

1

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КІБЕРФІЗИЧНИХ
СИСТЕМ

Кваліфікаційна робота

___ другий магістерський ___
(рівень вищої освіти)

на тему: «Дослідження теплофізичних властивостей алюмосилікатів з метою
виготовлення високоякісних вогнетривів»

Виконав: студент __П__ курсу,
групи _8.1442_
спеціальності _теплоенергетика_
освітньої програми _теплоенергетика_
Тельпіс Олександр Вікторович
(ініціали та прізвище)

Керівник доц. каф., к.т.н. Карпенко Г.В.
(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент Тататуга В.О.
(прізвище та ініціали)

Запоріжжя

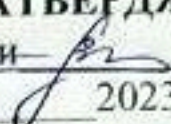
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий магістерський
Спеціальність 144 Теплоенергетика
Освітня програма Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри 
« » 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Тельпісу Олександрові Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) «Дослідження теплофізичних властивостей алюмосилікатів з метою виготовлення високоякісних вогнетривів»

керівник роботи Карпенко Ганна Володимирівна, канд. техн. наук.

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

затверджені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639-с







2. Строк подання студентом роботи 14 грудня 2023 року.

3. Вихідні дані до роботи: визначити оптимальний склад алюмосилікатної вогнетривкої цегли, її сировинної суміші та температуру її термообробки, за якої коефіцієнт її теплопровідності буде мінімальний.

4. 1 Характеристика вогнетривів, що застосовується в промисловості України. Аналіз впливу пористої структури вогнетриву на його коефіцієнт теплопровідності. Матеріальний баланс виробництва вогнетривкої цегли для футеровки сталерозливного ковша. Енергетичний баланс виробництва вогнетривкої цегли для футеровки сталерозливного ковша. Енергетичний баланс сушильного барабана для опалу глини. Дослідження шляхів оптимізації ефективного коефіцієнту теплопровідності вогнетривів. Знаходження оптимальних теплофізичних характеристик цегли. Висновки.

5. Теплофізичні показники досліджувальних вогнетривів. Схема виробництва вогнетривких матеріалів. Діаграма Сенкі виробництва шамотної цегли. Втрахи виробництва шамотної цегли. Діаграма Сенкі енергетичного балансу. Температурні втрати при обробці, хімічний склад, вогнетривкість та коефіцієнт теплопровідності алюмосилікатів. Програма STATISTICA 10. Контурні графіки бажаності парних незалежних змінних. Графіки залежності вогнетривкості та теплопровідності від температури обробки та хімічного складу

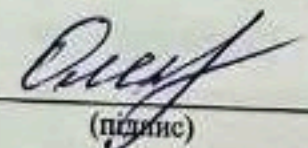
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Карпенко Г.В., доц. каф. ЕІКФС		
Розділ 2	Карпенко Г.В., доц. каф. ЕІКФС		
Розділ 3	Карпенко Г.В., доц. каф. ЕІКФС		


7. Дата видачі завдання 10.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

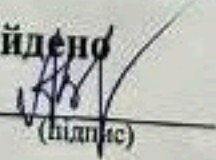
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Теплофізичні показники досліджувальних вогнетривів	30.09.2023	
2	Аналіз впливу пористої структури вогнетриву на його коефіцієнт теплопровідності	07.10.2023	
3	Дослідження шляхів оптимізації ефективного коефіцієнту теплопровідності вогнетривів	21.11.2023	
4	Знаходження оптимальних теплофізичних характеристик цегли	30.11.2023	

Студент 
(підпис)

О. В. Тельпіс
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) 
(підпис)

Г.В. Карпенко
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено
Нормоконтролер 
(підпис)

В.В. Артемчук
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Тельпіс О.В. «Дослідження теплофізичних властивостей алюмосилікатів з метою виготовлення високоякісних вогнетривів».

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 «Теплоенергетика». Науковий керівник - канд. техн. наук, доц. Карпенко Г.В. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2023 р.

У роботі розглянуті вогнетривкі матеріали, їх характеристики, властивості, класифікація та застосування. Наведено класифікацію вогнетривів за хімічним складом та вогнестійкістю. Вибір вогнетривкого матеріалу обумовлений його термостійкістю та хімічними особливостями тліючої речовини. Матеріальний баланс виробництва розрахований за шамотною цеглою. Наведено технологічну схему виробництва вогнетривів, розрахунковий матеріальний баланс та схеми вхідної та вихідної частин. Розрахований енергетичний баланс шамотного виробництва. До розглянутих методів дослідження ефективного коефіцієнта теплопровідності відносяться такі, як стаціонарний метод плоского шару, поздовжній метод теплового потоку та інші. Складена таблиця алюмосилікатних вогнетривів. Вибрані дані були проаналізовані та за допомогою програми STATISTICA 10 знайдено коефіцієнти регресії, проведено розрахунки на основі цих коефіцієнтів, отримано графіки залежності та оптимальні характеристики вогнетривів.

Ключові слова: ВОГНЕТРИВ, ШАМОТНА ЦЕГЛА, МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС, РЕГРЕСІЙНІ КОЕФІЦІЄНТИ, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС, КОЕФІЦІЄНТ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

Список публікацій магістранта:

1. Тельпіс Олександр, магістрант 1 курсу ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, наук. кер.: канд. техн. наук, доц. Карпенко Г.В. Характеристика альтернативних джерел для об'єктів з невеликим тепловим навантаженням. Збірник наукових праць студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2023»: у 5 т. / Запорізький національний університет. Запоріжжя : ЗНУ, 2023. Т.5. С. 342.

ABSTRACT

Telpis O.V. "Study of thermophysical properties of aluminosilicates for the purpose of manufacturing high-quality refractories"

Qualifying thesis for obtaining a master's degree in specialty 144 "Heat power engineering". Research supervisor - candidate. technical of Science, Assoc. Karpenko G.V. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebni Zaporizhzhia National University. Department of electrical engineering and of cyber-physical systems, 2023

Refractory materials, their characteristics, properties, classification, and use are considered in the work. Classification of refractories according to chemical composition and fire resistance is given. The choice of refractory material was made due to its temperature resistance and chemical features of the glow substance. The material balance of production was calculated for fireclay bricks. The technological scheme of the production of refractories, the calculated material balance and diagrams of the input and output parts are given. The energy balance of fireclay production is calculated. The considered methods of research of the effective coefficient of thermal conductivity are such as the stationary method of a flat layer, the method of longitudinal heat flow, and others. A compiled table of aluminosilicate refractories. The selected data were analyzed and with the help of the STATISTICA 10 program, regression coefficients were found, calculations were obtained by these coefficients, graphs of dependence and optimal characteristics of refractories.

Keywords: REFRACTORY, FIRE BRICK, MATERIAL BALANCE, REGRESSION COEFFICIENTS, ENERGY BALANCE, HEAT CONDUCTIVITY COEFFICIENT

List of publications of the master's student:

1. Oleksandr Telpis, master's student of the 1st year of INNI named after Yu.M. Potebni ZNU, science. manager: candidate technical of Science, Assoc. Karpenko G.V. Characteristics of alternative sources for objects with a small heat load. Collection of scientific works of students, postgraduates, doctoral students and young scientists "Young science-2023": in 5 volumes / Zaporizhzhia National University. Zaporizhzhia: ZNU, 2023. T.5. P. 342.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВОГНЕТРИВІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЄТЬСЯ В ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ	12
1.1 Шамотні вироби	18
1.2 Аналіз впливу пористої структури вогнетриву на його коефіцієнт теплопровідності	19
1.3 Матеріальний баланс виробництва вогнетривкої цегли для футеровки сталерозливного ковша	23
1.3.1 Приклад виробництва вогнетривких матеріалів	23
1.4 Енергетичний баланс виробництва вогнетривкої цегли для футеровки сталерозливного ковша	32
1.4.1 Енергетичний баланс обертової печі для опалу глини на шамот	32
1.4.1.1 Прибуткові статті балансу	33
1.4.1.2 Витрата тепла	36
1.4.2 Енергетичний баланс сушильного барабана для опалу глини для зв'язки	36
1.4.2.1 Прибуткові статті балансу:	37
1.4.3 Опал цегли у тунельній печі	40
1.4.3.1 Прибуткові статті балансу	40
1.4.3.2 Витрата тепла	41
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕФЕКТИВНОГО КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОГНЕТРИВІВ	43
2.1 Поширені методи дослідження ефективного коефіцієнту теплопровідності	43
2.2 Побудова залежності теплопровідності від температури термообробки та хімічного складу	51
2.3 Знаходження оптимальних теплофізичних характеристик цегли	54

ВИСНОВКИ

9

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

63

65

ВСТУП

Актуальність роботи. Одним із пунктів енергетичної стратегії України на період до 2030 року є зниження питомої собівартості продукції за рахунок впровадження в експлуатацію сучасних теплоізоляційних матеріалів, зокрема пожежобезпечних.

Вогнетривкі матеріали дуже поширені в сучасній промисловості. Їх застосовують у металургії, будівництві, атомній промисловості, теплоенергетиці та інших. Вогнетривкі матеріали застосовуються в місцях, де діють високі температури.

Вогнетриви виготовляються з мінеральної сировини (наприклад, глини, піску) і випускаються різних видів (цеглини, плити).

Сучасна промисловість намагається отримати більш якісний вогнетривкий матеріал, який витримуватиме високі термічні навантаження і мати гарну міцність. Для пошуку шляхів покращення якостей вогнетривів різні автори підходять до питання з різних боків. Багато, як сучасні, і класичні, займаються проблемою поліпшення фізичних властивостей вогнетривів. Так, у книзі Кашеєва «Властивості та застосування вогнетривів» він розглядає основні властивості вогнетривів, їх застосування в промисловості на основі сучасних досліджень та даних [1]. Автори Каркліт і Тихонов у книзі «Вогнетриви з високоглинистої сировини» розглянули властивості цього матеріалу, а також процес виробництва вогнетривів, їх застосування в промисловості та основні методи, за допомогою яких можна покращити якість вогнетривів [2]. Вогнетрив властивий такий показник, як пористість. Робота Лейбензона «Рух природних рідин та газів у пористому середовищі» може бути застосована для розробки нових пористих вогнетривів [3].

Тому дослідження ефективного коефіцієнта теплопровідності вогнетривкої цегли з метою пошуку його оптимальних теплофізичних характеристик є актуальним завданням.

Об'єкт дослідження - алюмосилікатна вогнетривка цегла.

Предмет дослідження - теплофізичні характеристики вогнетривкої цегли.

Мета роботи - знаходження оптимального складу сировинної суміші та температури її термообробки, за якої коефіцієнт теплопровідності мінімальний.

Методи дослідження. Для вирішення завдань використовувалися такі методи: теоретичний аналіз джерел, порівняльний аналіз, обробка даних, вивчення та узагальнення.

Наукова новизна одержаних результатів. Розрахований енергетичний баланс шамотного виробництва. Досліджено ефективний коефіцієнт теплопровідності. Визначено коефіцієнти регресії, проведено розрахунки, отримано графіки залежності та оптимальні характеристики вогнетривів.

Практична цінність роботи. Знайдено енергетичний баланс, який можна використовувати для дослідження енерговитрат та розрахунку енергоємності продукції; режими термічної обробки, оптимальний склад вогнетривких характеристик

Апробація роботи. Результати роботи представлені на 16-й університетській науково-практичній конференції студентів, аспірантів, докторантів та молодих вчених «Молода наука-2023».

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Магістерська дисертація включає вступ, два розділи, висновок та список літератури з 20 пунктів. Загальний обсяг — 66 сторінок, у тому числі 20 рисунків та 14 таблиць.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВОГНЕТРИВІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЄТЬСЯ В ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

1.1 Теплофізичні характеристики вогнетривів, що застосовуються в енергетиці

Вогнетриви – це матеріали, які виготовляються з мінеральної сировини та витримують високі температури. Вогнетриви поділяються на штучні вироби (цегла) і неформовані (сипкі). Штучні вироби (цегла) випускають різних видів: звичайні у формі правильного паралелепіпеда (250x120x65 мм), клиноподібні та фасонні [4]. До неформованих (сипких) матеріалів відносяться засипні та маси, що використовуються для виробництва вогнетривкого бетону.

