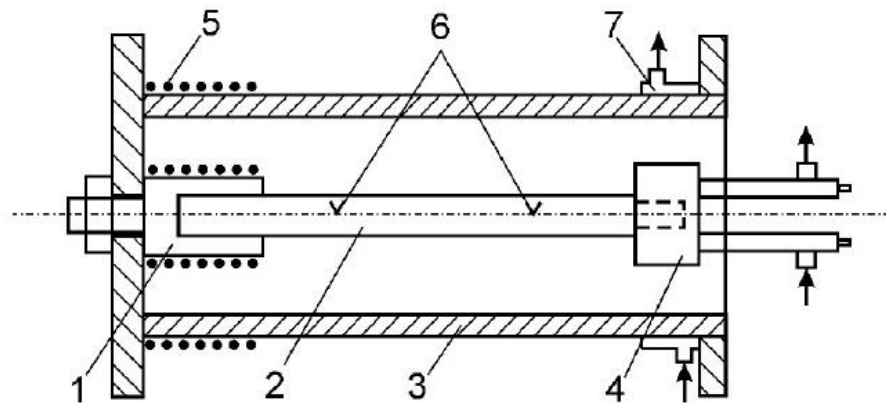
$\Delta T, \Delta T_1$  – перепад температури на зразку і пластині, К;

- теплопровідність термоміра, Вт/К;





. При відсутності бічних теплових втрат теплопровідність зразка розраховується за формулою

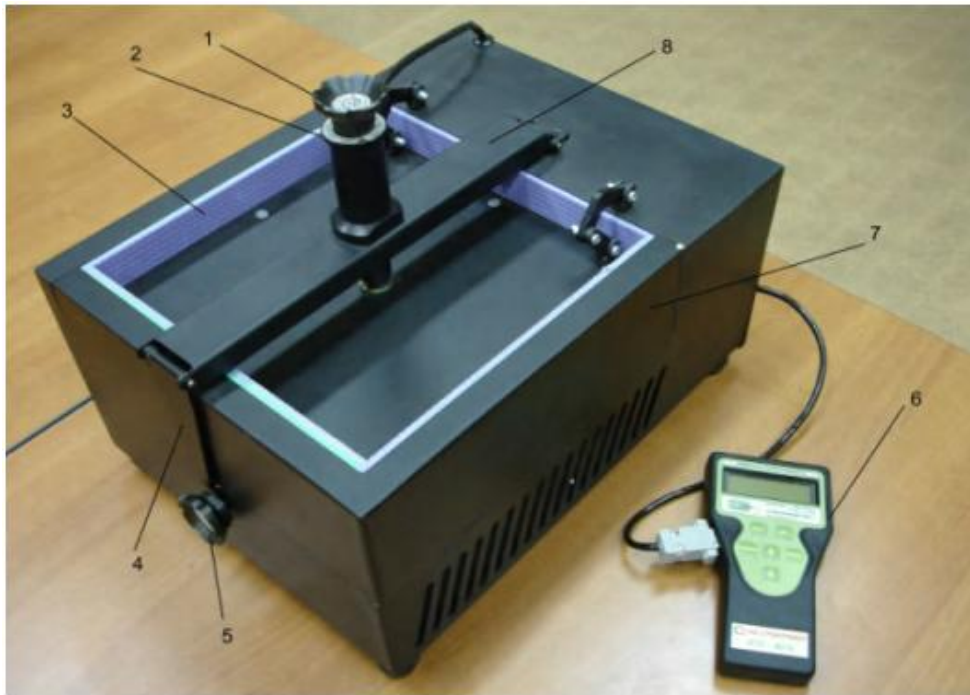


1 - блок нагрівача; 2 - зразок; 3 - охоронний циліндр;  
4, 7 - холодильники; 5 - нагрівач охоронного циліндра; 6 - термопари

Рисунок 2.2 – Схема установки з методу продольного теплового потоку

### 2.1.3 Вимірювання коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів

Вимірювач теплопровідності ІТП-МГ4 «250», призначений для визначення теплопровідності і термічного опору теплозахисних і теплоізоляційних матеріалів, призначених для теплової ізоляції енергетичного обладнання і трубопроводів при стаціонарному тепловому режимі. Конструктивно вимірник теплопровідності виконаний у вигляді двох блоків: електронного блоку; установки для нагріву (охолодження) зразка з блоком управління [26].



1 - притискний гвинт; 2 - відліковий пристрій; 3 - теплоізоляція; 4 - поводок; 5 - ексцентриковий замок; 6 - електронний блок; 7 - Г-подібна стінка; 8 - коромисло

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд вимірювача теплопровідності ИТП-МГ4 «250»

Принцип роботи вимірювача теплопровідності ИТП-МГ4 «250» полягає в створенні стаціонарного теплового потоку, що проходить через плоский зразок певної товщини і спрямованого перпендикулярно до особових гранях зразка, вимірюванні товщини зразка, щільності теплового потоку і температури протилежних лицьових граней.

У верхній частині установки розміщений притискної гвинт 1, відліковий пристрій 2 для вимірювання товщини зразка і динамометричний пристрій з тріскачкою для створення постійного зусилля притиснення зразка. Електронний блок включає схеми вимірювання, контролю та регулювання. Обчислення коефіцієнта теплопровідності і термічного опору досліджуваного зразка  $R_n$  проводиться обчислювальним пристроєм приладу за формулами:

$$\lambda = \frac{q \cdot h}{t_n - t_x},$$

$$R_n = \frac{t_n - t_x}{q} - 2 \cdot R_k,$$

де  $R_k$  - термічний опір між лицьовою гранню зразка і робочою поверхнею плити приладу,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}$ ;

$h$  - товщина досліджуваного зразка, м;

$q$  - щільність стаціонарного теплового потоку, що проходить крізь випробуваний зразок,  $\text{Вт} / \text{м}^2$ ;

$t_n$  - температура гарячої лицьовій грані досліджуваного зразка,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_x$  - температура холодної лицьовій грані досліджуваного зразка,  $^{\circ}\text{C}$ .

Також для визначення коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів різної структури розроблений ряд промислових приладів, приведених у таблиці.

Таблиця 2.1 – Технічні дані промислових приладів для вимірювання теплопровідності твердих матеріалів різної структури

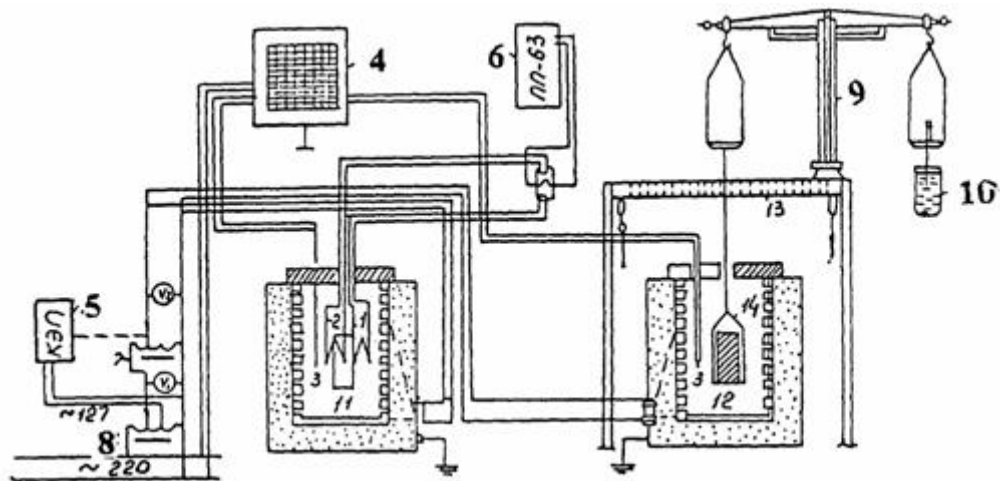
Тип приладу	Досліджувані матеріали	Діапазон температур, $^{\circ}\text{C}$	Діапазон вимірювання $\lambda$ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
ИТО-20	Тверді	20...100	0,1...5,0
ИТЕМ-1(1М)	Метали, сплави, кераміка	50...100	0,2...80,0
ИТ- $\lambda$ -20	тверді	20...100	0,1...10,0
ИТ- $\lambda$ -400	Пластмаса, скло, кераміка	20...400	0,1...5,0
ИТ-с $\lambda$ -400	Тверді	-150...+400	0,2...20,0
КДМ- $\lambda$ -900	Тверді	50...900	10...100
РКТ-20	М'які, хутра, шкіра, тканини	20	0,03...1,50
ИТС-2	теплоізоляція	20...400	0,1...5,0
ИТП-МГ4 «100/250»	теплоізоляція	15...60	0,02...1,50
ИТСМ-1	грубодисперсні	-150...+100	0,02...1,50

### 2.1.4 Дослідження тепломасообміну в процесі випалу

При обробці експериментального матеріалу вивчення процесів випалу користуються методами хімічної термодинаміки, термодинаміки незворотних процесів, або емпіричними рівняннями [27].

Диференціальне рівняння перенесення тепла, яке ускладнене масообміном, має вигляд

$$(\partial t / \partial \tau) = a(\partial^2 t / \partial x^2 + \varepsilon \cdot (\rho / c) \cdot \partial u / \partial \tau).$$



1, 2 - диференціальна термопара; 3 - термопара; 4 - електронний потенціометр; 5 - КЕП12У; 6 - потенціометр ПП63; 7 - автотрансформатор; 8 - трансформатор; 9 - технічні ваги; 10 - пластина; 11, 12 - тигельні печі; 13 - металева коробка з водяним охолодженням; 14 - зразок

Рисунок 2.4 – Схема експериментальної установки для дослідження тепло- та масообміну в процесі випалу

В даній установці використовується методика автоматичного запису диференціальних кривих нагрівання модельних зразків.

Запис кривих нагрівання проводилася в процесі дослідження на спеціальній установці, зображеній на рисунку 2.4. У неї входять дві

однотипні електричні тигельні печі (11, 12) з внутрішнім діаметром  $100 \cdot 10^{-3}$  м і глибиною тигля  $200 \cdot 10^{-3}$  м з відкритою електричною спіраллю потужністю 2.5 кВт.

Для вирівнювання температури в робочій камері, в піч вставляються вогнетривкі склянки. Так само печі забезпечені автоматичними програмними регуляторами швидкості підйому температури. Харчування печі здійснюється через автотрансформатор (7) за заданим режимом за допомогою КЕП12У (5).

На початку роботи вручну по автотрансформатору на вихід дається напруга  $U_{\text{нач}}$ , величина якого залежить від обраного режиму і контролюється по вольтметру (V2). Вибір режиму заснований на вирішенні завдань нагріву тіла, температура якого змінюється за лінійним законом (нагрівання з постійною швидкістю).

Изотермічна витримка в печах здійснювалася за допомогою електронного потенціометра (4). Для усунення впливу коливань напруги в мережі на режим роботи установки харчування, напруга, що надходить на регулюючий автотрансформатор (7), подавалося з мережі через трансформатор (8), який контролюється за допомогою вольтметра (V1).

Для вивчення кінетики втрати маси досліджуваних модельних зразків застосовано спеціально сконструйований пристрій на основі технічних терезів (9). У зразок циліндричної форми містилися гарячі спаї двох диференціальних платино-платинородієвих термопар, як це показано на рисунку 2.4.

Однією диференціальної термопарою вимірювалася різниця температури середовища печі і поверхні зразка, інший - різниця температури середовища печі і центру зразка, а третій - температури середовища в печі. Нагрівання циліндрика з вмонтованими в нього термопарами проводився в електричній печі експериментальної установки по суворому тепловому режиму. Кінці термопар підключалися до потенціометрів ПП63 (6), і їх свідчення після початку нагрівання зразка записувалися через кожні п'ять

хвилин. Для отримання кривих масообміну досліджуваний зразок після зважування підвішувався до лівої чашці ваг за допомогою дротяної (нихромової) кошики і опускався в робочу камеру тигельної печі. Потім ваги врівноважувалися. До правій чашці терезів підвішувалася занурена в воду пластина (10), а для усунення впливу теплового потоку між вагами і піччю встановлена металева коробка з водяним охолодженням (13).

При заданому режимі нагріву, що відповідає постановці наших завдань, рішення рівняння перенесення тепла має наступний вигляд,  $\text{м}^2/\text{с}$

$$a_e = vR^2 / \Gamma(t_{\text{п}} - t_{\text{ц}});$$

$$c_e = \lambda / a_e \gamma_0,$$

де  $a_e$  – ефективний коефіцієнт теплопровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$c_e$  – ефективна теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$v$  - швидкість нагріву середовища в печі,  $\text{с}$ ;

$R$  - радіус зразка,  $\text{м}$ ;

$\Gamma$  - постійна (для необмеженого циліндра - 4, для необмеженої пластини - 3, для кулі - 6);

$t_{\text{п}}$  – температура поверхні тіла,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{ц}}$  – температура центру тіла,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$\gamma_0$  – щільність обпаленого зразка,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

## 2.2 Побудова залежності теплопровідності від температури термообробки та хімічного складу

Вогнетриви, які відносяться до класу "Алюмосилікатні", основна хімічна складова яких є  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{SiO}_2$ , мають багато різних вивів продукції. Хімічний склад значно впливає на коефіцієнт теплопровідності. Також одним

з важливих факторів, що впливає на коефіцієнт теплопровідності, є температура обробки виробу та вогнетривкість матеріалу.

Було проаналізовано багато літератури щодо вогнетривів даного класу, виключені грубі помилки ряду. Вибрані дані зведені у таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Температура обробки, хімічний склад, вогнетривкість та коефіцієнт теплопровідності алюмосилікатів

$t_{обр}, ^\circ\text{C}$	$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$	$\text{SiO}_2, \%$	$t_{вогн}, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	Посилання
1500	40	50	1740	1,06	[28]
1500	35	55	1730	1	[28]
1500	30	59	1570	1	[28]
1500	30	59	1680	1	[28]
1500	40	50	1570	1,06	[28]
1500	35	55	1580	1	[28]
1500	30	64	1580	1	[28]
1500	20	64	1600	1	[28]
1500	62	34	1600	1,39	[28]
1500	70	28	1700	1,32	[28]
1500	53	40	1770	1,03	[2]
1500	62	31	1790	1,03	[2]
1500	72	22	1790	1,18	[2]
1500	77	17	1820	1,28	[2]
1500	39,64	55,98	1730	1,06	[29]
1500	31,78	65,04	1680	0,96	[29]
1500	35,06	56,06	1720	1,03	[29]
1500	40,29	57,06	1760	1,06	[29]
1500	33,82	58,96	1670	1,05	[29]
1500	36,25	57,62	1690	1,06	[29]
1500	31,7	61,32	1670	0,96	[29]
1500	32,9	62,24	1700	0,94	[29]
1500	36,88	56,92	1720	1,06	[29]
1500	36,01	58,04	1690	1,06	[29]
1400	17,21	69,42	1670	0,84	[29]
1400	27,08	69,51	1670	0,92	[29]
1400	26,31	67,16	1580	0,94	[29]
1400	25,76	70,16	1670	0,93	[29]
1400	26,89	67,56	1690	0,92	[29]
1400	24,79	69,68	1670	0,82	[29]
1400	30,93	63,84	1680	0,81	[29]



За даними таблиці побудовані графіки залежностей хімічного складу та вогнетривкості від коефіцієнта теплопровідності.

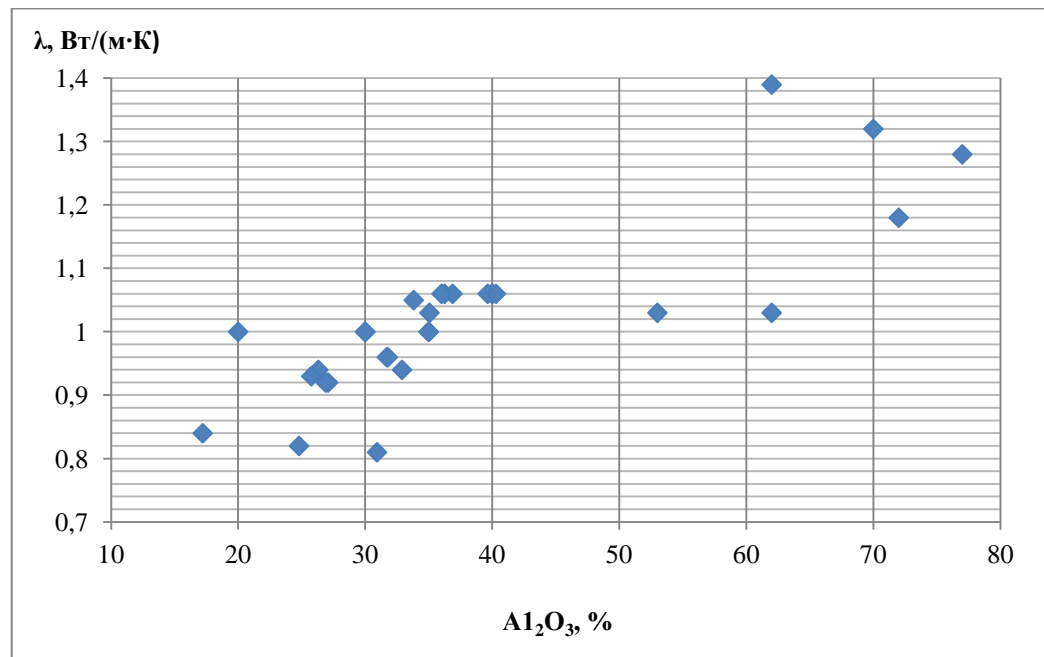


Рисунок 2.5 – Залежність  $\lambda$ , Вт/(м·К), від  $Al_2O_3$ , %

З графіку видно, що найбільше значень коефіцієнту теплопровідності знаходиться у межах (0,92...1,06) Вт/(м·К), при цьому вміст  $Al_2O_3$  – у межах (20...62) %. Вироби з таким вмістом  $Al_2O_3$ , згідно таблиці 1.1, належать до груп напівкислі, шамотні та мулліто-кремнеземісті. Найбільш значень у межах (25...36) %, ці вироби входять у групи напівкислі та шамотні. Менш всього зустрічаються данні з мулліто-кремнеземістої групи (всього два значення). До муллінової групи належать три значення з коефіцієнтом теплопровідності у межах (1,18...1,39) Вт/(м · К). до муллітокорундової групи належить лише одне значення з коефіцієнтом теплопровідності 1,28 Вт/(м · К).

Також можна спостерігати, що найбільші значення коефіцієнту теплопровідності в виробах з великим вмістом  $Al_2O_3$ , а найменші – з малим вмістом  $Al_2O_3$ . Тобто вміст  $Al_2O_3$  значно впливає на коефіцієнт теплопровідності.

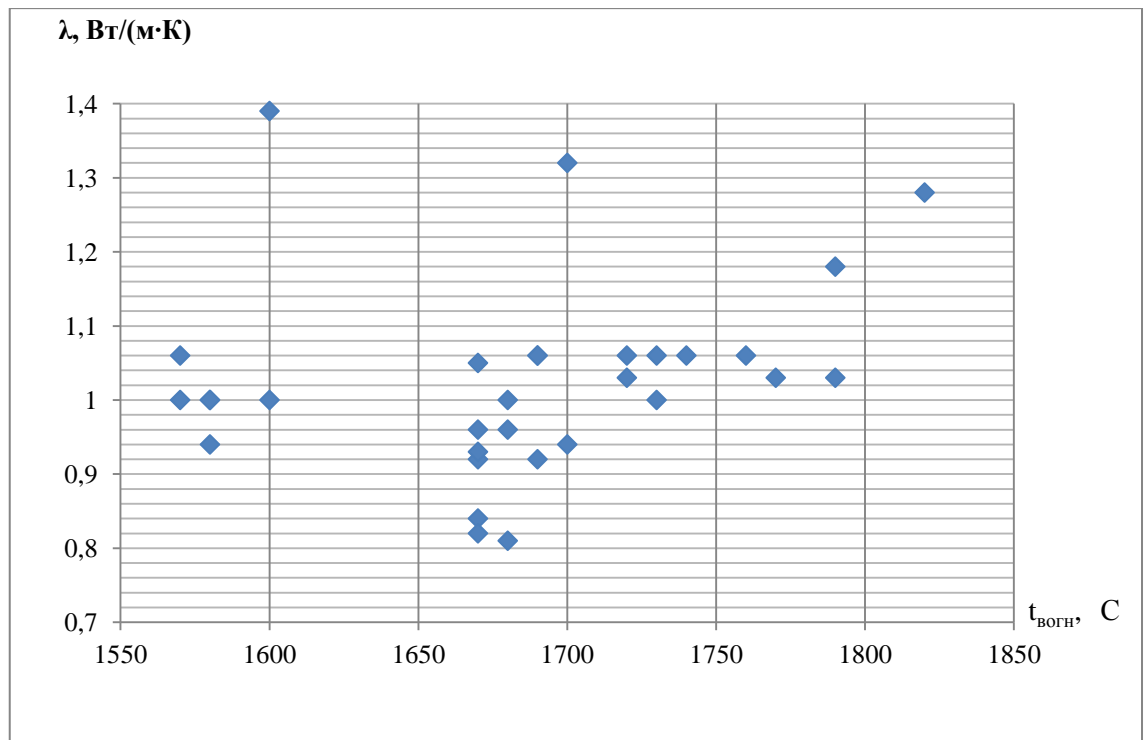


Рисунок 2.6 – Залежність  $\lambda$ , Вт/(м·К), від  $t_{\text{вогн}}$ , °С

З графіку видно, що найбільше значень коефіцієнту теплопровідності щодо вогнетривкості знаходиться у межах (0,81...1,06) Вт/(м·К), при цьому значення  $t_{\text{вогн}}$  знаходиться у межах (1670...1790) °С. Найбільше значення коефіцієнту теплопровідності спостерігається при відносно невеликій температурі вогнетривкості. Значенню коефіцієнту теплопровідності, яке трохи менш ніж максимальне, відповідає велика температура вогнетривкості. Тобто не можна провести точну залежність значень коефіцієнта теплопровідності від температури вогнетривкості.