До основних теплотехнічних властивостей вогнетривів відносяться вогнестійкість, механічна міцність, термічна та хімічна стійкість, деформація під навантаженням при високій температурі, сталість форми та об'єму, пористість, газопроникність, теплопровідність [5].

Вогнетривкість – це здатність матеріалів витримувати високі температури, не деформуючись під дією власної ваги. По вогнетривкості розрізняють: тугоплавкі (від 1580 °С до 1770 °С), високовогнетривкі (від 1770 °С до 2000 °С) і високу вогнетривкість (понад 2000 °С) [5].

Температура деформації під навантаженням – це температура, значно нижча за ту, за якої проводилися випробування. За цієї температури вогнетривкі матеріали руйнуються під навантаженням [5].

Вогнетривка жаростійкість – стійкість до теплових змін (нагріву та раптового охолодження). Вони визначаються теплоємністю, теплопровідністю та коефіцієнтом об'ємного розширення. Показник термостійкості – кількість теплотозмін води (нагрів до 1573)°С при швидкому охолодженні у воді) [6].

Стабільність параметрів – це властивість матеріалу не змінювати параметри у процесі експлуатації. В процесі експлуатації вогнетрив піддається циклам нагрівання-охолодження, що викликає розширення або стиснення матеріалу. Це призводить до зниження механічної міцності і може спричинити руйнування вогнетривкої конструкції.

Ще одна властивість вогнетривких матеріалів – розтріскування. Розтріскування – це зазвичай руйнування, утворення мережі тріщин або розшарування, спричинене станом маси матеріалу. Розтріскування переважно спостерігається за наявності градієнта температури через зміну обсягу та коефіцієнта термічного розширення цегляної маси. Вкрай небажано допускати розтріскування, оскільки погіршуються характеристики вогнетривів.

Теплопровідність – це здатність матеріалів передавати тепло від гарячіших частин до холодніших без помітного переміщення частинок. Теплопровідність вимірюється коефіцієнтом теплопровідності, що дорівнює кількості тепла, що проходить через однорідний зразок матеріалу одиничної довжини та одиничної площі в одиницю часу при одиничній різниці температур $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [5].

Механічна міцність вогнетривких виробів - це межа міцності, яку витримує матеріал при стисканні. Її визначають при 293 К середовищі нейтрального газу.

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

Термічна стабільність - це здатність матеріалу зберігати свої механічні характеристики та структуру. Залежить від коефіцієнта теплопровідності та теплового розширення. Кількість теплових змін оцінюють за термостабільністю.

Газопроникність вогнетриву залежить від його природи, величини відкритої пористості, однорідності структури виробу, температури та тиску

газу. З підвищенням температури газопроникність вогнетривів знижується, оскільки збільшується обсяг газу та збільшується його в'язкість. Вогнетриви повинні мати низьку газопроникність.[5].

Теплоємність вогнетривів визначає швидкість нагрівання та охолодження матеріалу та витрати тепла на нагрівання. Залежить від хімічного складу вогнетривів. Трохи збільшується з підвищенням температури[5].

Вогнетриви діляться на пористість (відношення відкритих пір до загального обсягу вогнетриву) і справжню пористість (відношення обсягу відкритих і закритих пір до обсягу вогнетриву). Воно виражається у відсотках. Розрізняють також відкриту ($P_{\text{від}}$) та закриту пористість ($P_{\text{заг}}$). Відкриті пори пов'язані один з одним і з атмосферою, а закриті пори є закритими просторами всередині виробу. Пористість визначається технологією виготовлення вогнетриву. Плавлені вогнетриви мають нульову пористість. Залежно від пористості вогнетриви поділяються на два класи: щільні вогнетриви ($P_{\text{від}} < 30\%$); теплоізоляційні вогнетриви ($P_{\text{від}} > 30\%$). Мікропори - пори розміром 0,2-3,0 мкм, що виникають у просторі між великими порами, впливають на збільшення міцності та зниження теплопровідності.

Вогнетриви також розрізняють за хімічним складом, мінералогічний склад, наведений у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Класифікація вогнетривів з хімічного та мінералогічного складу

Клас	Група	Хімічний склад
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 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TO}_2 + \text{CaO}$
	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	α -кварц $\approx 100\%$
Алюмосилікатні (Корундові)	Напівкислі	$Al_2O_3 < 28\%$; інше $SiO_2 + Fe_2O_3$
	Шамотні	$28 \leq Al_2O_3 \leq 45\%$; інше $SiO_2 + Fe_2O_3$
	Продовження таблиці 1.1	
	Мулліто-кремнеземісті	$45 < Al_2O_3 \leq 62\%$; інше SiO_2
	Муллітові	$62 < Al_2O_3 \leq 72\%$; інше SiO_2
	Муллітокорундові	$72 < Al_2O_3 \leq 90\%$; інше SiO_2
	Корундові	$Al_2O_3 > 90\%$; інше SiO_2
Магнезіальні (періклазові)	Періклазові	$MgO \geq 80\%$; $(CaO + SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) \leq 10\%$
	Періклазові на різних зв'язках	$MgO \geq 85\%$; $(CaO + SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) < 15\%$
Магнезіально-вапняні і вапняні	Періклазовапняні	$50 < MgO < 85\%$; $10 \leq CaO < 45\%$
	Періклазовапняні стабілізовані	$35 < MgO < 75\%$; $10 < CaO \leq 40\%$; $(CaO/SiO_2) > 2$
	Вапняноперіклазові	$10 < MgO < 50\%$; $45 \leq CaO \leq 85\%$
Магнезіально-шпинелідних	Періклазохромітові	$MgO \geq 60\%$; $5 \leq Cr_2O_3 \leq 20\%$; інше $SiO_2 + Al_2O_3 + CaO + Fe_2O_3 + FeO$
	Хромітоперіклазові	$40 \leq MgO < 60\%$; $15 \leq Cr_2O_3 \leq 35\%$; інше $SiO_2 + Al_2O_3 + CaO + Fe_2O_3 + FeO$
	Хромітові	$MgO > 40\%$; $Cr_2O_3 > 30\%$; інше $SiO_2 + Al_2O_3 + CaO + Fe_2O_3 + FeO$
	Періклазошпинелідні	$50 \leq MgO < 85\%$; $5 \leq Cr_2O_3 \leq 20\%$; $Al_2O_3 > 25\%$; інше $SiO_2 + CaO$
	Періклазошпинельні	$MgO > 40\%$; $5 \leq Al_2O_3 \leq 55\%$; інше $SiO_2 + CaO$
	Шпинельні	$25 \leq MgO \leq 40\%$; $55 < Al_2O_3 \leq 70\%$; інше $SiO_2 + CaO$
Магнезіально-силікатні	Періклазофорстеритові	$65 \leq MgO < 85\%$; $SiO_2 \geq 7\%$; інше $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO$
	Форстеритові	$50 \leq MgO \leq 65\%$; $25 < SiO_2 \leq 40\%$; інше $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO$
	Форстеритохромітові	$45 \leq MgO \leq 60\%$; $20 \leq SiO_2 \leq 30\%$; $5 \leq Cr_2O_3 \leq 15\%$; інше $Al_2O_3 + Fe_2O_3$
Вуглецеві	Вуглецеві	$C = 88 \dots 90\%$
	Графітошамотні	$C = 20 \dots 60\%$
Карбідо-	Карбідо-кремнієві	$SiC > 70\%$; інше $SiO_2 + Al_2O_3$

кремнієві	Карбідокремно - вмістний	$15 \leq \text{SiC} \leq 70 \%$; $20 < \text{SiO}_2 < 55 \%$; $15 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 30\%$
Цирконієві	Баделейтові	$\text{ZrO}_2 > 90 \%$; інше $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$
	Баделеїта-	$20 \leq \text{ZrO}_2 \leq 90 \%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 < 65 \%$; інше
	Продовження таблиці 1.1	
Оксидні	Цирконієві	$\text{ZrO}_2 > 50 \%$; $\text{SiO}_2 > 25 \%$; інше Al_2O_3
	З оксида Be	$\text{BeO} \approx 100 \%$
	З оксида Mg	$\text{MgO} \approx 100 \%$
	З оксида Ca	$\text{CaO} \approx 100 \%$
	З оксида Al	$\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 100 \%$
	З оксида Zr	$\text{ZrO}_2 \approx 100 \%$
	З оксида Ti	$\text{TiO}_2 \approx 100 \%$

Існує чотири види вогнетривкої цегли: кварцова вогнетривка цегла, шамотна (глиноземна) вогнетривка цегла, основна і вуглецева вогнетривка цегла.

Кварцову вогнетривку цеглу застосовують, якщо стінки печі стикаються тільки з полум'ям або металами. Така цегла погано контактує з лугами, вапном, оксидами заліза. В основному з нього будують склепіння рубочних печей. У порівнянні зі звичайною цеглою кварцова вогнетривка цегла однорідна і не містить порожнеч. Кварцова цегла виготовляється з чистого піску або кварцу, зцементованого невеликою кількістю глини, після випалу кварцова цегла набуває характеристик, близьких до природних.

Шамот - вогнетривка глина, обпалена до втрати пластичності. Шамотні вироби містять глину та шамот. Шамотні вироби складаються переважно з оксидів (SiO_2 50-80% та Al_2O_3 10-45%). Продукти класифікуються за вмістом Al_2O_3 .

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 визначається не тільки його температуростійкістю, але й хімічними характеристиками займистої речовини, а також властивостями палива або золи.

Щоб уникнути ефекту розтріскування в процесі випалу, вогнетривка цегла містить до 70% шамота (обпаленої вогнетривкої глини), рідко коксові або графітові порошки, суміш для виробництва вогнетривкої цегли додають великі зерна кварцу. В результаті можна отримувати різні марки вогнетривкої цегли, призначені для різних областей застосування. Вибір тієї чи іншої марки вогнетривкої цегли визначається температурою, за якої передбачається її використання, хімічними характеристиками розжареної речовини, а також властивостями золи або палива.

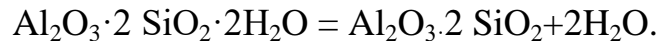
Неформові вогнетриви застосовують для виготовлення монолітних футеровок з вогнетривкого бетону та пакувальних матеріалів. Вогнетривкий бетон є сумішшю вогнетривкого наповнювача (батареї вогнетривких виробів) з деталями розміром від 0,5 до 70 мм, сполучної речовини і добавок. Холоднотвердіючий вогнетривкий цемент (глинозем, магній), іноді як сполучне використовують скло. Монолітне футерування стін і склепінь опалювальних печей застосовують з рідкого (литого) бетону з кріпленням його до металевого каркаса печі за допомогою анкерної цегли, розподілених по площі стін та сховище.

Вогнетривкі матеріали в Україні виготовляються на 18 підприємствах: Ватутінський, Великоанадольський і Часовярський вогнетривкий комбінат, ПАТ «Запоріжвогнетрив», «Білокаменські вогнетриви», Овруцький гірничозбагачувальний 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 [8].

1.1.1 Шамотні вироби

Шамотні вироби класифікуються за змістом Al_2O_3 .

При випалюванні в глині мінералогічний склад змінюється: при нагріванні до $400^\circ C$ слабозв'язана вода поступово видаляється з кристалічних ґрат; в інтервалі $400-600^\circ C$ хімічно зв'язана вода видаляється за реакцією:



Реакція йде з поглинанням тепла. Хімічний зв'язок $Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2$ називається метакарлінітом. При $400-1000^\circ C$ карбонати дисоціюють з вуглекислого газу, сульфіти окислюються з утворенням сірчистого газу, органічні домішки вигоряють. При цьому втрачається значна частина маси, зменшується обсяг та збільшується пористість.

При температурі $1100^\circ C$ виділенням тепла метакарлініт перебудовується з утворенням муліта 3 на кінцевій стадії $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$:



Залежно від наявності шамоту у складі розрізняють безшамотні, малошамотні (кількість шамоту не перевищує 30%), шамотні (кількість шамоту від 40 до 65%), багатошамотні (кілька шамоту від 40 до 65%). з шамоту більше 70%) виділяють вироби [6]. Шамотна цегла набагато краща за кварцову, протистоїть впливу лугів, краще реагує на різкі перепади температур. Застосовується в тих випадках, коли температура не перевищує $1000-1300^\circ C$, має більш високу жаростійкість (10-20 плавлень), але низькою шлакостійкістю. Цей вид цегли є найпоширенішим. Шамотні вироби використовуються в доменних печах, повітрянагрівачах доменних печей, при виробництві сталевого лиття, печах кольорової металургії, коксових та газових печах, скляній та цементній промисловості.

1.2 Аналіз впливу пористої структури вогнетриву на його коефіцієнт теплопровідності

Як показали дослідження [8], коефіцієнт теплопровідності матеріалу залежить не тільки від того, чи є пористість закритою або відкритою, але і від розміру пір та їх розташування по відношенню до теплового потоку. Ефективний коефіцієнт теплопровідності для матеріалу з порами, орієнтованими вздовж теплового потоку, майже вдвічі вищий, ніж для матеріалу з порами, орієнтованими перпендикулярно тепловому потоку.

Для визначення залежності розміру та розташування пір від ефективного коефіцієнта теплопровідності матеріалу та виявлення раціональної пористої структури для теплоізоляції були проаналізовані окремі випадки впливу пористої структури.

У табл. 1.3 прийняті наступні позначення: p - пористість, λ_1 - коефіцієнт теплопровідності матеріалу (як приклад обраний кремнеземний матеріал з коефіцієнтом теплопровідності $0,12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), λ_2 - коефіцієнт теплопровідності середовища (як приклад було обрано повітря з газовими домішками, що має коефіцієнт теплопровідності $0,019 \text{ Вт} / (\text{м}\cdot\text{К})$). Тепловий потік спрямований знизу вгору. Матеріал відзначений чорним кольором.

Формула Ейкена застосовна і для розрахунку коефіцієнта теплопровідності засипки (№8 та №9 у таблиці 1.2):

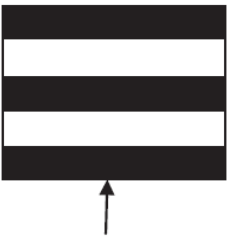
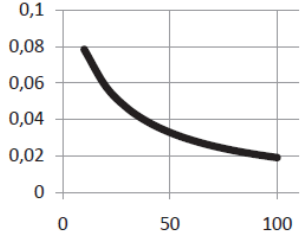
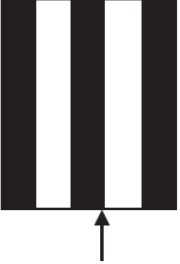
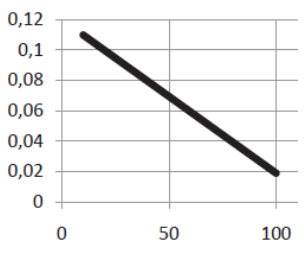
$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\lambda_1 + 1 + \frac{2p \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)}{\frac{2\lambda_1}{\lambda_2} - 1}}{1 - p \frac{1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}{\frac{2\lambda_1}{\lambda_2} + 1}}$$

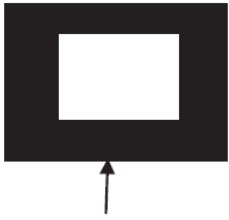
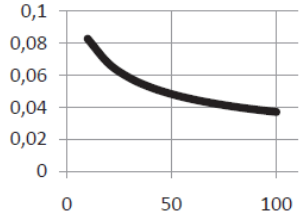
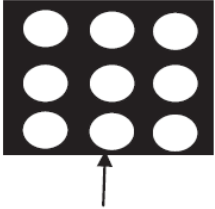
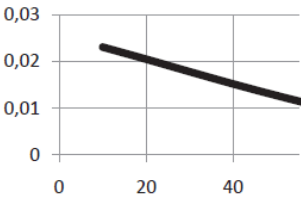
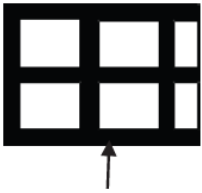
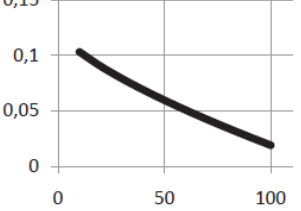
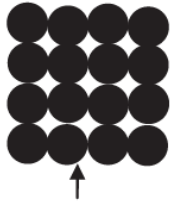
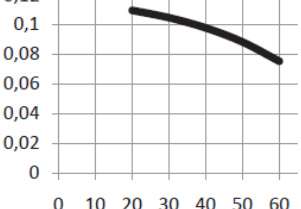
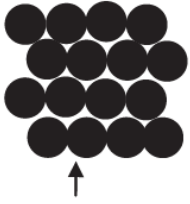
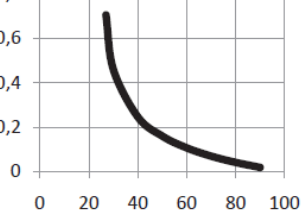
та формула Торкара

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

Найменшу похибку формула Айкена дає при формі частинок, що наближається до сфери, та пористості менше 50%. Варіант №9 із табл. 1.2 найбільш близький до засипки дисперсного матеріалу.

Таблиця 1.2 - Залежність коефіцієнта теплопровідності від пористості для двофазних систем

№ п/п	Схема розташування пор	Формула для розрахунку ефективного коефіцієнта теплопровідності	Приклад $\lambda_{\text{эф}} = f(p)$
1		$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_2 \frac{100}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}(100-p) + p}$	
2		$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_1 \frac{100-p}{100} + \lambda_2 \frac{p}{100}$	

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

Проводиться графічний аналіз: окремі пористі матеріали для засипки. Для пористих матеріалів зберігаються самі параметри, як у прикладі, а засипок приймається теплопровідність, рівна гидросиликатним гранулам з урахуванням цеоліту для середньотемпературної теплоізоляції енергетичного устаткування його елементів (0,036 Вт/(м·К)).

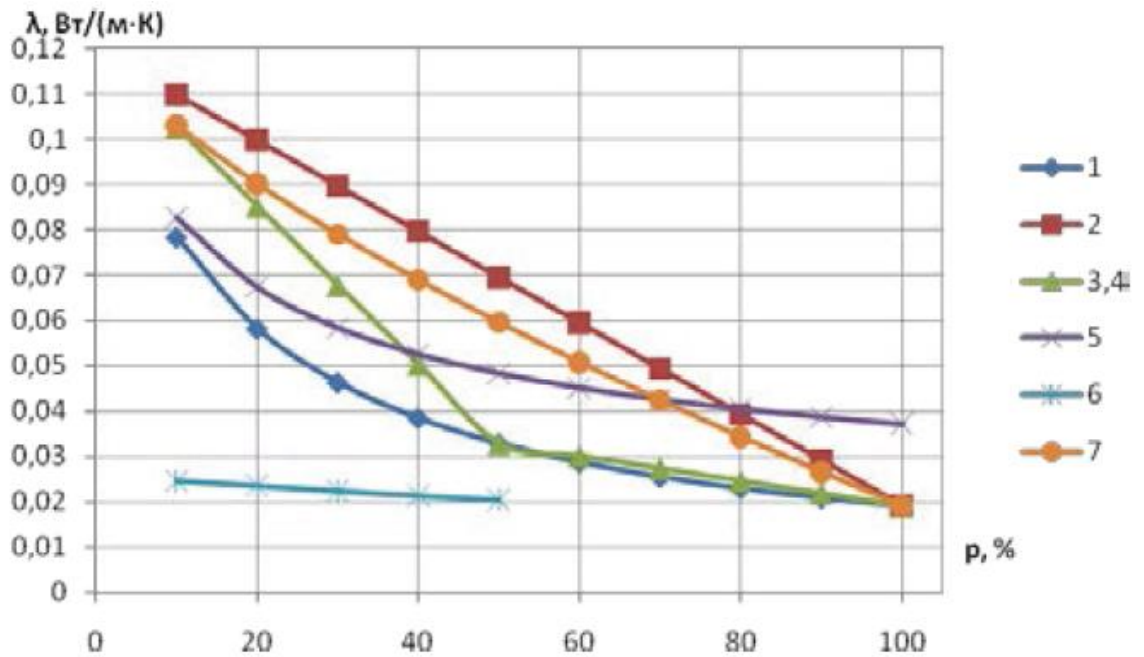


Рисунок 1.1 – Вплив пористості на ефективний коефіцієнт теплопровідності для різних схем пористості

Як видно із рис. 1.1 склад №6 оптимальний для теплоізоляційного матеріалу, але при пористості 10% коефіцієнт теплопровідності матеріалу не може бути приблизно дорівнює коефіцієнту теплопровідності повітря. Тому формула розрахунку №6 неправильна, і мінімальний (теоретичний) коефіцієнт теплопровідності досягається у конструкції №1, а максимальний – у конструкції №2. Структура №7 також непридатна для теплоізоляційних матеріалів, оскільки містить теплові потоки без контактного опору. Формула складу №5 рекомендована для доби, в якій доведено існування природної конвекції.

Структура з мінімальним теоретичним ефективним коефіцієнтом теплопровідності є шаховим розташуванням пір з обсягом, орієнтованим перпендикулярно тепловому потоку.

З малюнка 1.2 видно, що формула Ейкена і Богомолва (№ 9 табл. 1.2) показує лише загальну залежність і потребує емпіричного коригування. Залежно від Торкара та Оделевського вони виражають збільшення коефіцієнта теплопровідності зі збільшенням пористості та підходять тільки для вологих дисперсних систем або систем з великими розмірами пір.

Найбільш прийнятною є залежність Некрасова для ідеалізованої структури (№ 8 табл. 1.3).

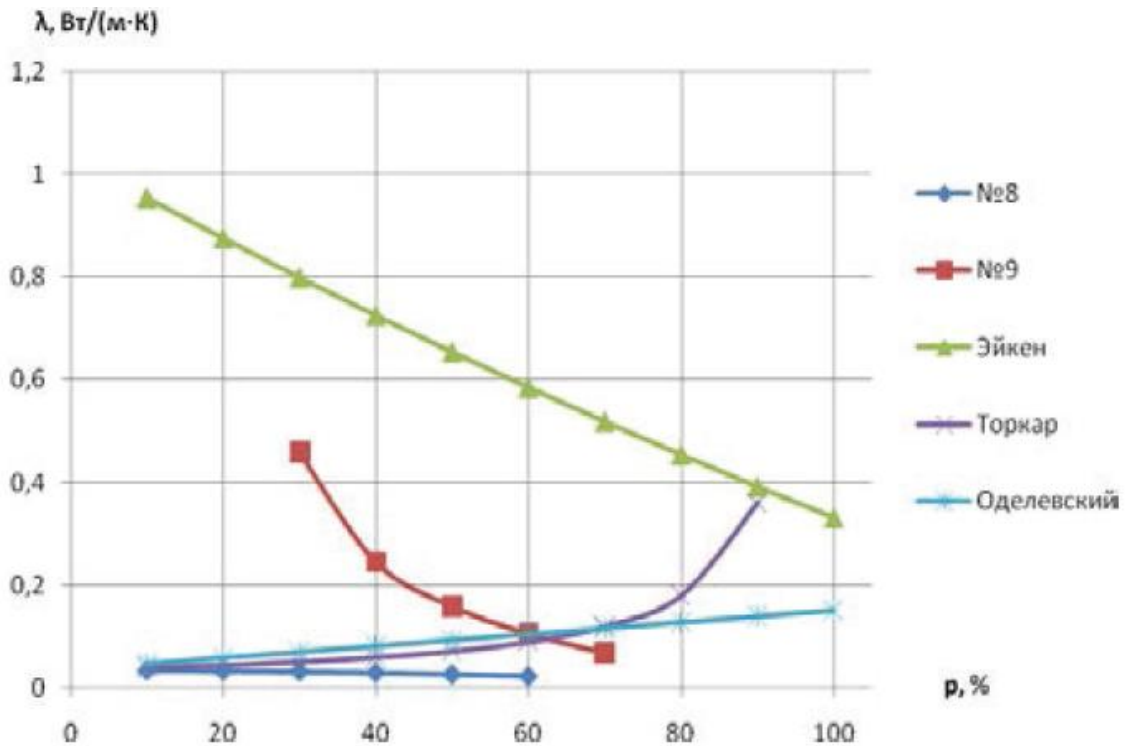


Рисунок 1.2 – Вплив пористості на ефективний коефіцієнт теплопровідності для засипок з дисперсного матеріалу

1.3 Матеріальний баланс виробництва вогнетривкої цегли для футеровки сталерозливного ковша

1.3.1 Приклад виробництва вогнетривких матеріалів

Вид вогнетривкого матеріалу залежить від конкретної галузі застосування та технологічних вимог. Для кожного матеріалу використовується свій метод виробництва, який відрізняється від інших матеріалів. Однак усі ці способи виробництва можна звести до однієї технологічної схеми, яка представлена на рисунку 1.3.