### 2.3 Знаходження оптимальних теплофізичних характеристик цегли

Для отримання оптимальних значень теплофізичних характеристик цегли була застосована програма STATISTICA 10. Для аналізу були взяті дані з таблиці 2.2.

В програмі STATISTICA 10 у вкладці «Анализ» обирається команда «Планирование эксперимента» - «Центральные композиционные планы, планы для поверхностей» (рисунок 2.6) [30].

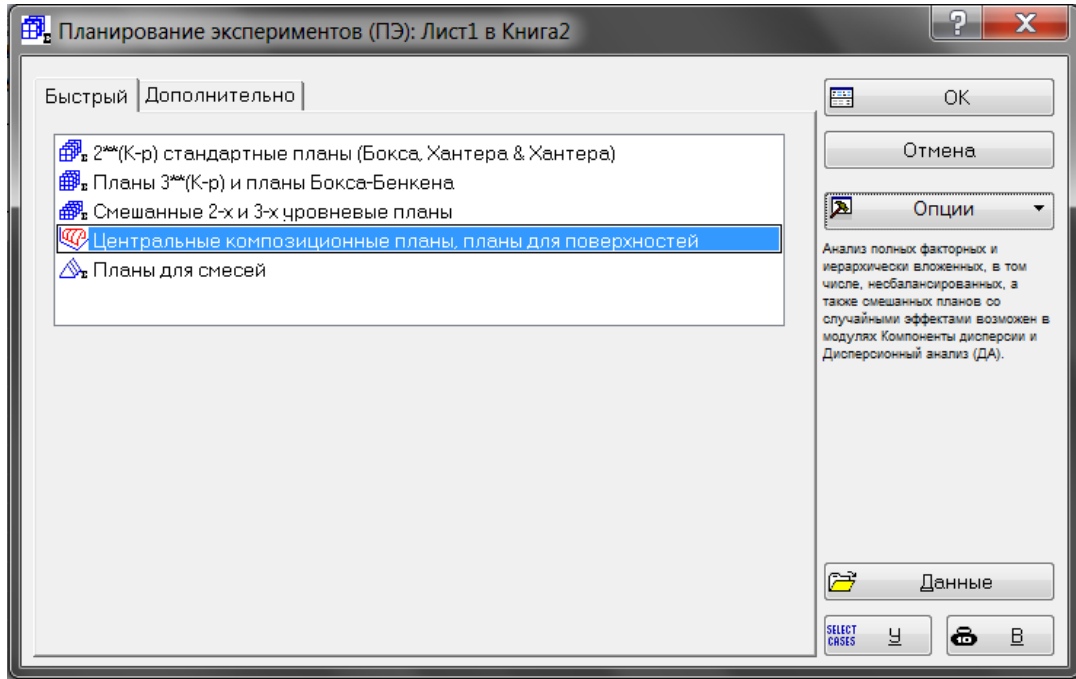


Рисунок 2.6 – Вибір метода аналізу даних

У вікні «Анализ плана» обираємо змінні: залежні змінні це вогнетривкість на коефіцієнт теплопровідності, незалежні змінні (фактори) – це температура обробки та хімічний склад вогнетриву (рисунок 2.7).

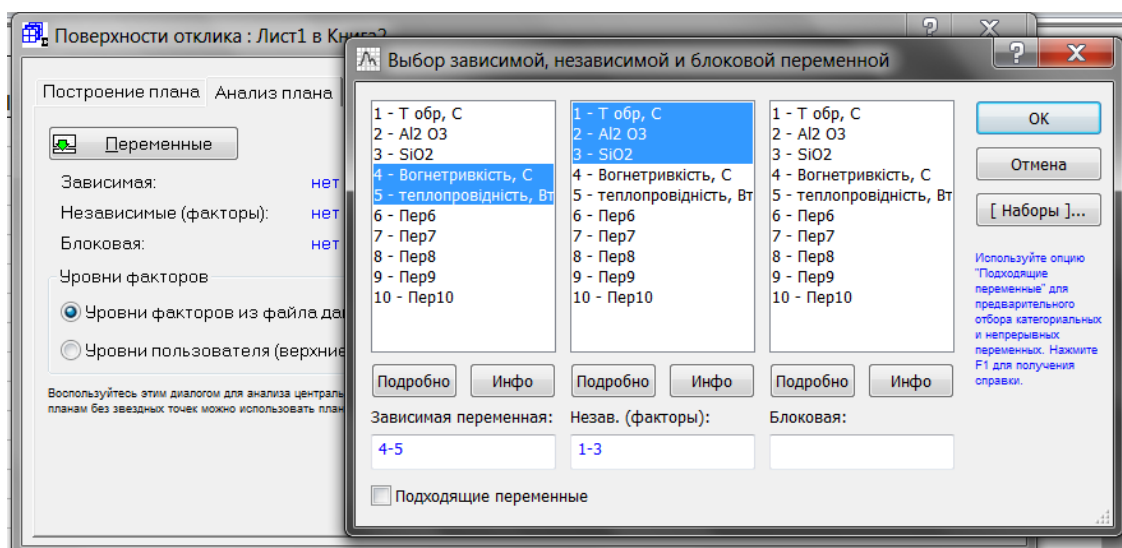


Рисунок 2.7 – Вибір залежних та незалежних змінних

У вікні, що з'явилося, обираємо вкладку «Дисперсионный анализ/Эффекты». Тут можна змінити довірчий інтервал та альфа (рівень виділення). Вкладка «Дисперсионный анализ/Эффекты» зображена на рисунку 2.8.

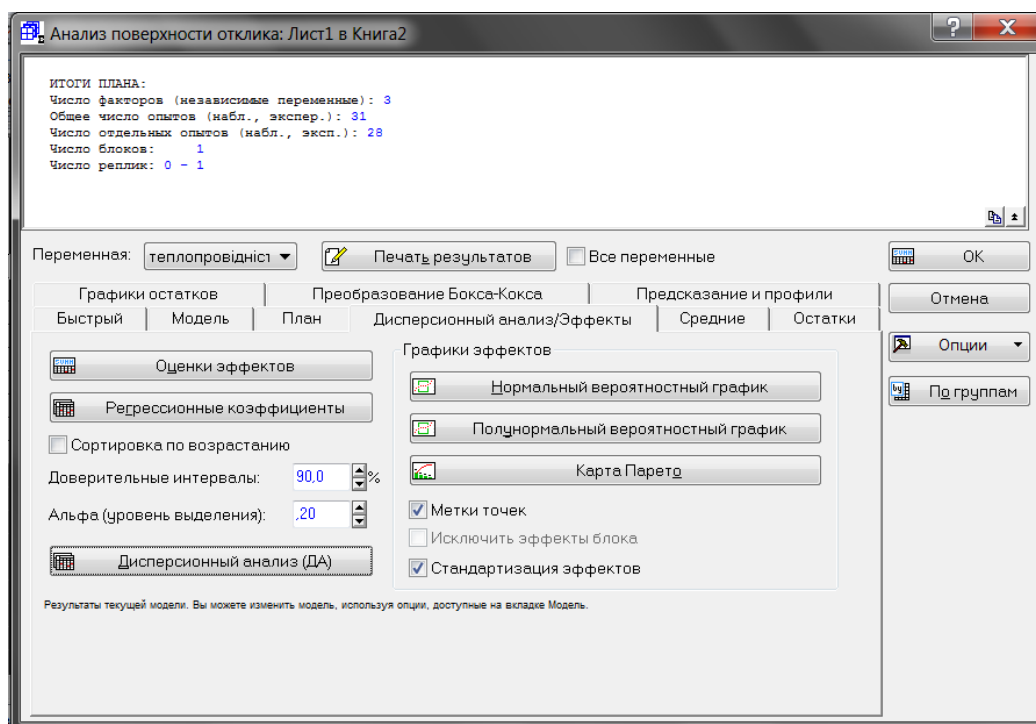


Рисунок 2.8 – Вкладка «Дисперсионный анализ/Эффекты»

Довірчий інтервал визначає обчислювані довірчі інтервали для всіх відповідних опцій. Обраний довірчий інтервал становить 90%.

Альфа (рівень виділення) визначає критерій статистичної значущості для всіх відповідних опцій діалогового вікна. Обраний альфа становить 0,2. В таблиці «Регрессионные коэффициенты» виділяються значення, що входять в рівень 0,2 (дані виділені червоним кольором). Виділені коефіцієнти використовуються у рівнянні регресії.

Регресійне рівняння було обрано з лінійним, квадратичним та парним коефіцієнтом.