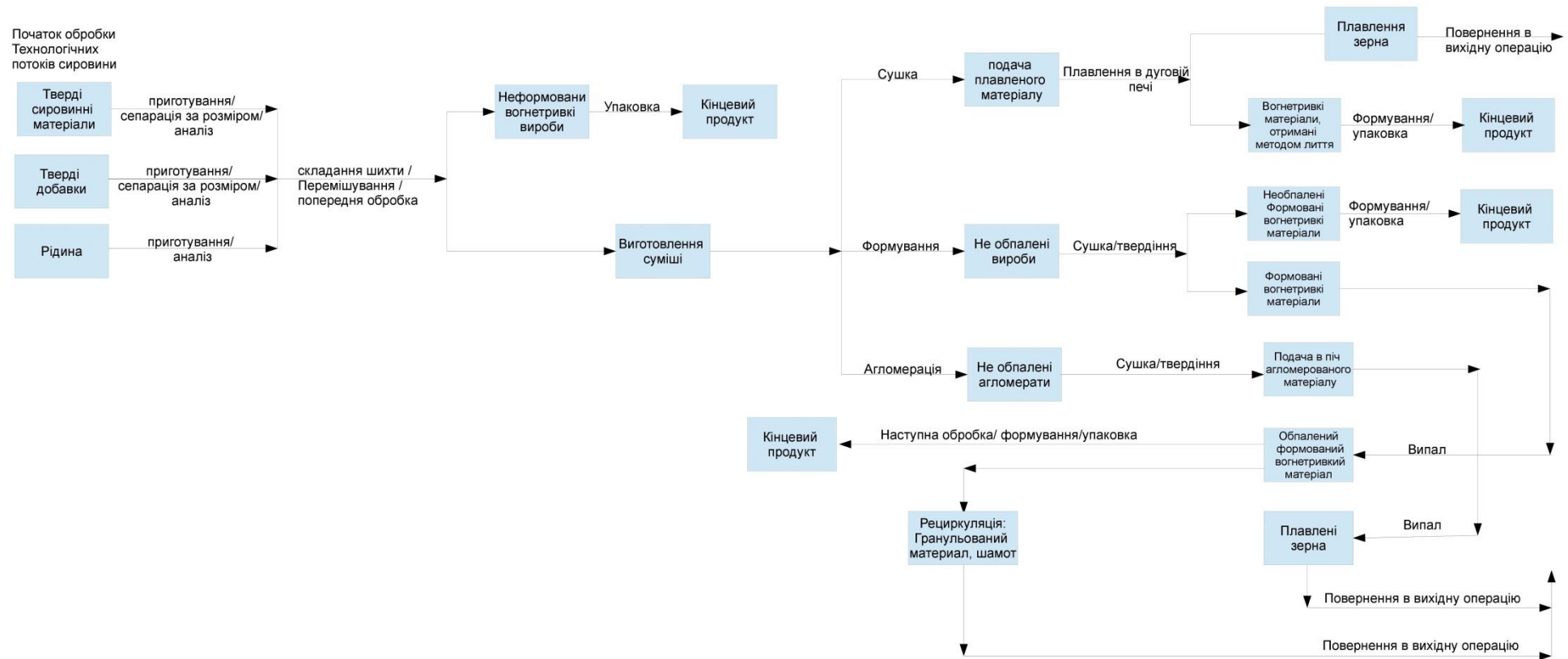


Рисунок 1.3 – Технологічна схема виробництва вогнетривких матеріалів

Шамотна цегла виготовляється з шамотної глини, глини-з'вязуючого та води. Шамотну глину виробляють у печі, що обертається, сполучну глину - в сушильному барабані, обжарювання суміші - в тунельній печі.

В обертову піч подається глина на шамот кількістю 4,48 кг/с з вологістю 22% [7].

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 випалу, 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

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

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

Кількість глини після сушіння, кг/с

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

Втрати при сушінні, кг/с

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

Кількість глини після випалу, кг/с

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

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

Втрати після випалу, кг/с

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

Кількість глини після транспортування, кг/с

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

де 0,1 % - втрати при транспортуванні.

Транспортні втрати на, кг/с

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

Кількість води, що подається в глиняну суміш для шамоту та на в'язуче, становить 0,32 кг/с.

Кількість води, шамотної та в'язучої глини, 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 під час пресування, кг/с

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

Сушіння матеріалу, кг/с

$$G_{\text{суш}} = 4,649 \cdot \frac{100 - 8}{100 - 2} \cdot \frac{100 - 0,5}{100} = 4,343,$$

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 печі, кг/с

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

Кількість матеріалу на виході з 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 1.3 та представлені на рисунках 1.4 та 1.5 у вигляді діаграм.

З кругової діаграми прибуткової частини, представленої на рисунку 1.4 видно, що найбільша частина матеріалів для виробництва шамоту припадає на шамотну глину. Найменший вміст – у воді, яка використовується для створення суміші.

Таблиця 1.3 - Прибуткова частина та витрати виробництва шамотної цегли

Найменування	Кількість, кг/с	% від загальної кількості
Прибуткова частина: - глина на шамот	4,48	66,87
– глина для зв'язки	1,9	28,4
– вода	0,32	4,73
Сума прибуткової частини	6,7	100
Витрати		
– глини на шамот при сушінні	0,99	39,47
– глини на шамот після прожарювання	0,45	17,94
– 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	2,508	100
Сума витрат та кінцевого матеріалу	6,7	-
Нев'язка виробництва	0	-

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



Рисунок 1.4 – Прибуткова частина виробництва шамотної цегли, %

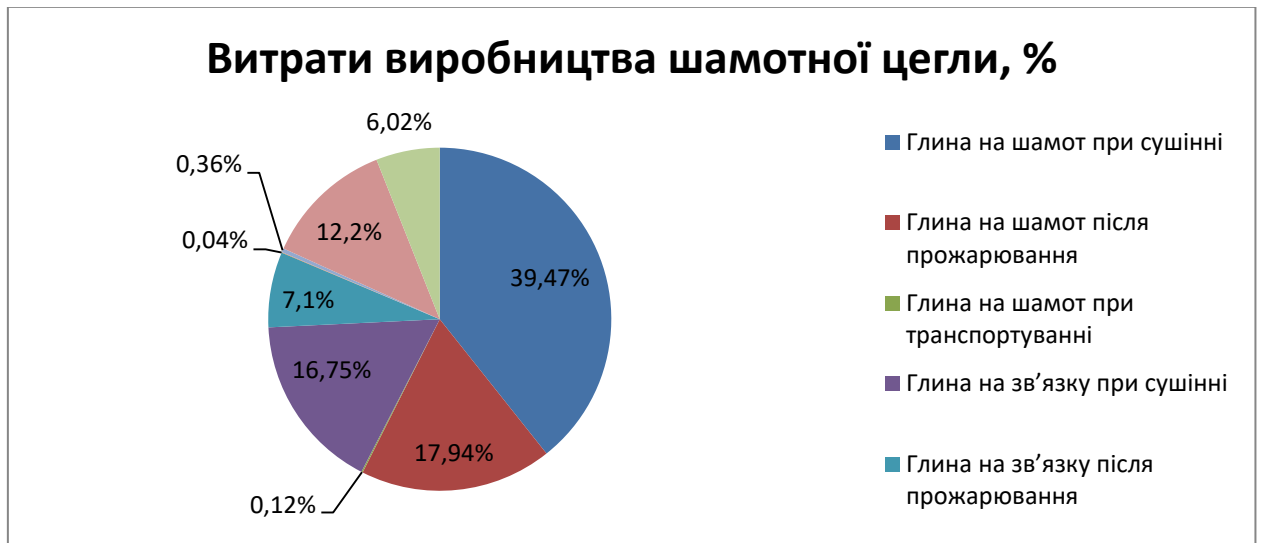


Рисунок 15 – Витрати виробництва шамотної цегли, %

Схема виробництва шамотної цегли представлена на рисунку 1.6. Графічне зображення процесу виробництва шамотної цегли потрібно для аналізу витрат та їх зменшення, а також для заходів пошуку вищого коефіцієнта теплопровідності. Це може бути співвідношення шамотна глина – глини для склеювання чи ще чогось.

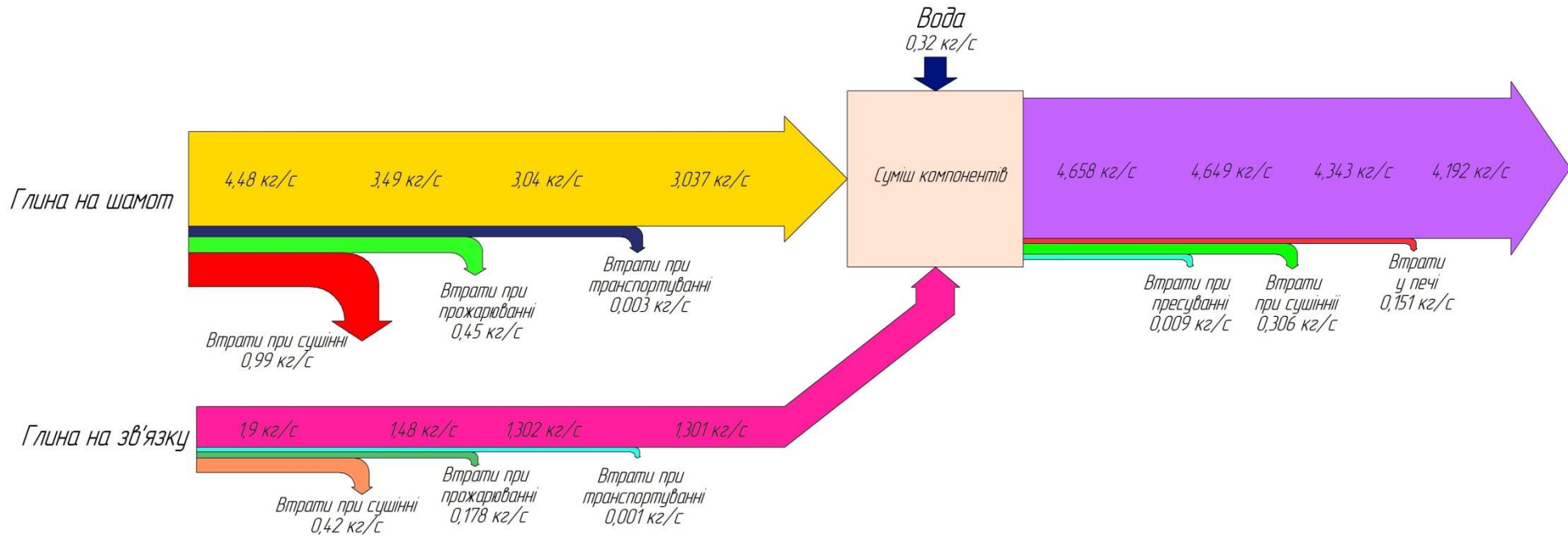


Рисунок 1.6 – Діаграма Сенкі виробництва шамотної цегли

Виробництво вогнетривів має складну технологічну схему (рис. 1.3), що включає подачу необхідних матеріалів, їх змішування, сушіння та формування. Для кожного матеріалу це своя послідовність, температурні режими, кількість сировини, що подається і т. д. У даній технологічній схемі не зазначені витрати, що виникають при виробництві, але при детальному розгляді виробництва будь-якого матеріалу їх необхідно враховувати. в обліковий запис. Це показано на схемі виробництва шамотної цегли, яка представлена на малюнку 1.6. До складу шамоту входять три компоненти – глина для шамоту, глина для склеювання та вода для суміші. При переробці глини спостерігаються відходи (при сушінні, випаленні та транспортуванні). Існують також витрати на обробку вже сформованого матеріалу. Побудовані таблиця та діаграми показують відсоткове співвідношення доходної та видаткової частини.