Таблиця 2.3 – Коефіцієнти регресії вогнетривкості

	Регрес. Коеф.	Ст.Пом.	t(22)	p	-90,% Дов. межа	+90,% Дов. межа
Серед/Вільн.член	44584,94	27815,97	1,60285	0,123229	-3179,11	92348,98
(1) $t_{обр}$ , °C (L)	-17,74	13,43	-1,32115	0,200029	-40,80	5,32
(2) $Al_2O_3$ (L)	-565,33	344,40	-1,64151	0,114911	-1156,71	26,05
$Al_2O_3$ (K)	1,21	1,21	0,99723	0,329497	-0,87	3,30
(3) $SiO_2$ (L)	-687,72	451,44	-1,52339	0,141907	-1462,91	87,47
$SiO_2$ (K)	2,44	1,65	1,47520	0,154328	-0,40	5,28
1L на 2L	0,19	0,11	1,77762	0,089294	0,01	0,37
1L на 3L	0,19	0,17	1,13471	0,268709	-0,10	0,48
2L на 3L	3,62	2,86	1,26604	0,218741	-1,29	8,53

Рівняння вогнетривкості у закодованому виді мають наступний вид

$$t_{\text{вогн}} = 44584,94 - 565,33 \cdot X_2 - 687,72 \cdot X_3 + 2,44 \cdot X_3^2 + 0,19 \cdot X_1 \cdot X_2.$$

Аналіз розрахункової формули вогнетривкості показує, що вогнетривкість прямопропорційно залежить від температури обробки матеріалу через парні коефіцієнти.  $SiO_2$  лежить у межах (0...1), тому добуток  $2,44 \cdot (SiO_2)^2$  має невелике значення та не впливає на кінцевий результат. Коефіцієнт при  $SiO_2$  в першій ступені на порядок більше, ніж при  $(SiO_2)^2$ , тому ефективний коефіцієнт теплопровідності залежить від  $SiO_2$

прямолинійно. Оксид алюмінію прямолинійно впливає на вогнетривкість, при його збільшенні ефективний коефіцієнт теплопровідності зменшується.

Таблиця 2.4 – Коефіцієнти регресії коефіцієнту теплопровідності

	Регрес. Коэф.	Ст.Пом.	t(22)	p	-90,% Дов. межа	+90,% Дов. межа
Серед/Вільн.член	-60,6419	27,31678	-2,21995	0,037038	-107,549	-13,7350
(1) $t_{обр}$ , °C (L)	0,0318	0,01319	2,40923	0,024799	0,009	0,0544
(2) $Al_2O_3$ (L)	0,4940	0,33822	1,46064	0,158249	-0,087	1,0748
$Al_2O_3$ (K)	-0,0006	0,00119	-0,48114	0,635168	-0,003	0,0015
(3) $SiO_2$ (L)	0,9326	0,44334	2,10355	0,047076	0,171	1,6939
$SiO_2$ (K)	-0,0023	0,00162	-1,39232	0,177742	-0,005	0,0005
1L на 2L	-0,0002	0,00010	-1,86475	0,075613	0,000	0,0000
1L на 3L	-0,0004	0,00016	-2,33165	0,029277	-0,001	-0,0001
2L на 3L	-0,0028	0,00281	-0,98714	0,334308	-0,008	0,0021

Рівняння коефіцієнту теплопровідності у закодованому виді мають наступний вид.

$$\lambda_{эф} = -60,6419 + 0,0318 \cdot X_1 + 0,4940 \cdot X_2 + 0,9326 \cdot X_3 - 0,0023 \cdot X_3^2 - 0,0002 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0004 \cdot X_1 \cdot X_3.$$

Ефективний коефіцієнт теплопровідності лінійно залежить від температури обробки та оксиду алюмінію.  $SiO_2$  лежить у межах (0...1), тому добуток  $0,0023 \cdot (SiO_2)^2$  має невелике значення та не впливає на кінцевий результат. Коефіцієнт при  $SiO_2$  в першій ступені на порядок більше, ніж при  $(SiO_2)^2$ , тому ефективний коефіцієнт теплопровідності залежить від  $SiO_2$  теж лінійно.

За таблиць видно, що більшість отриманих даних входить у довірчий інтервал 0,2. Це свідчить про те, що відносна похибка отриманих достатня та не перевищує 20 %.

Для обох випадків матриця планування має наступний вигляд.

Таблиця 2.5 – Матриця планування експерименту

№ експер.	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	t <sub>вогн</sub> , °C	λ <sub>еф</sub> , Вт/(м·К)
1	1	1	1	43334,52	-59,19
2	1	-1	1	44464,80	-60,17
3	-1	1	1	43334,14	-59,25
4	-1	-1	1	44465,18	-60,24
5	1	1	-1	44709,96	-61,05
6	1	-1	-1	45840,24	-62,04
7	-1	1	-1	44709,58	-61,11
8	-1	-1	-1	45840,62	-62,10

Розкодовані фактори мають значення, зведені у таблицю 2.6.

Таблиця 2.6 – Фактори для проведення експерименту

Фактор	Код	Рівні факторів			
		-1	0	+1	Δ
t <sub>обр</sub> , °C	X <sub>1</sub>	1400	1450	1500	50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	X <sub>2</sub>	17,2	47,1	77	29,9
SiO <sub>2</sub> , %	X <sub>3</sub>	7	38,58	70,16	31,58

Рівняння у розкодованому виді мають наступний вигляд:

- для температури вогнетривкості

$$t_{\text{вогн}} = 44584,94 - 565,33 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 687,72 \cdot \text{SiO}_2 + 2,44 \cdot (\text{SiO}_2)^2 + 0,19 \cdot t_{\text{обр}} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3.$$

- для коефіцієнту теплопровідності

$$\lambda_{\text{еф}} = -60,6419 + 0,0318 \cdot t_{\text{обр}} + 0,4940 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,9326 \cdot \text{SiO}_2 - 0,0023 \cdot (\text{SiO}_2)^2 - 0,0002 \cdot t_{\text{обр}} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 0,0004 \cdot t_{\text{обр}} \cdot \text{SiO}_2.$$

Таблиця 2.7 – Розкодовані дані

№ експер.	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	t <sub>вогн</sub> , °C	λ <sub>еф</sub> , Вт/(м·К)
1	1500,00	77,00	7,00	18305,05	4,21
2	1500,00	17,20	7,00	35068,78	-7,39
3	1400,00	77,00	7,00	16842,05	2,85
4	1400,00	17,20	7,00	34741,98	-9,95
5	1500,00	77,00	70,16	-13240,19	14,01
6	1500,00	17,20	70,16	3523,55	2,41
7	1400,00	77,00	70,16	-14703,19	15,18
8	1400,00	17,20	70,16	3196,75	2,38

За допомогою програми розраховуємо дисперсійний аналіз для температури вогнетривкості та коефіцієнту теплопровідності. У таблиці літерами SS позначається «Сума квадратів», MS – середній квадрат ефекту. За допомогою MS ефекту перевіряється значущість дисперсного аналізу: MS ефект даних порівнюється з MS ефектом помилки. F – критерій Фішера. Дані дисперсного аналізу зведені у таблицях 2.8 та 2.9.

Таблиця 2.8 – Дисперсний аналіз при вогнетривкості

Фактор	SS	сс	MS	F	p
(1) t <sub>обр</sub> , °C (L)	187,5	1	187,50	0,053868	0,818609
(2) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (L)	9818,7	1	9818,74	2,820895	0,107192
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (K)	3461,4	1	3461,45	0,994463	0,329497
(3) SiO <sub>2</sub> (L)	10041,6	1	10041,64	2,884935	0,103512
SiO <sub>2</sub> (K)	7574,8	1	7574,80	2,176217	0,154328
1L на 2L	10998,9	1	10998,88	3,159946	0,089294
1L на 3L	4481,7	1	4481,67	1,287571	0,268709
2L на 3L	5579,1	1	5579,09	1,602857	0,218741
Ошибка	76575,8	22	3480,72		
Общая SS	138477,4	30			



Таблиця 2.9 – Дисперсний аналіз при коефіцієнту теплопровідності

Фактор	SS	сс	MS	F	p
(1) $t_{обр}$ , °C (L)	0,015360	1	0,015360	4,575776	0,043776
(2) $Al_2O_3$ (L)	0,031139	1	0,031139	9,276170	0,005931
$Al_2O_3$ (K)	0,000777	1	0,000777	0,231495	0,635168
(3) $SiO_2$ (L)	0,028576	1	0,028576	8,512455	0,007976
$SiO_2$ (K)	0,006508	1	0,006508	1,938542	0,177742
1L на 2L	0,011673	1	0,011673	3,477285	0,075613
1L на 3L	0,018250	1	0,018250	5,436574	0,029277
2L на 3L	0,003271	1	0,003271	0,974442	0,334308
Ошибка	0,073852	22	0,003357		
Общая SS	0,498774	30			

У вкладці «Предсказание и профили» обираємо вкладку «Профили отклика желательности».

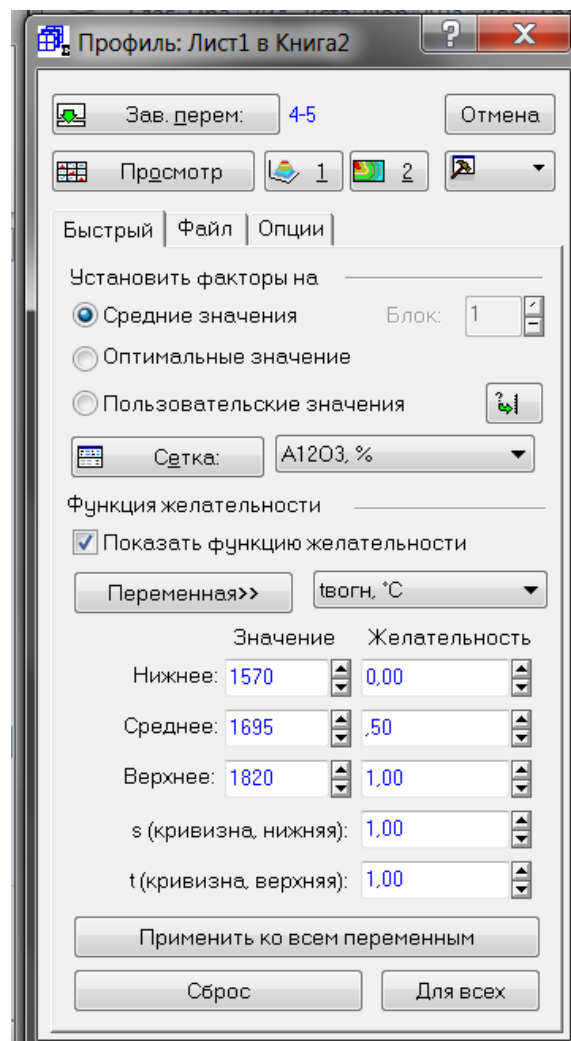


Рисунок 2.9 – Діалогове вікно «Профиль»

Обираємо команду «2», що дає контурні графіки бажаності для парних незалежних змінних, які зображені на рисунку 2.10.