1.4 Енергетичний баланс виробництва вогнетривкої цегли для футеровки сталерозливного ковша

1.4.1 Енергетичний баланс обертової печі для опалу глини на шамот

1.4.1.1 Прибуткові статті балансу

Теплота горіння палива [10], кВт

$$Q_1^H = Q_H^P \cdot V = 31844 \cdot 0,4 = 12737,6,$$

де V -годинна витрата палива, м³/с;

Q_H^P – нижча теплота згорання, кДж/м³.

Фізична теплота, що вноситься паливом, кВт

$$Q_2^H = V \cdot V_B \cdot i_T = 0,4 \cdot 8,256 \cdot 98,78 = 326,21,$$

де i_T – ентальпія палива, що надходить на горіння, при $t_T = 75^\circ\text{C}$,
кДж/м³;

V_B – необхідний об'єм повітря, $\frac{\text{м}^3 \text{ (повітря)}}{\text{м}^3 \text{ (палива)}}$

$$\begin{aligned} V_B &= 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right] = \\ &= 0,0476 \left[0,5 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0 + 2 \cdot 85,8 + \left(2 + \frac{6}{4} \right) \cdot 0,2 \right. \\ &\quad \left. + (3 + 2) \cdot 0,1 + \left(4 + \frac{10}{4} \right) \cdot 0,1 + \left(5 + \frac{12}{4} \right) \cdot 0 - 0 \right] = 8,256. \end{aligned}$$

Теплота екзотермічної реакції, кВт

$$Q_3^п = 5,65 \cdot G \cdot \frac{y}{100} = 5,65 \cdot 4,48 \cdot \frac{1}{100} = 0,253,$$

де G - маса матеріалу, кг/с.

Сумарна теплота прибутку, кВт

$$Q_{\text{приб}} = Q_1^п + Q_2^п + Q_3^п = 12737,6 + 326,21 + 0,253 = 13064,063.$$

1.4.1.2 Витрата тепла

Теплота на сушіння матеріалу, кВт

$$Q_1^в = G_{\text{ш.суш}} \cdot c_p \cdot \Delta t = 4,48 \cdot 1,09 \cdot (700 - 20) \cdot \frac{100 - 22}{100 - 8} = 2815,27,$$

де 22% - початкова волога, %;

8 % - кінцева волога, %;

$G_{\text{ш.суш}}$ – маса поданого на сушіння матеріалу, кг/с;

c_p – теплоємність глини, кДж/(кг · К);

Теплота на кальцінацію матеріалу, кВт

$$Q_2^B = G_{ш.пр} \cdot c_p \cdot \Delta t = 3,49 \cdot 1,09 \cdot (1000 - 700) = 1141,23.$$

Теплота на спікання матеріалу, кВт

$$Q_3^B = G_{ш.пр} \cdot c_p \cdot \Delta t = 3,49 \cdot 1,09 \cdot (1200 - 1000) = 760,82.$$

Теплота, яка втрачається при охолодження матеріалу, кВт

$$Q_4^B = G_{ш.пр} \cdot c_p \cdot \Delta t = 3,04 \cdot 1,09 \cdot (1200 - 60) = 3777,5$$

Теплота, що відводиться газами, кВт,

$$Q_5^B = B \cdot V_{\Gamma} \cdot C_{ог} \cdot t_{ог} = 0,4 \cdot 9,269 \cdot 1,38 \cdot 300 = 1534,95,$$

$C_{ог}$ – питома теплоємність газів, що відходять при їх температурі на виході з печі, $t_{ог} = 300$ °С, кДж/(кг °С)

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

$V_{пс}$ – об'ємні частки димових газів, м³/м³

$$V_{\Gamma} = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} = 6,659 + 0,87 + 1,74 = 9,269,$$

Теоретичний об'єм азоту, $\frac{\text{м}^3(\text{газів})}{\text{м}^3(\text{палива})}$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_B + \frac{N_2}{100} = 0,79 \cdot 8,256 + \frac{13,7}{100} = 6,659,$$

Визначаємо об'єм триатомних газів, $\frac{\text{м}^3 (\text{газів})}{\text{м}^3 (\text{палива})}$,

$$V_{RO_2} = 0,01[CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_mH_n] = 0,01[0,1 + 0 + 0 + 1 \cdot 85,8 + 2 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1] = 0,87,$$

Теоретичний об'єм водяних парів визначимо за формулою, $\frac{\text{м}^3 (\text{газів})}{\text{м}^3 (\text{палива})}$

$$V_{H_2O} = 0,01 \left[H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124 d_{\text{г.тл.}} \right] = 0,01 [0 + 0 + 2 \cdot 85,8 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,1 + 0,124 \cdot 10] = 1,74,$$

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

Втрати тепла в навколишнє середовище, кВт

$$Q_6^p = 0,2 \cdot Q_H^p \cdot B = 2547,52.$$

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

Сумарна теплота витрат, кВт

$$Q_{\text{витр}} = Q_1^B + Q_2^B + Q_3^B + Q_4^B + Q_5^B + Q_6^B = 2815,27 + 1141,23 + 760,82 + 3777,5 + 1534,95 + 2547,52 = 12577,29.$$

Невизначені витрати, кВт

$$Q_{\text{невизн}} = Q_{\text{приб}} - Q_{\text{витр}} = 13064,063 - 12577,29 = 486,773.$$

Результати розрахунків внесені у таблицю 1.5 та зображені на рисунку

1.7.

Таблиця 1.4 – Енергетичний баланс обертової печі

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



Рисунок 1.7 – Діаграма Сенкі енергетичного балансу обертової печі

З діаграми, зображеної на рисунку 1.7 видно, що найбільші витрати – витрати при охолодженні матеріалу та витрати теплоти на сушіння матеріалу.

1.4.2 Енергетичний баланс сушильного барабана для опалу глини для зв'язки.

1.4.2.1 Прибуткові статті балансу:

Теплота від горіння палива, кВт

$$Q_1^п = Q_n^р \cdot B = 31844 \cdot 0,05 = 1592,2,$$

де B-годинна витрата палива, м³/с;

Q_H^p – нижча теплота згорання, кДж/м³.

Фізична теплота, що вноситься паливом, кВт

$$Q_2^п = V \cdot V_B \cdot i_T = 0,05 \cdot 8,256 \cdot 98,78 = 40,78,$$

де i_T – ентальпія палива, що надходить на горіння, при $t_T = 75$ °С, кДж/м³;

V_B – необхідний об'єм повітря, $\frac{\text{м}^3 \text{ (повітря)}}{\text{м}^3 \text{ (палива)}}$.

Теплота екзотермічної реакції, кВт

$$Q_3^п = 5,65 \cdot G \cdot \frac{y}{100} = 5,65 \cdot 1,9 \cdot \frac{1}{100} = 0,107,$$

де G - маса матеріалу, кг/с.

Сумарна теплота прибутку, кВт

$$Q_{\text{приб}} = Q_1^п + Q_2^п + Q_3^п = 1592,2 + 40,78 + 0,107 = 1633,087,$$

1.4.2.2 Витрата тепла

Теплота на сушіння матеріалу, кВт

$$Q_1^B = G_{\text{гл.суш}} \cdot c_p \cdot \Delta t = 1,9 \cdot 1,09 \cdot (95 - 20) = 155,33,$$

$G_{\text{гл.суш}}$ – маса поданого на сушіння матеріалу, кг/с;

c_p – теплоємність глини, кДж/(кг · К).

Теплота на прожарювання матеріалу, кВт

$$Q_2^B = G_{\text{гл.пр}} \cdot c_p \cdot \Delta t = 1,48 \cdot 1,09 \cdot (225 - 95) = 209,72.$$

Теплота, що втрачається на охолодження матеріалу, кВт

$$Q_3^B = G_{\text{гл.пр}} \cdot c_p \cdot \Delta t = 1,302 \cdot 1,09 \cdot (225 - 60) = 233,81.$$

Теплота, що відводиться газами, кВт,

$$Q_4^B = B \cdot V_T \cdot C_{ог} \cdot t_{ог} = 0,05 \cdot 9,269 \cdot 1,37 \cdot 150 = 95,24,$$

$C_{ог}$ – питома теплоємність газів, що відходять при їх температурі на виході з печі, $t_{ог} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, кДж/(кг $^\circ\text{C}$)

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

$V_{пс}$ – об'ємні частки димових газів, м³/м³.

Втрати тепла в навколишнє середовище, кВт

$$Q_5^p = 0,2 \cdot Q_H^p \cdot B = 318,44.$$

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

Сумарна теплота витрат, кВт

$$Q_{\text{витр}} = Q_1^B + Q_2^B + Q_3^B + Q_4^B + Q_5^B = 155,33 + 209,72 + 233,81 + 95,24 + 318,44 = 1012,5.$$

Невизначені витрати, кВт

$$Q_{\text{невизн}} = Q_{\text{приб}} - Q_{\text{витр}} = 1633,087 - 1012,5 = 620,59.$$

Результати розрахунків внесені у таблицю 1.5 та зображені на рисунку 1.8.

Таблиця 1.5 – Енергетичний баланс сушильного барабана

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



Рисунок 1.8 – Діаграма Сенкі енергетичного балансу сушильного барабана

З діаграми на рисунку 1.8 видно, що найбільші витрати – це невизначені витрати; найменший – витрата тепла, що відводиться газами.

1.4.3 Випалення цегли у тунельній печі

1.4.3.1 Прибуткові статті балансу

Теплота від горіння палива, кВт

$$Q_1^п = Q_H^p \cdot V = 31844 \cdot 0,54 = 17195,76,$$

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

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

Фізична теплота, що вноситься паливом, кВт

$$Q_2^H = V \cdot V_B \cdot i_T = 0,54 \cdot 8,256 \cdot 98,78 = 440,38,$$

де i_T – ентальпія палива, що надходить на горіння, при $t_T = 75^\circ \text{C}$,
кДж/м³;

V_B – необхідний об'єм повітря, $\frac{\text{м}^3 \text{ (повітря)}}{\text{м}^3 \text{ (палива)}}$.

Теплота екзотермічної реакції, кВт

$$Q_3^H = 5,65 \cdot G \cdot \frac{y}{100} = 5,65 \cdot 4,649 \cdot \frac{1}{100} = 0,26,$$

де G - маса матеріалу, кг/с.

Сумарна теплота прибутку, кВт

$$Q_{\text{приб}} = Q_1^H + Q_2^H + Q_3^H = 17195,76 + 440,38 + 0,26 = 17636,4$$

1.4.3.2 Витрата тепла

Теплота на сушіння матеріалу, кВт

$$Q_1^B = G \cdot c_p \cdot \Delta t = 4,649 \cdot 1,09 \cdot (100 - 60) = 202,7,$$

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

c_p – теплоємність цегли, кДж/(кг · К).