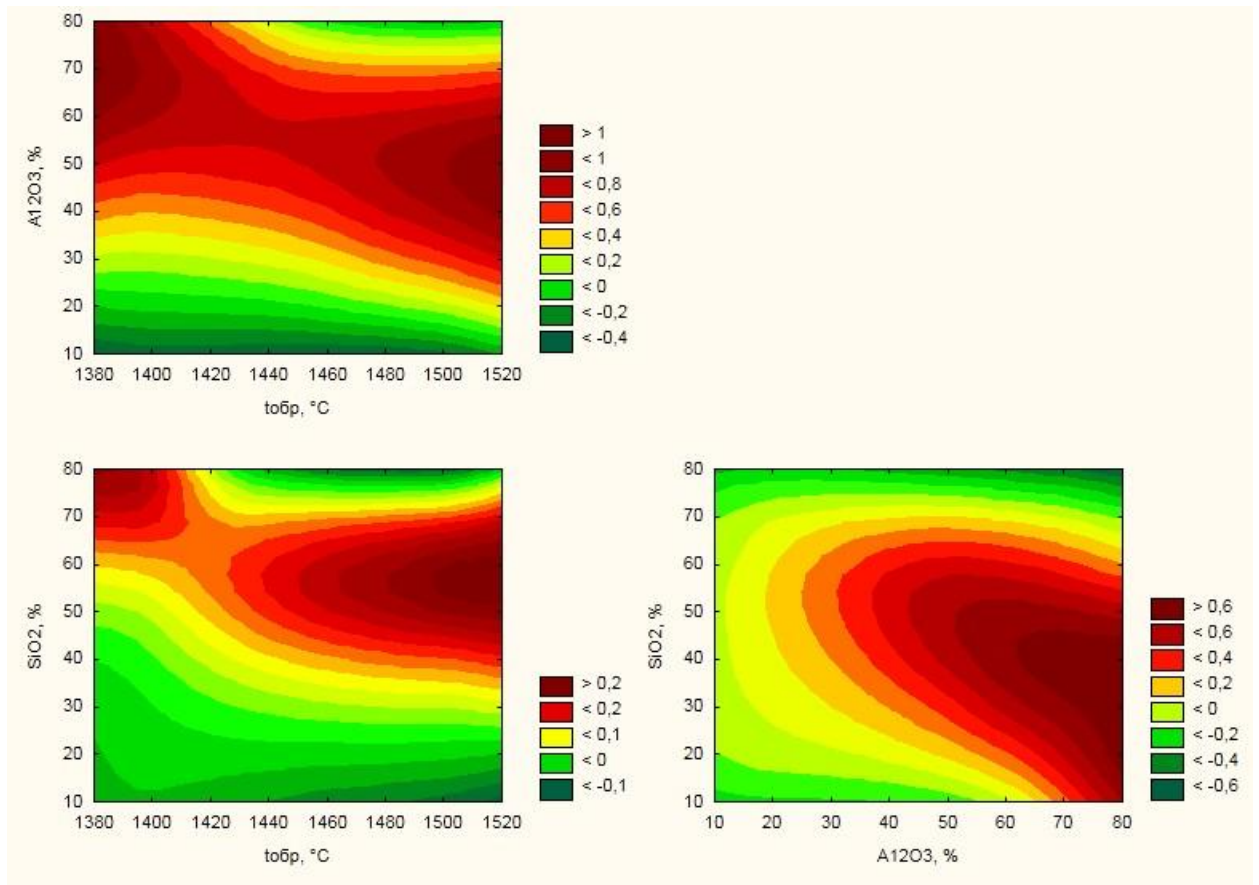


Рисунок 2.10 – Контурні графіки бажаності для парних незалежних змінних

На рисунку 2.10 зображені контурні графіки бажаності для парних незалежних змінних. Поруч з графіками зображені легенди, різні кольори яких відповідають будь якій вірогідності появи одних даних щодо інших. При значенні 0 спостерігається небажані значення, при значенні 1 дуже бажані значення.

На контурному графіку парних значень Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % та t<sub>обр</sub>, °C бажані значення Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> спостерігаються у межах (40...65) % при всьому діапазоні температур. Більш вірогідні значення Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (60...80) % при мінімальній t<sub>обр</sub>, (1380...1400) °C та при значенні Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (40...60) % при максимальній t<sub>обр</sub>,

(1500...1520) °C. При великих значеннях  $Al_2O_3$  (70...80) % та максимальній  $t_{обр}$ , (1460...1520) °C спостерігається найменш вірогідні значення.

Також мінімальну вірогідність значень при максимальному значенні  $t_{обр}$ , °C можна спостерігати на парному графіку  $SiO_2$ , % та  $t_{обр}$ , °C. Це пов'язано з хімічним перетворенням кристалічної решітки виробу у цих діапазонах.

На контурному графіку парних значень  $Al_2O_3$ , % та  $SiO_2$ , % найбільша вірогідність значень спостерігається при максимальному значенні  $Al_2O_3$  (60...80) % та при мініимальному значенні  $SiO_2$  (20...40) %.

У вікні «Профили отклика желательности» обираємо команду «Просмотр», далі відбувається розрахунок даних, за якими будуються графіки.

Таблиця 2.10 – Дані для побудови графіків залежності  $t_{вогн}$ , °C, від незалежних змінних

	Фактор Уровень	Предск. $t_{вогн}$ , °C	-90,% $t_{вогн}$ , °C	+90,% $t_{вогн}$ , °C
$t_{обр}$ , °C	1400	1692,621	1431,526	1953,717
$t_{обр}$ , °C	1425	1687,765	1492,562	1882,968
$t_{обр}$ , °C	1450	1682,909	1553,049	1812,769
$t_{обр}$ , °C	1475	1678,052	1611,349	1744,756
$t_{обр}$ , °C	1500	1673,196	1643,845	1702,547
$Al_2O_3$ , %	17,21	2183,172	1283,640	3082,705
$Al_2O_3$ , %	32,158	1713,611	1612,564	1814,657
$Al_2O_3$ , %	47,105	1785,011	1588,264	1981,759
$Al_2O_3$ , %	62,053	2397,374	1163,175	3631,574
$Al_2O_3$ , %	77	3550,700	341,573	6759,827
$SiO_2$ , %	17	5203,749	1114,932	9292,565
$SiO_2$ , %	30,29	3169,639	1435,095	4904,183
$SiO_2$ , %	43,58	1996,896	1608,394	2385,397
$SiO_2$ , %	56,87	1685,519	1630,561	1740,476
$SiO_2$ , %	70,16	2235,508	1561,479	2909,537

Таблиця 2.11 – Дані для побудови графіків залежності  $\lambda$ , Вт/(м·К), від незалежних змінних

	Фактор Уровень	Предск. $\lambda$ , Вт/(м·К)	-90,% $\lambda$ , Вт/(м·К)	+90,% $\lambda$ , Вт/(м·К)
$t_{обр}$ , °С	1400	0,70367	0,44726	0,960081
$t_{обр}$ , °С	1425	0,78986	0,59816	0,981561
$t_{обр}$ , °С	1450	0,87605	0,74852	1,003580
$t_{обр}$ , °С	1475	0,96224	0,89673	1,027747
$t_{обр}$ , °С	1500	1,04843	1,01961	1,077254
$Al_2O_3$ , %	17,21	0,42019	-0,46320	1,303581
$Al_2O_3$ , %	32,158	0,86231	0,76308	0,961542
$Al_2O_3$ , %	47,105	1,04811	0,85489	1,241324
$Al_2O_3$ , %	62,053	0,97759	-0,23446	2,189639
$Al_2O_3$ , %	77	0,65075	-2,50078	3,802286
$SiO_2$ , %	17	-2,73313	-6,74857	1,282308
$SiO_2$ , %	30,29	-0,69413	-2,39754	1,009286
$SiO_2$ , %	43,58	0,54649	0,16496	0,928021
$SiO_2$ , %	56,87	0,98873	0,93476	1,042704
$SiO_2$ , %	70,16	0,63259	-0,02934	1,294526

На основі отриманих даних збудовані графіки, на яких також позначена допустима ймовірність 90 %.