Теплота на прожарювання матеріалу, кВт

$$Q_2^B = G \cdot c_p \cdot \Delta t = 4,343 \cdot 1,09 \cdot (1450 - 100) = 6390,72.$$

Теплота, що втрачається при охолодження матеріалу, кВт

$$Q_3^B = G \cdot c_p \cdot \Delta t = 4,256 \cdot 1,09 \cdot (1450 - 75) = 6378,68.$$

Теплота, що відводиться газами, кВт,

$$Q_4^B = B \cdot V_{\Gamma} \cdot C_{\text{ог}} \cdot t_{\text{ог}} = 0,54 \cdot 9,269 \cdot 1,37 \cdot 100 = 685,72,$$

$C_{\text{ог}}$ - питома теплоємність газів, що відходять при їх температурі на виході з печі, $t_{\text{ог}} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, кДж/(кг $^{\circ}\text{C}$)

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

V_{Γ} - об'ємні частки димових газів, м³/м³

Втрати тепла в навколишнє середовище, кВт

$$Q_5^P = 0,2 \cdot Q_{\text{н}}^P \cdot B = 3439,15.$$

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

Сумарна теплота витрат, кВт,

$$Q_{\text{витр}} = Q_1^B + Q_2^B + Q_3^B + Q_4^B + Q_5^B = 202,73 + 6391,29 + 6509,65 + 685,72 + 3439,15 = 17097,5.$$

Невизначені витрати, кВт

$$Q_{\text{невизн}} = Q_{\text{приб}} - Q_{\text{витр}} = 17636,4 - 17097,5 = 538,9.$$

Результати розрахунків внесені у таблицю 1.6 та зображені на рисунку 1.9.

Таблиця 1.6 – Енергетичний баланс тунельної печі

Прибуток	кВт	%
Теплота горіння палива	17195,76	97,5
Фізична теплота, що вноситься паливом	440,38	2,497
Теплота екзотермічної реакції	0,26	0,003
Сумарна теплота прибутку	17636,4	100
Витрати	кВт	%
Теплота на сушіння матеріалу	202,7	1,2
Теплота на прожарювання матеріал	6391,29	37,4
Теплота, яка втрачається при охолодження матеріалу	6378,68	37,3
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	

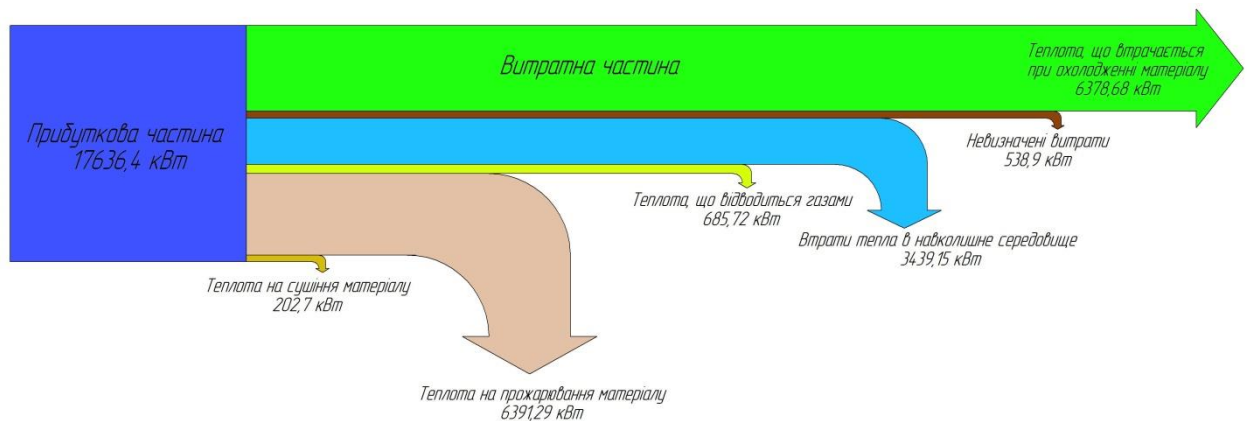


Рисунок 1.9 – Діаграма Сенкі енергетичного балансу тунельної печі

Зі схеми, представленої на рис. 1.9, видно, що найбільші витрати становлять витрати на охолодження матеріалу та витрати тепла на прожарювання матеріалу; найменший – витрати тепла на сушіння матеріалу.

2 ВИВЧЕННЯ ШЛЯХІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕФЕКТИВНОГО КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОГNETРИВІВ

2.1 Поширені методи дослідження ефективного коефіцієнту теплопровідності

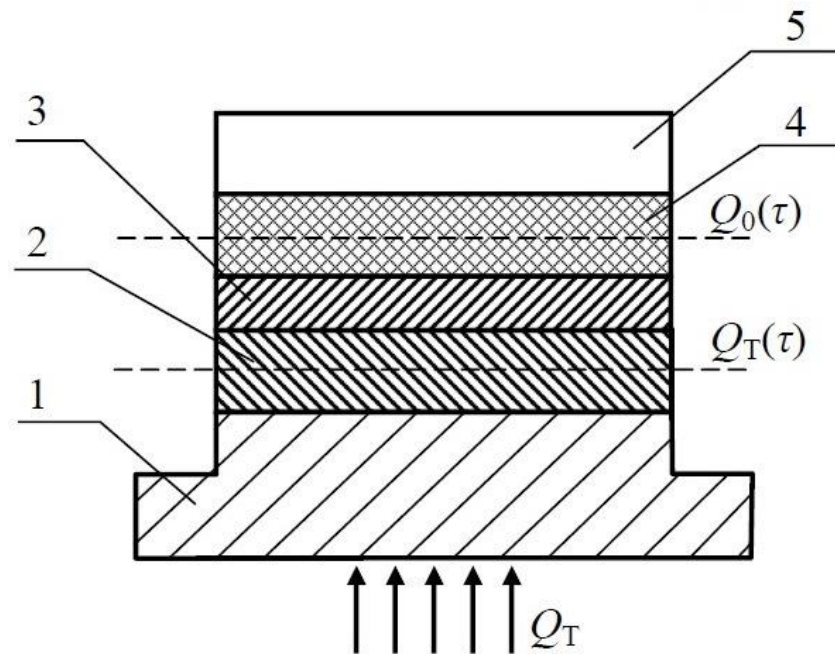
При виборі методу дослідження теплофізичних властивостей матеріалів необхідно враховувати можливість технічної реалізації та склад матеріалу, а також спосіб одержання об'єкта. Аналогічно предмет повинен перебувати в тому стані, в якому він використовується у промисловості (у вигляді цегли, сипких матеріалів або плит).

Дослідження теплопровідності матеріалів проводиться у двох режимах – стаціонарному та нестаціонарному. При стаціонарному дослідженні немає зміни температури з часом.

1) Метод стаціонарного плоского шару [11].

Для визначення коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів використовується метод динамічного калориметра з термометром та адіабатичною оболонкою (рис. 2.1).

Зразок для випробувань 4 міститься між опорним мідним стрижнем 5 і мідною контактною пластиною 3. Зразок для випробувань монотонно нагрівається тепловим потоком, що виходить від стенду 1. Деталь надходить через термометр теплового потоку $Q_T(\tau)$ витрачається на нагрівання зразка ($Q_0(\tau)$). Температурне поле зразка 4 та пластини 2 можна вважати лінійним.



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

Рисунок 2.1 – Схема монтажу методом плоского шару

Коефіцієнт теплопровідності зразка визначається за формулою

$$\lambda = \frac{h}{R \cdot S'}$$

де h – висота зразка, м;

S – площа поперечного перерізу зразка, м²;

R – тепловий опір зразка, К·м²/Вт

$$R = \frac{\Delta T \cdot (1 + k)}{\Delta T_1 \cdot K(t)} - Rk$$

де ΔT , ΔT_1 – перепад температури на зразку і пластині, К;

$K(t)$ - теплова провідність тепломіра;

Rk - поправка, що враховує теплові опору контакту між стрижнем 5 і пластиною 3, а також контактів термопар з поверхнями;

k - поправка, що враховує вплив теплоємності зразка.

Поправка Rk і тепла провідність тепломіра $K(t)$ визначається градуировкой з використанням еталонних зразків з кварцового скла і міді.

Тепловий потік, що проходить через зразок і поглинається стрижнем, Вт

$$Q_0(\tau) = \frac{\Delta T \cdot S}{R_1} = \left(\frac{1}{2} C_0 + C_c \right) b$$

де R_1 – тепловий опір між стрижнем і контактною пластиною, $K \cdot m^2 / W$;

C_0 – повна теплоємність зразка, Дж/К;

C_c – повна теплоємність стрижня, Дж/К;

b – швидкість нагрівання вимірювальної комірки, К/с.

Тепловий потік, що проходить через середній переріз пластини, Вт

$$Q_T(\tau) = \left(\frac{1}{2} C_T + C_{II} + C_0 + C_c \right) b$$

де C_T – повна теплоємність пластини, Дж/К;

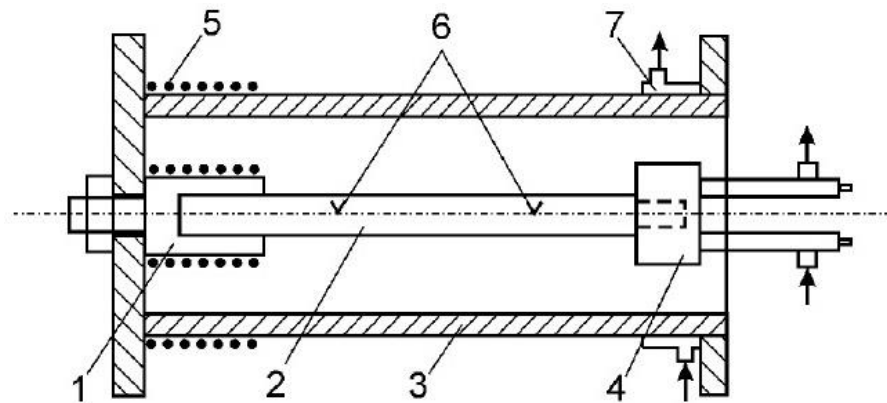
C_{II} – повна теплоємність контактної пластини, Дж/К.

2) Метод поздовжнього теплового потоку [11].

Метод поздовжнього теплового потоку широко використовується при дослідженні металів та інших матеріалів з відносно високою теплопровідністю. На одному з кінців довгого зразка з площею поперечного перерізу S створюється рівномірний тепловий потік Q . Вимірюється різниця температур між двома ділянками зразка, розташованими на відстані l один

від одного. За відсутності бічних теплових втрат теплопровідність зразка розраховують за формулою $\Delta t_1 = t_1 - t_2$.

$$\lambda = \frac{Q \cdot l}{S \cdot (t_1 - t_2)}$$

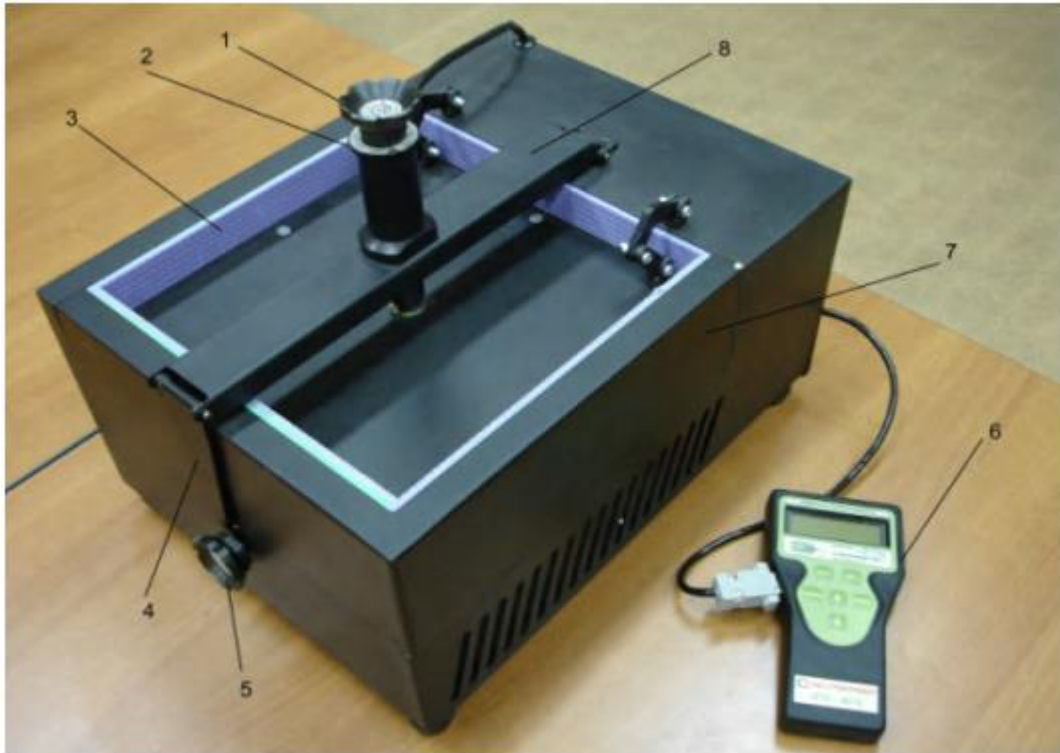


1 - блок нагрівача; 2 - зразок; 3 - охоронний циліндр; 4, 7 - холодильники; 5 - нагрівач охоронного циліндра; 6 – термопари.

Рисунок 2.2 – Схема установки з методу продольного теплового потоку

3) Вимірювання коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів [11].

Вимірювач теплопровідності ІТП-МГ4 «250» призначений для визначення теплопровідності та термічного опору теплозахисних та теплоізоляційних матеріалів, призначених для теплоізоляції енергетичного обладнання та трубопроводів у стаціонарному тепловому режимі. Конструктивно вимірювач теплопровідності виконаний як двох блоків: електронного блока; установки для нагрівання (охолодження) зразка із блоком управління.



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 ІТП-МГ4 «250»

Принцип дії вимірювача теплопровідності ІТП-МГ4 «250» полягає у створенні стаціонарного теплового потоку, що проходить через плоский зразок певної товщини та спрямованого перпендикулярно торцевим граням зразка, вимірювання товщини зразка, щільність теплового потоку та температура протилежних граней.

У верхній частині установки розташовані притискний гвинт 1 вимірювальний пристрій 2 для вимірювання товщини зразка і динамометричний пристрій з храповим механізмом для створення постійної сили притискання зразка. Електронний блок включає схеми вимірювання, управління і регулювання. Розрахунок коефіцієнта теплопровідності та

теплового опору випробуваного зразка R_n здійснюється 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 лицьової грані досліджуваного зразка, $^{\circ}\text{C}$.

Також розроблено ряд промислових приладів, наведених у таблиці, визначення коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів різного будови.

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 λ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
ІТО-20	Тверді	20–100	0,1–5,0
ІТЕМ-1(1М)	Метали, сплави, кераміка	50–100	0,2–80,0
ІТ- λ -20	тверді	20–100	0,1–10,0
ІТ- λ -400	Пластмаса, скло, кераміка	20–400	0,1–5,0
ІТ-с λ -400	Тверді	–150–+400	0,2–20,0
КДМ- λ -900	Тверді	50–900	10–100
РКТ-20	М'які, хутра, шкіра, тканини	20	0,03–1,50
ІТС-2	теплоізоляція	20–400	0,1–5,0

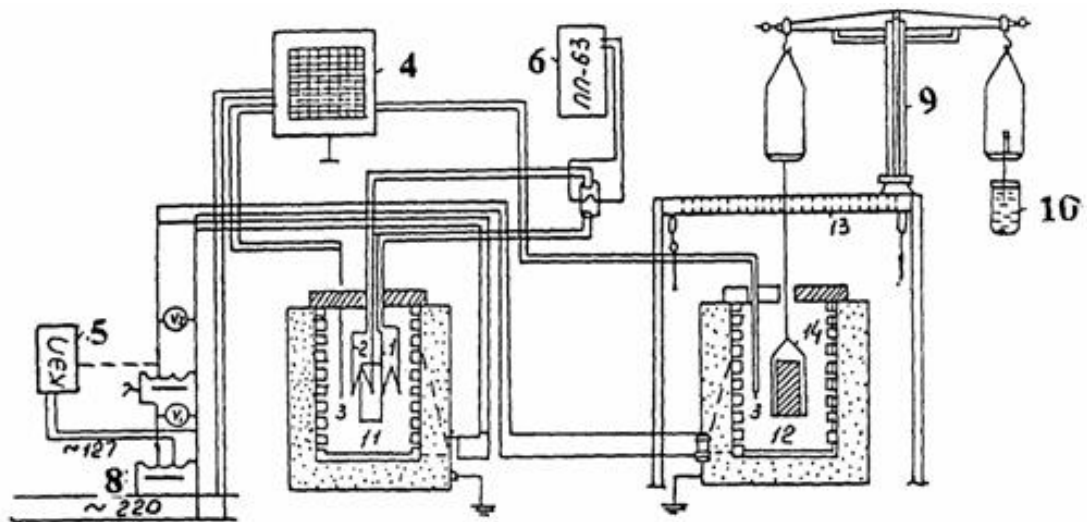
ІТП-МГ4 «100/250»	теплоізоляція	15–60	0,02–1,50
ІТСМ-1	грубодисперсні	–150– +100	0,02–1,50

4) Дослідження тепломасообміну у процесі випалу [12]

При обробці експериментального матеріалу вивчення процесів випалу використовують методи хімічної термодинаміки, термодинаміки незворотних процесів чи емпіричних рівнянь.

Диференціальне рівняння теплопередачі, ускладненої масопереносом, 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 тепломасообміну в процесі випалу

У цій установці використовується методика автоматичної реєстрації диференціальних кривих нагріву модельних зразків.

Реєстрація кривих нагріву здійснювалася в ході досліджень на спеціальній установці, представлений на рис. 2.4. До його складу входять дві

однакові електротигельні печі (11, 12) внутрішнім діаметром $100 \cdot 10^{-3}$ м та глибина тигля $200 \cdot 10^{-3}$ м з відкритою електричною котушкою потужністю 2,5 кВт.

Для вирівнювання температури в робочій камері в піч вставляють вогнетривкі стекла. Також духовки оснащені автоматичними програмними регуляторами швидкості підвищення температури. Живлення печі здійснюється через автотрансформатор (7) у заданому режимі за допомогою КЕП12У (5).

На початку роботи вихід автотрансформатора вручну подається напруга $U_{нач}$, величина якого залежить від вибраного режиму і контролюється вольтметром (V2). Вибір режиму ґрунтується на розв'язанні задач з нагрівання тіла, температура якого змінюється за лінійним законом (нагрівання з постійною швидкістю).

Ізотермічне старіння у печах здійснювалося за допомогою електронного потенціометра (4). Для виключення впливу коливань напруги в мережі режим роботи блоку живлення напруга, що подається на регулюючий автотрансформатор (7), подавалася з мережі через трансформатор (8), а його стабільність контролювалася за допомогою вольтметра. (В1).

Для вивчення кінетики втрати маси досліджуваних модельних зразків використовувався спеціально розроблений пристрій на основі технічних ваг (9). Циліндричний зразок містив гарячі спаї двох диференціальних платино-платинородієвих термопар, як показано на рис. 2.4.

Одна диференціальна термопара використовувалася для вимірювання різниці температур між середовищем печі та поверхнею зразка, інша - різниця температур між середовищем печі та центром зразка, а третя - температура середовища у печі. Нагрівання циліндра з встановленими в ньому термопарами здійснювалося в електропечі експериментальної установки при строгому тепловому режимі. Кінці термопар підключалися до потенціометрів ПП63 (6), і їх показання після початку нагрівання зразка записувалися кожні п'ять хвилин. Для отримання кривих масопереносу після

зважування досліджуваній зразок підвішувався до лівої чашки терезів за допомогою дротяного (ніхромового) кошика і опускався в робочу камеру печі. Тоді ваги зрівнялися. До правої чашки ваг підвішувалась занурена у воду пластина (10), а для виключення впливу теплового потоку між вагами та піччю був встановлений металевий ящик з водяним охолодженням (13).

При заданому режимі нагрівання, що відповідає постановці наших завдань, рішення рівняння теплопередачі має такий вигляд

$$a_e = vR^2 / \Gamma(t_{II} - t_{II}),$$

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

де a_e – ефективний коефіцієнт температуропровідності;

c_e – ефективна теплоємність;

v - швидкість нагріву середовища в печі;

R - радіус зразка;

Γ - постійна (для необмеженого циліндра - 4, для необмеженої пластини - 3, для кулі - 6);

t_{II} – температура поверхні тіла;

t_{II} – температура центру тіла;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

γ_0 – щільність обпаленого зразка.

2.2 Побудова залежності теплопровідності від температури термообробки та хімічного складу

Вогнетриви, які відносяться до класу "Алюмосилікат", основними хімічними компонентами яких є Al_2O_3 та SiO_2 , мають багато різних товарних позицій. Хімічний склад значно впливає на коефіцієнт теплопровідності. Також одним із важливих факторів, що впливають на коефіцієнт теплопровідності, є температура обробки виробу та вогнестійкість матеріалу.

Проаналізовано велику кількість літератури з вогнетривів цього класу, виключено грубі помилки серії. Відібрані дані сумовані у Таблиці 2.2.

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

	$t_{обр}, ^\circ\text{C}$	$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$	$\text{SiO}_2, \%$	$t_{вогн}, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
[13]	1500	40	50	1740	1,06
[13]	1500	35	55	1730	1
[13]	1500	30	59	1570	1
[13]	1500	30	59	1680	1
[13]	1500	40	50	1570	1,06
[13]	1500	35	55	1580	1
[13]	1500	30	64	1580	1
[13]	1500	20	64	1600	1
[13]	1500	62	34	1600	1,39
[13]	1500	70	28	1700	1,32
[2]	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
[14]	1500	39,64	55,98	1730	1,06
[14]	1500	31,78	65,04	1680	0,96
[14]	1500	35,06	56,06	1720	1,03
[14]	1500	40,29	57,06	1760	1,06
[14]	1500	33,82	58,96	1670	1,05
[14]	1500	36,25	57,62	1690	1,06
[14]	1500	31,7	61,32	1670	0,96
[14]	1500	32,9	62,24	1700	0,94
[14]	1500	36,88	56,92	1720	1,06
[14]	1500	36,01	58,04	1690	1,06
[14]	1400	17,21	69,42	1670	0,84
[14]	1400	27,08	69,51	1670	0,92
[14]	1400	26,31	67,16	1580	0,94
[14]	1400	25,76	70,16	1670	0,93
[14]	1400	26,89	67,56	1690	0,92
[14]	1400	24,79	69,68	1670	0,82
[14]	1400	30,93	63,84	1680	0,81

За даними таблиці побудовано графіки залежності хімічного складу та вогнестійкості від коефіцієнта теплопровідності