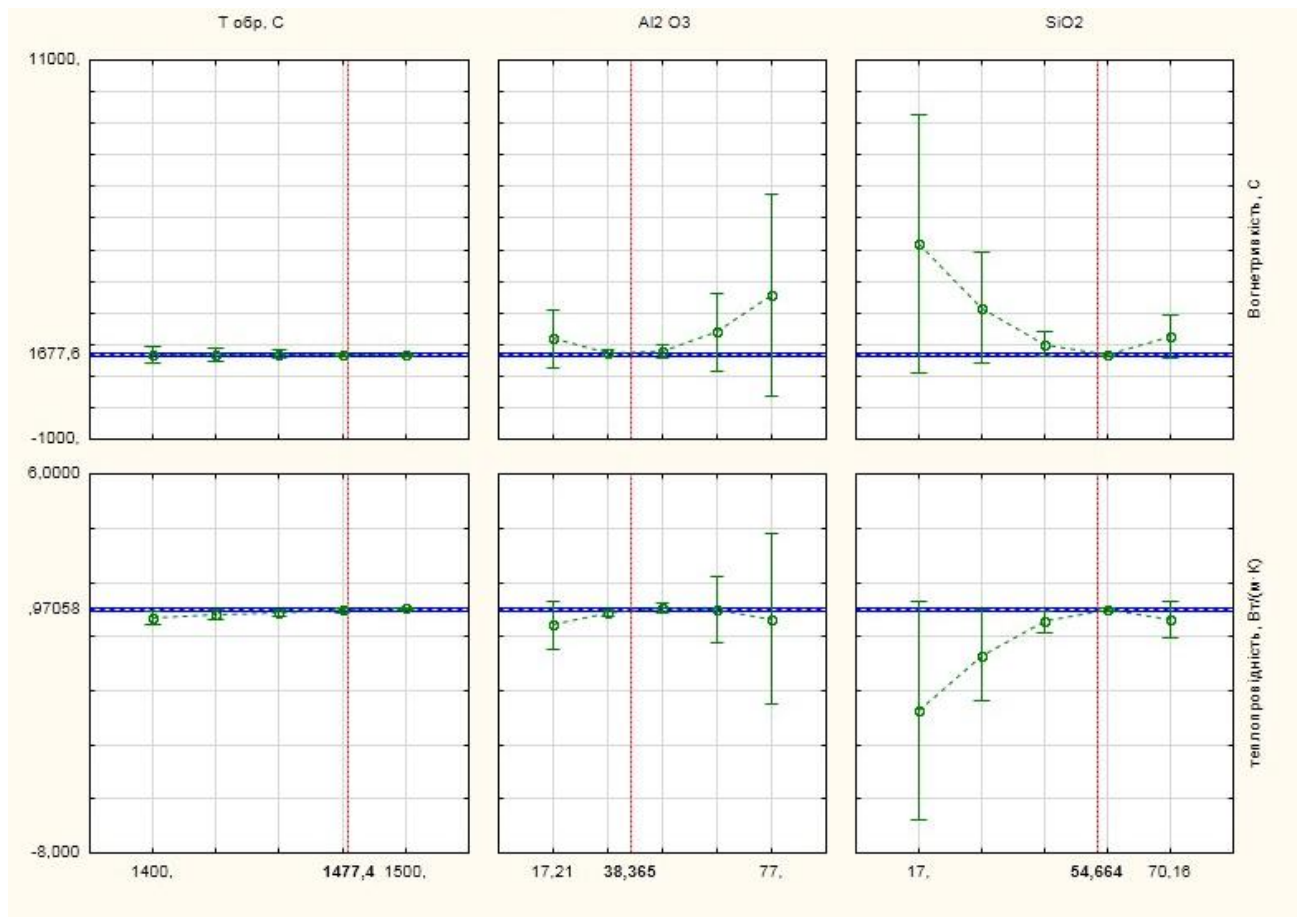


Рисунок 2.11 – Графіки залежності вогнетривкості та теплопровідності від температури обробки та хімічного складу

За допомогою графіків визначаємо оптимальні значення для всіх факторів:  $t_{обр}=1477,4$  °C,  $t_{вогн}=1677,6$  °C,  $\lambda=0,97$  Вт/(м·К), вміст Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> дорівнює 38,36 %, вміст SiO<sub>2</sub> дорівнює 54,66 %. З першого ряду графіків ( $t_{вогн}$ ) видно, що  $t_{вогн}$  – це одне з найменших значень, які є на графіку. Значення  $\lambda$  навпаки – одно з найбільших.

За допомогою програми були обчислені регресійні коефіцієнти, які використовуються для складання регресійного рівняння. Для рівняння обирається тільки ті коефіцієнти, що мають заданий критерій статистичної значущості. Також за допомогою програми були отримані графіки, за допомогою яких визначаються оптимальні характеристики для вогнетривів. Контурні графіки показують бажаність даних для незалежних змінних.

### **3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

#### **3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів**

Виробництво починається з вивантаження та дрібнення матеріалу. Дрібнення приводиться за допомогою дробильних машин. Для того, щоб перешкоджати викиди кусків матеріалу, завантажувальні отвори щокочових дробарок повинні мати суцільні бокові захисні засоби висотою не менш 1 м.

Подрібнений матеріал подається на подальше виробництво за допомогою бігунів. Механізм повинен вмикатися тільки тоді, коли всередині немає людей та після перевірки кріплення деталей. Прямки помольних бігунів повинні мати захисні засоби по периметру у вигляді поручнів висотою не менше 1 м і обладнані сходами [31].

Матеріал подається на грохочення (розділення за крупністю) та дозування. Для того, що не призвести до втрати слуху у працівників, грохоти встановлюють у звукоізолюючих кімнатах чи окремих приміщеннях. По всій ширині завантажувальних і розвантажувальних воронок грохотів повинні бути встановлені захисні екрани, що попереджають викиди шматків матеріалу. Якщо використовується плоскі грохоти, встановлюють борти для запобігання викидам матеріалу на майданчик обслуговування. Сепаратори, призначені для дозування матеріалу, повинні бути з оглядовими вікнами, виконаними з небиткого скла та забезпечені пристроями, що виключають їх випадкове відкривання.

Змішання матеріалу приводиться у закритих машинах, що знижує рівень запилення у приміщенні. Всі операції, пов'язані з подачею маси для формування, транспортування виробів на сушку і випалення, зніманням виробів з пресів, укладанням їх на пічні вагонетки і ін. На що будуються або реконструюються підприємствах повинні бути механізовані. Присутність людей у операціях заборонено.

На території підприємства не допускаються відкриті і необгороджені ями, канави, колодязі, траншеї. Всі вони повинні мати огорожі висотою не менше 1 м, а в нічний час - освітлені.

### 3.2 Заходи з поліпшення умов праці

При роботі машин з дрібнення виділяється пил, який потрібно видаляти. Для цього застосовується вентиляційна витяжка. Для зменшення пилоосадження у повітропроводах аспіраційних систем слід прокладати їх за можливістю з нахилом не менше 45°. Ремонт і очищення вентиляційних пристроїв в цехах, які перероблюють матеріали, що створюють пил, повинні здійснюватися з використанням засобів захисту органів дихання [32].

На ділянках, де робітники наражатимуться на інтенсивний вплив тепла (при роботі поблизу топків, завантаженні і розвантаженні печей тощо), повинні застосовуватися душируючі установки, екрани та інші пристрої для захисту від теплових випромінювань відповідно до чинних норм.

Вентилятори, димососи, повітродувки, рівні шуму яких перевищують допустимої норми, повинні бути вміщені у звукоізовольовані камери або звукоізовольовані укриття (кожухи), бути обладнані глушниками шуму з боку всмоктування і нагнітання, мати засоби віброізовольованості, що запобігають передачі вібрацій трубопроводам і фундаментам.

Дробарки, млини, грохоти, вібраційні пресові установки та інше гучне устаткування повинні бути оснащені засобами зниження шуму або розміщені у звукоізовольованих боксах або відокремлені звукоізовольованими перегородками чи екранами.

### 3.3 Виробнича санітарія

Нормальні санітарно-гігієнічні умови праці в вогнетривкому виробництві повинні забезпечуватися:

- застосуванням при проектуванні та будівництві машин, устаткування і технологічних процесів, що утворюють найменшу кількість виробничих шкідливостей;
- розробкою під час проектування найбільш раціональних схем розміщення устаткування і машин, вибором і розрахунком необхідних засобів (будівельні рішення, кожухи, віброізоляція, аспірація, вентиляція, тощо), що забезпечують умови праці, відповідні до санітарно-гігієнічних норм;
- додержанням правил і умов експлуатації машин і ведення технологічних процесів відповідно до призначення і режимів, що передбачені нормативно-технічною документацією;
- підтримкою технічного стану машин і параметрів технологічних процесів на рівні, що передбачений нормативно-технічною документацією;
- системою організації праці та профілактичних засобів на конкретних робочих місцях, що попереджують (ослаблюють) несприятливий вплив шкідливих виробничих факторів.

Температура повітря усередині міжцехових опалювальних галерей повинна бути в межах (5...10) °С (при вологому прибиранні, в інших випадках +5 °С).

В приміщеннях більшого обсягу рекомендується повітряне опалення, суміщене з припливною вентиляцією або комбіноване.

Опалення приміщень виробництва волокнистих теплоізоляційних матеріалів і виробів з них повинне бути повітряним, суміщеним з припливною вентиляцією. Застосування місцевих нагрівальних приладів і рециркуляції повітря для вентиляції та повітряного опалення забороняється.

### 3.4 Електробезпека

Всі особи, які обслуговують електроустановки, повинні бути навчені способам надання першої допомоги при ураженні електричним струмом. На



роботах, пов'язаних з небезпекою ураження електричним струмом, необхідно застосовувати захисні засоби (штанги, кліщі, ізолюючі підставки, інструмент з ізольованими рукоятками, діелектричні рукавички, боти, калоші, килимки і т.д.) [33].

У приміщеннях з великим виділенням пилу електропроводка і електропускового пристрої повинні бути виконані так, щоб забезпечувалася можливість вологого прибирання приміщень.

В електромашинних приміщеннях повинна бути передбачена прибирання пилу з електроустаткування пилососом.

Для захисту людей від ураження електричним струмом та забезпечення безперебійної роботи обладнання в умовах регулярного вологого прибирання приміщень шафи, пульти і пристрої управління (виготовлені промисловістю без захисту від попадання вологи) слід, як правило, розміщувати в окремих приміщеннях.

У випадках розміщення електроустаткування безпосередньо у виробничих приміщеннях слід передбачати заходи для захисту їх від попадання вологи (захисні екрани, перегородки, підставки тощо).

Все неізольовані струмоведучі частини електрообладнання, встановленого поза електричних приміщень, повинні мати суцільні огороження, зняття і відкривання яких можливо тільки за допомогою спеціальних ключів або інструментів.

Для живлення ручних світильників у приміщеннях з підвищеною небезпекою і особливо небезпечних слід застосовувати напругу не вище 42 В. При наявності особливо несприятливих умов, коли небезпека ураження електричним струмом посилюється тіснотою, незручним положенням працюючого, зіткненням з великими металевими, добре заземленими поверхнями (наприклад, робота в котлах, барабанах, газоходах, топках, млинах, бункерах) для живлення ручних світильників слід застосовувати напругу не вище 12 В.

### 3.5 Пожежна безпека

У виробництві вогнетривкої цегли застосовується обертова піч, сушильний барабан та тунельна піч. Для їх використання застосовується у якості палива природний газ. Паливо подається за допомогою трубопроводів.

Усі транспортерні галереї повинні бути обладнані автоматичною пожежною сигналізацією та засобами пожежогасіння. Знову збудовані та реконструйовані транспортні галереї повинні обладнуватися автоматичними системами пожежогасіння. Забороняється застосування пальних (вибухонебезпечних) газів в якості палива та відновного середовища без виконання спеціальних заходів по вибухопожежобезпеці.

Застосовувати відкритий вогонь та палити в приміщеннях витратних ємкостей, насосних та компресорних станцій, а також відігрівати відкритим вогнем труби, арматуру та резервуари мазутного господарства забороняється.

Причинами пожегів можуть стати порушення технологічного режиму, несправність електроустаткування, несправність запірної арматури, конструкційні недоліки устаткування та інше.

Приміщення вогнетривкого виробництва відноситься до категорії Д – виробництва, у яких обробляються негорючі матеріали [34].

Для припинення горіння необхідно домогтися такого зниження температури в зоні реакції, при якій горіння припиниться. Абсолютний межа такої температури називається температурою потухання.

Речовини, що володіють фізико-хімічними властивостями, які дозволяють створити умови для припинення горіння називаються вогнегасними речовинами. Вони повинні відповідати таким вимогам: володіти високим ефектом гасіння при відносно малій їх витраті; бути дешевими, доступними, простими і безпечними у застосуванні; не заподіювати шкоди людям, тваринам, матеріалам, предметам та навколишньому середовищу. [35]

У процесі гасіння пожежі умови потухання створюються: охолодженням зони горіння або палаючого речовини (використовують суцільні або розпорошені струменя води), ізоляцією реагуючих речовин від зони горіння (ізоляцією піни, створенням розривів в палаючому речовині); розведенням реагуючих речовин (використовують негорючі пари і газы, тонкорозпиленою водою) і хімічним гальмуванням реакції горіння (за допомогою вогнегасних порошоків). У практиці гасіння пожежі найчастіше використовують поєднання наведених принципів. [36]

Стаціонарні установки для тушіння палива представляють собою нерухомо змонтовані апарати, трубопроводи та обладнання, які призначаються для подачі вогнегасних речовин до місць загорання. Такі установки можуть бути автоматичними або дистанційними. Автоматичні установки при виникненні пожежі приводяться в дію відповідним датчиком, а дистанційні - людьми. Як вогнегасна речовина в стаціонарних установках пожежогасіння застосовуються: вода, піна, порошок. [35]

### 3.6 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Для захисту робітники цехів вогнетривкого виробництва мають бути забезпечені спецодягом, спецвзуттям, засобами індивідуального захисту. Забороняється допускати до роботи осіб, які не мають відповідного спецодягу, спецвзуття і засобів індивідуального захисту.

На підприємстві складається список робіт, підвищеної небезпеки (газо-, вибухо-, пожежонебезпечні, роботи на висоті і ін.), затверджений керівником підприємства. Усім робітникам під розписку повинні бути видані інструкції з охорони праці за їх професії. До виконання робіт підвищеної небезпеки допускаються спеціалісти і робітники, які пройшли попереднє спеціальне навчання і перевірку знань відповідних нормативних актів про охорону праці. Роботи з підвищеною небезпекою повинні проводитися за нарядом-

допуском. Особи, які мають право видавати наряд-допуск, призначаються наказом по підприємству (виробництву). Всі працівники вогнетривкого виробництва підлягають обов'язковому соціальному страхуванню від нещасних випадків і професійних захворювань, а працівники, зайняті на роботах з важкими і шкідливими умовами праці, повинні забезпечуватися лікувально-профілактичним харчуванням, молоком або рівноцінними харчовими продуктами, газованою водою.

При очищення димоходів періодичних, кільцевих і газокамерних печей, а також подпорових каналів тунельних печей, робітники повинні бути забезпечені теплоізоляційної одягом. Робота повинна проводитися при температурі повітря не вище 40 °С; при цьому необхідно дотримуватись вимог безпеки.

Перед допуском до роботи в бункері робітник повинен бути проінструктований по техніці безпеки, забезпечений спецодягом, спецвзуттям, каскою, страхувальним поясом (мотузкою), а в окремих випадках, передбачених в наряді-допуску, респіратором або протигазом. Запобіжні пояси (мотузки) повинні бути випробувані, промарковані та мати бирку із зазначенням наступного терміну випробувань.

На ділянках, де робочі зазнають інтенсивного впливу тепла (при роботі у топках, завантаження та вивантаження печей і т.п.), повинні застосовуватися душіруючого установки, екрани та інші пристрої для захисту від теплових випромінювань відповідно до чинних норм.

Ремонт і очищення вентиляційних пристроїв в цехах, що переробляють пилять, повинні здійснюватися з використанням засобів захисту органів дихання. Вентилятори, димососи, повітрорудки, рівні шуму яких перевищують допустимі норми, повинні бути поміщені в звукоізольовані камери або звукоізолюючі укриття (кожухи), бути обладнані глушниками шуму з боку всмоктування і нагнітання, мати засоби віброізоляції, що запобігають передачу вібрацій трубопроводам і фундаментам.

Механізований ручний інструмент (вібротрамбовки, відбійні молотки та ін.) повинні бути оснащені засобами захисту від вібрацій і шуму. При роботі з ручним віброінструментом повинні застосовуватися віброзахисні рукавиці.

### 3.7 Розрахунок передачі тепла крізь футеровку сталерозливного ковша

Футеровка сталерозливного ковшу складається з трьох шарів вогнетривів та шару сталі. Робочий шар футеровки робиться з періклазоуглероду товщиною  $\delta_1=260$  мм [37] з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_1=5,3$  Вт/(м · К) [38]. Арматурний шар – шамотна цегла товщиною  $\delta_2=150$  мм [37] з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_2=1,25$  Вт/(м · К) [39]. Теплоізоляційний шар товщиною  $\delta_3=26$  мм [37] з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_3=0,14$  Вт/(м · К) [39] виконується з волокнистої плити. Температура на поверхні футеровки складає 320 °С [40]. Температура рідкої сталі у ковшу складає 2000 °С, температура стінки ковшу складає 1585 °С, коефіцієнт тепловіддачі рідкої сталі  $\alpha_1=8,6$  Вт/(м<sup>2</sup> · К). Температура повітря у цеху приймається 20 °С. коефіцієнт тепловіддачі повітря  $\alpha_2=12,3$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Питомий тепловий потік скрізь футеровку ковша [41], Вт/ м<sup>2</sup>

$$q = \alpha_1 \cdot (t_0 - t_1) = \frac{\lambda_1}{\delta_1} \cdot (t_1 - t_2) = \frac{\lambda_2}{\delta_2} \cdot (t_2 - t_3) = \frac{\lambda_3}{\delta_3} \cdot (t_3 - t_4) = \alpha_2 \cdot (t_4 - t_5);$$

$$q = \alpha_1 \cdot (t_0 - t_1) = 8,6 \cdot (2000 - 1585) = 3569 .$$

Температури у шарах футеровки, °С

$$t_2 = t_1 - q \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 1585 - 3569 \cdot \frac{0,26}{5,3} = 1410;$$

$$t_3 = t_2 - q \cdot \frac{\delta_2}{\lambda_2} = 1410 - 3569 \cdot \frac{0,15}{1,25} = 981,7.$$

Графік змінення температури у футеровці сталерозливного ковша зображений на рисунку 3.1.

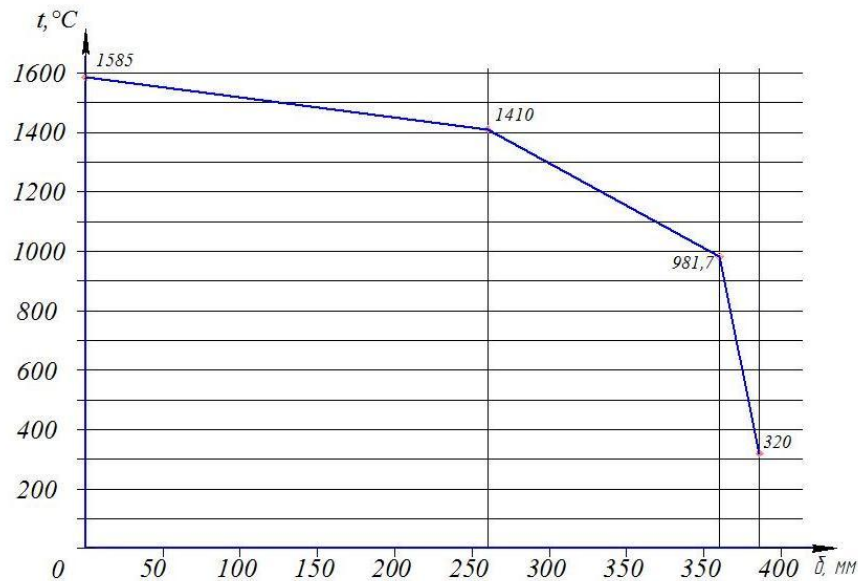


Рисунок 3.1 – Графік зміни температури у футеровці сталерозливного ковша

У роботі було розраховані хімічні властивості та ефективний коефіцієнт теплопровідності шамотної цегли, яку можна використовувати у сталерозливного ковшу у арматурному шарі. Знайдений коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_2=0,97$  Вт/(м · К).

Температури у шарах футеровки з розрахованою шамотною цеглою, °C

$$t_2 = t_1 - q \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 1585 - 3569 \cdot \frac{0,26}{5,3} = 1410;$$

$$t_3 = t_2 - q \cdot \frac{\delta_2}{\lambda_2} = 1410 - 3569 \cdot \frac{0,15}{0,97} = 858;$$

$$t_4 = t_3 - q \cdot \frac{\delta_3}{\lambda_3} = 858 - 3569 \cdot \frac{0,026}{0,14} = 195.$$

Як видно з розрахунків, температура на поверхні футеровки сталерозливного ковша змінюється на 125 °С.

Графік змінення температури у футеровці сталерозливного ковша з застосуванням розрахованих характеристик вогнетриву зображений на рисунку 3.2.

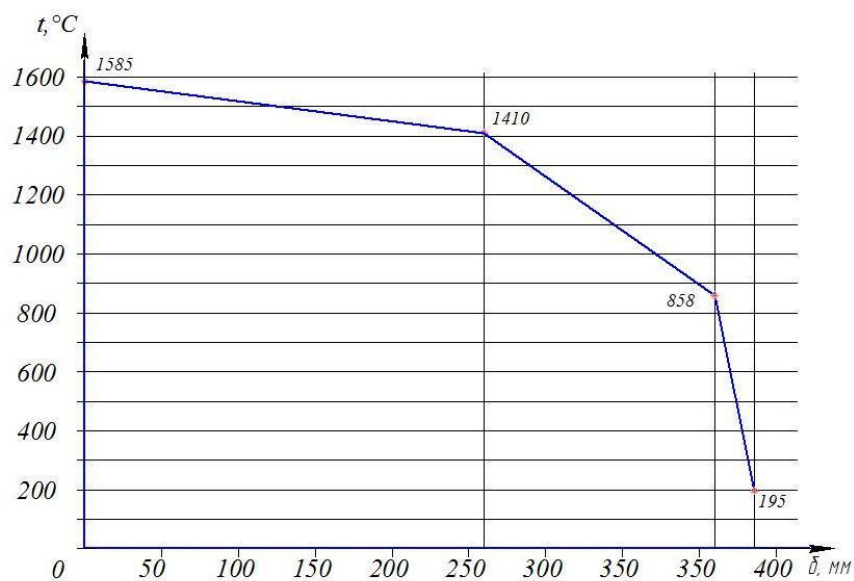


Рисунок 3.2 – Графік зміни температури у футеровці сталерозливного ковша застосуванням розрахованих характеристик вогнетриву

## ВИСНОВКИ

У роботі розглядалися характеристики вогнетривів, їх властивості, класифікація, використання. Класифікуються вогнетриви за хімічним складом (кремнеземисті, магнезіальні, вуглецеві, оксидні та інше), за вогнетривкістю (вогнетривкі, високовогнетривкі, та вищої вогнетривкості). Вогнетриви виготовляються у вигляді цегли та не формованих виробів. Не формовані вогнетриви застосовують для виготовлення монолітних футеровок з вогнетривкого бетону і набивних мас.

Одне з важливих властивостей вогнетривів - це пористість. Коефіцієнт теплопровідності вогнетривів залежить від кількості часу, розташування в просторі, розміру, відкриті або закриті пори. Найменший коефіцієнт теплопровідності у матеріалу з порами, розташованими перпендикулярно тепловому потоку.

Вибір вогнетривкого матеріалу обумовлюється не тільки його температурної стійкістю, але і хімічними особливостями речовини розжарювання, а також властивостями палива або золи.

Нами була обрана група алюмосилікатних вогнетривів. Більш детально розглядається шамотна цегла. Шамот – це вогнетривка глина, обпалена до втрат пластичності. Шамоті вироби складається з  $\text{SiO}_2$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та класифікуються за наявністю в ньому  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , також розрізняють за наявністю у ньому шамотної складової (безшамотні, малошамотні, шамотні та багатошамотні). Шамотні вироби застосовуються у доменних печах, повітрянагрівачах доменних печей, при виробництві сталевого лиття, печі кольорової металургії, коксові і газові печі, скляна і цементна промисловість.

Для шамотної цегли було розраховано матеріальний баланс виробництва. Спочатку приведена технологічна схема виробництва вогнетривів, яка включає до себе подачу необхідних матеріалів, їх змішання, сушку, формування. Потім ця схема була застосована для виробництва



шамоту. Графічне зображення процесу виробництва шамотної цегли потрібно для аналізу витрат та їх зменшення.

Матеріальний баланс складається з втратної та витратної частини. Втратна частина складається з глини на шамот, глини для зв'язки та води для суміші. Витратна – з витрат при обробці глини та сформованого матеріалу. Також побудовані діаграми втратної та витратної частини. На діаграмі втратної частини найбільший відсоток складає глина, яка йде на шамот. Співвідношення шамотна глина – глина для зв'язки може впливати на коефіцієнт теплопровідності.

Для аналізу, визначення оптимальних теплофізичних характеристик та розрахунку ефективного коефіцієнту теплопровідності було проаналізована література, виключені груби помилки ряду та складена таблиця, в яку входять температура вогнетривкості, хімічний склад виробів, температура обробки та коефіцієнт теплопровідності. За допомогою програми STATISTICA 10 були розраховані оптимальні теплофізичні дані алюмосилікатних вогнетривів:  $t_{обр}=1477,4$  °C,  $t_{вогн}=1677,6$  °C,  $\lambda=0,97$  Вт/(м·К), вміст  $Al_2O_3$  дорівнює 38,36 %, вміст  $SiO_2$  дорівнює 54,66 % За отриманими даними вогнетрив належить до шамотної групи (вміст  $Al_2O_3$  (28...45) %).

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Кащеев, И. Д. Свойство и применение огнеупоров. М: Теплотехник, 2004. 352с.
2. Карклит, А. К. Тихонова, Л. А. Огнеупоры из высокоглиноземистого сырья. М: Metallurgiya, 1974. 152с.
3. Лейбензон, Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М ОГИЗ, 1947. 244с.
4. ГОСТ 530-2012 Кирпич и камень керамические. М: Стандартиформ, 2013. 28с.
5. Бельский, В. И. Промышленные печи и трубы / В. И. Бельский, Б. В. Сергеев. М., Стройиздат, 1974. 301с.
6. Губинский, В. И. Metallургические печи. Теория и расчеты: учебник. в 2 т. Т. 2 / В. И. Губинский (и др.); под. общ. ред.. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. Минск: Беларус. наука, 2007. 832 с.
7. Литовский, Е. Я. Теплофизические свойства огнеупоров / Е. Я. Литовский, Н.А. Пучкевич. М.: Изд-во «Metallurgiya», 1982. 150с.
8. Воронов, Г.В. Огнеупорные материалы и изделия в промышленных печах и объектах вспомогательного назначения: учебное пособие / Г.В. Воронов, В.А. Старцев.-Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. 240с.
10. Anatoliy Pavlenko, Valeriy Ivanovich Deshko, Andrii O. Cheilytko, Iryna Sukhodub. *Efficiency of using energy in the housing sector*. Monografie. Kielce: Kielce University of Technology. 2020. P.147
11. Ільїн С. В. Чейлітко А. О. Кушнір С. М. Черненко Т. В. Енергетична ефективність будівель та інженерних систем: монографія. Запоріжжя: Видавничий дім "Гельветика", 2021. 180 с.
11. Карклит, А. К. Производство огнеупоров полусухим способом / А.К. Карклит, А.П. Ларин. М.: Metallurgiya, 1981. 320с.
12. Инамуры, Я. Огнеупоры и их применение / Я. Инамуры: пер. с япон. Тихонова А. А. М.: Metallurgiya, 1984. 448с.

13. Дороганов, В.А Огнеупорные керамобетоны / В.А. Дороганов, Е.К. Евтушенко. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 200 с.
14. Чейлитко, А. О. Формування теплофізичних властивостей елементів конструкцій теплового захисту шляхом створення прогнозованих пористих структур: монографія. Запоріжжя: ЗДІА, 2017. 318с.
15. Казанцев, Е. М. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. М., Metallurgiya, 1975. 368с.
16. Юрков, А.Л. Огнеупоры и углеродные катодные материалы для алюминиевой промышленности, 2006. 320с.
17. Великин, Б. А. Футеровка сталеразливочных ковшей / Б. А. Великин, А. К. Карклит, С. В. Колпаков. М. : Metallurgiya, 1990. 244с.
18. Огнеупорные изделия, материалы и сырье: справочник / под ред. А.К. Карклита. М., Metallurgiya, 1977. 216с.
19. Сооружение промышленных печей : справочник / под ред. А. М. Прохорова. М.: Теплотехник, 2006. 865с.
20. Бровман, М. Я. Непрерывная разливка металлов / М. Я. Бровман. – М.: ЭКОМЕТ, 2007. 482с.
21. Чейлитко, А. О. Використання вторинних енергоресурсів, Навчально-методичний посібник. Запоріжжя: ЗДІА, 2014 251с.
22. Справочник теплоэнергетика предприятий цветной металлургии. Под. ред.. О. Н. Багрова и З. Л. Берлина. М.: Metallurgiya, 1982. 456с.
23. Беляев, Н.М. Методы теории теплопроводности / Н.М. Беляев, А.А. Рядно – М.: Высш.школа, 1982. 327 с.
24. Осипова, В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В.А. Осипова. М.: Энергия, 1979. 319с.
25. Денисова, Э. И. Измерение теплопроводности на измерителе ИТ- $\lambda$ -400/ Э. И. Денисова, А. В. Шак. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2005. 35с.

26. Коротких, А. Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие / А. Г. Коротких. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. 97с.
27. Экспериментальное исследование процессов обжига и изоморфизм в керамических материалах// Башкирский химический журнал.- 2006. №3. С.30-42.
28. Алленштейн, Й. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания: справочник / Й. Алленштейн; под ред. Г. Роучка, Х. Вутнау: пер. с нем. – Очаговой И. Г. М.: Интермет Инжиниринг, 2010. 392с.
29. Кащеев, И. Д. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок Производство огнеупоров / И. Д. Кащеев. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 663 с.
30. Статистические методы в управлении качеством (использование программного продукта STATISTICA): учебно-методическое пособие / Н. Н. Умарова, Р. Ф. Бакеева. Казань: КГТУ, 2008. 112с.
31. ДНАОП 26.26-1.08-97. Правила безпеки у вогнетривкому виробництві.
32. Корж, В.А. Охрана труда / В.А. Корж. М.: КНОРУС, 2016. 342с.
33. Охрана труда и электробезопасность [Текст] : учебник для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / В. Е. Чекулаев, Е. Н. Горожанкина, В. В. Лепеха. Москва : Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. трансп., 2012. 302, [1] с.;
34. Чейлитко А. О., Ільїн С. В., Лаврьонов А. В., Белоконь Ю. О. Дослідження характеристик циклону для сухого очищення газів від пилу в металургії. Металургія. 2020. Т. 1. № 1. С. 107-114.
35. Жадецкий, В. Ц. Основы охраны труда / В. Ц. Жидецкий, В. С. Джигирей, А. В. Мельников.-Львов.: Афиша. 2000. 345с.
36. Фролов, А. В. Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда / А. В. Фролов, Т. Н. Бакаева; под. общ. ред. А. В. Фролова.-Ростов н/Д.: Феникс, 2008. 750с.

37. Футеровка ковша // Разливка сталев изложниці URL: <https://steeltimes.ru/allmet/casting/ingots/equipment/004.php> (дата звернення 20.12.2018)
38. Смирнов, А. Н. Крупный слиток / А. Н. Смирнов. – Донецк: Вебер, 2009. 153с.
39. Огнеупорные материалы. URL: <http://magnezit.ru/ru/products/iron-and-steel/steel-teeming-ladles/data/?tab=1.1|1.2|1.3|1.4|5> (дата звернення 20.12.2018)
40. Ошовская, Е. В. Моделирование работы футеровки сталеразливочного ковша с переменной тепловой нагрузкой / Е.В. Ошовская, И.Н. Салмаш, Д.А. Фоменко. Донецьк.: Наукові праці ДонНТУ: Металургія. – 2011. Вип. 13 (194). С. 198-210.
41. Цветков, Ф.Ф. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 562с.