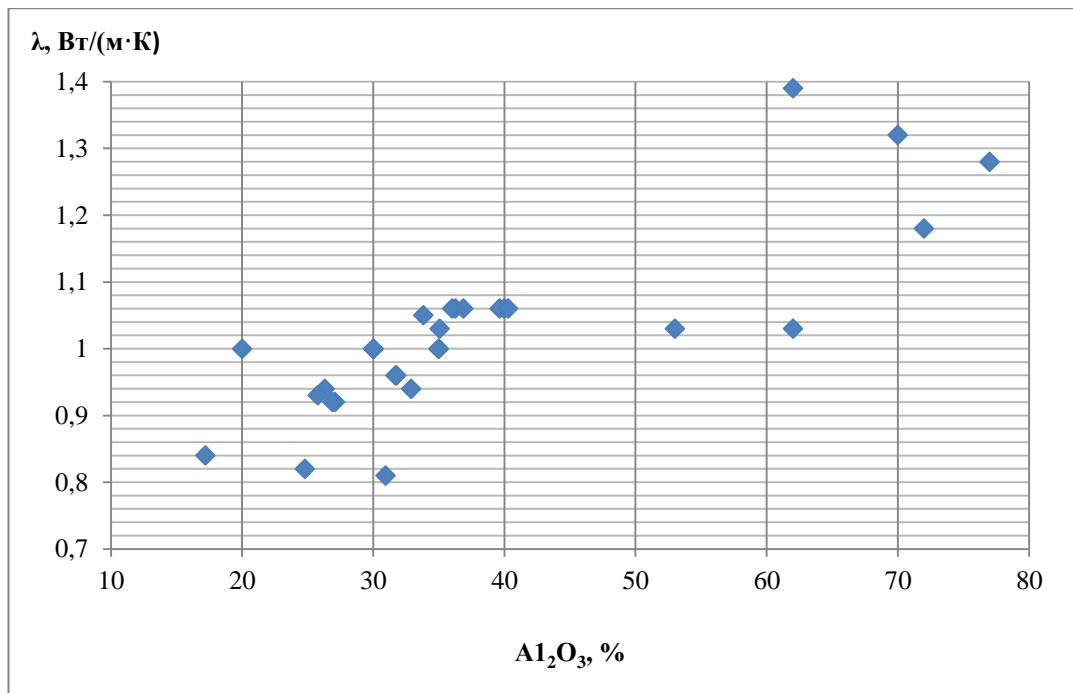


Рисунок 2.5 – Залежність λ , Вт/(м·К) від Al_2O_3 , %

З графіка видно, більшість значень коефіцієнта теплопровідності перебуває у межах 0,92-1,06 Вт/(м·К), тоді як зміст Al_2O_3 перебуває у межах 20-62%. Продукти з таким вмістом Al_2O_3 , згідно з табл. 1.1, відносяться до напівкислих, шамотних та полікремнистих груп. Також можна помітити, що найвищі значення коефіцієнта теплопровідності мають вироби з підвищеним вмістом Al_2O_3 , а найменші значення з низьким вмістом Al_2O_3 . Тобто вміст Al_2O_3 суттєво впливає на коефіцієнт теплопровідності.

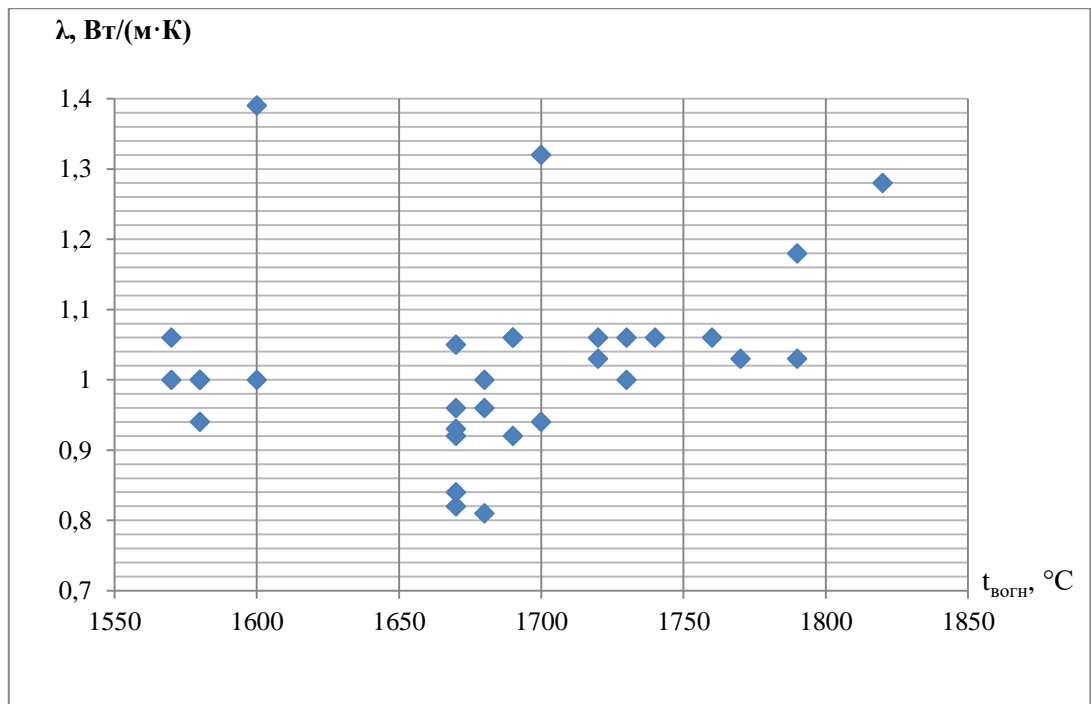


Рисунок 2.6 – Залежність $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ від $t_{\text{вогн}}, ^\circ\text{C}$

З графіка видно, що найбільші значення коефіцієнта теплопровідності по відношенню до вогнестійкості знаходяться в межах 0,81-1,06 Вт/(м К), а температура знаходиться в межах 1670-1790 °С. Найбільше значення коефіцієнта теплопровідності спостерігається за відносно низької температури вогнетривкості. Значення коефіцієнта теплопровідності, трохи менше максимального, відповідає високій температурі вогнетривкості. Тобто визначити точну залежність значень коефіцієнта теплопровідності від температури вогнетривкості неможливо.

2.3 Знаходження оптимальних теплофізичних характеристик цегли

Для отримання оптимальних значень теплофізичних характеристик цегли використовувалася програма STATISTICA 10. Для аналізу було взято дані таблиці 2.2.

У програмі STATISTICA 10 у вкладці "Аналіз" обрано команду "Планування експерименту" - "Плани центральної композиції, плани поверхонь" (рис. 2.6).

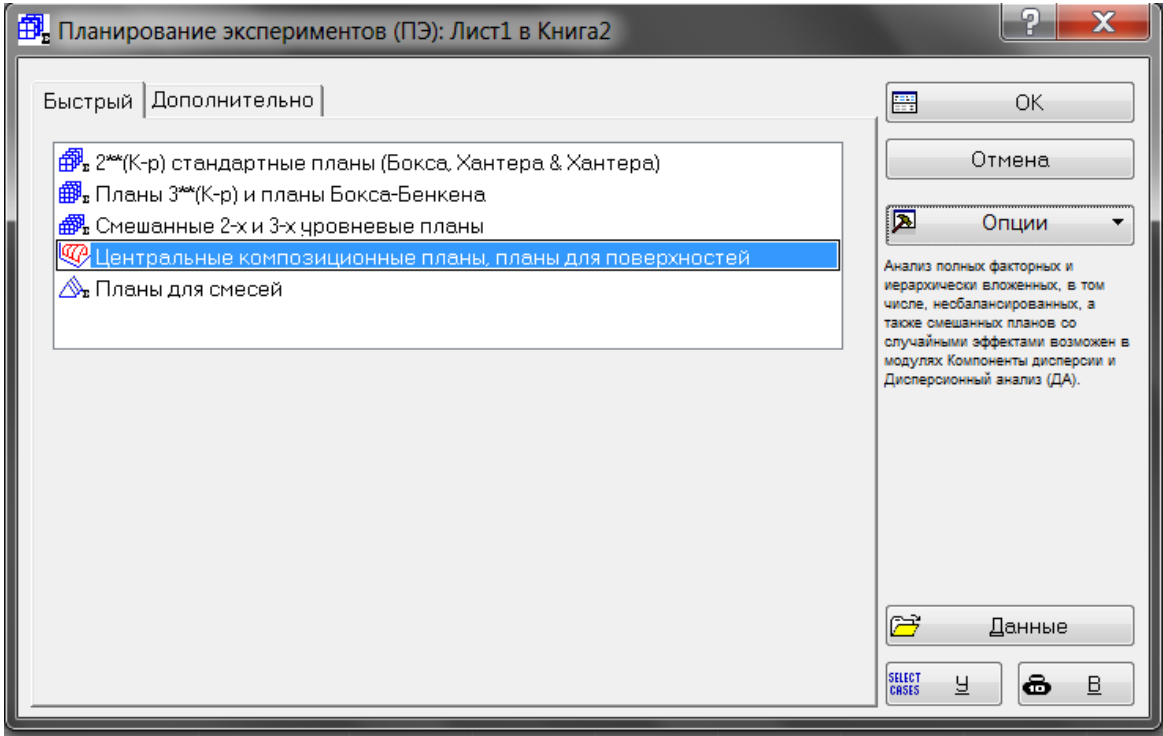


Рисунок 2.6 – Вибір метода аналізу даних

У вікні «Аналіз плану» вибираємо змінні: залежні змінні – вогнетривкість за коефіцієнтом теплопровідності, незалежні змінні (фактори) – температура обробки та хімічний склад вогнетривкості (рисунок 2.7).

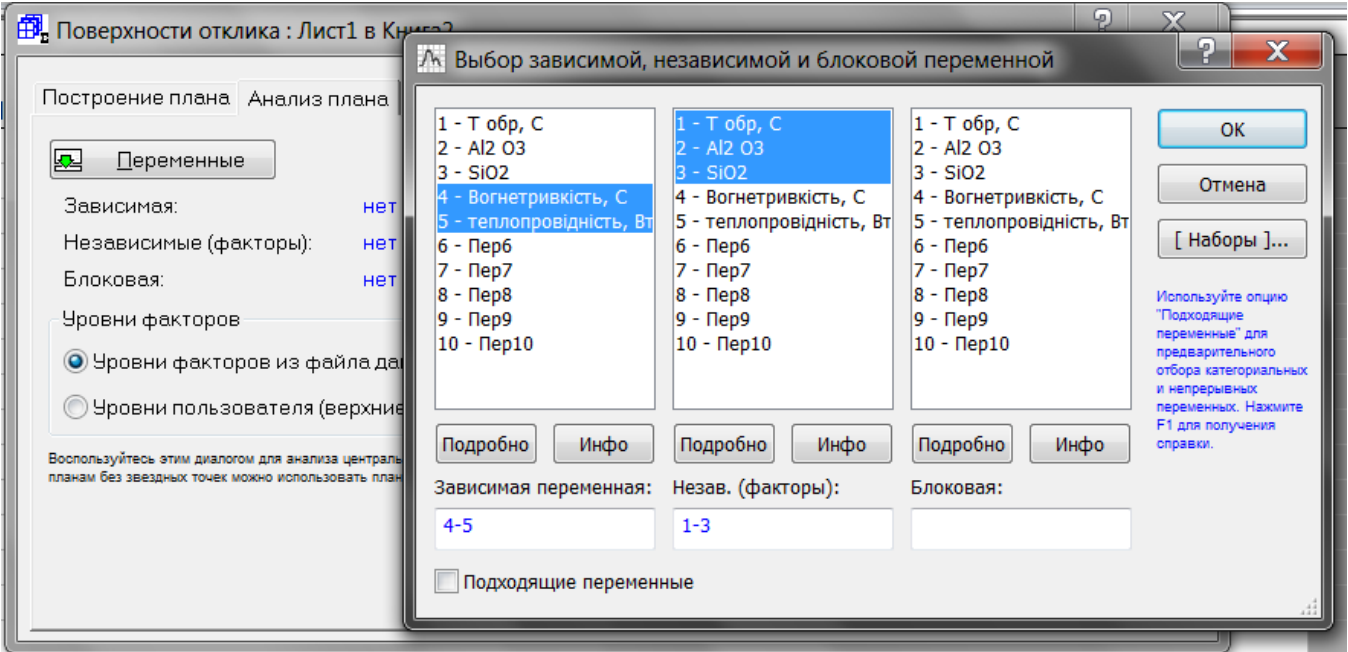


Рисунок 2.7 – Вибір залежних та незалежних змінних

У вікні виберіть вкладку «Дисперсійний аналіз/Ефекти». Тут ви можете змінити довірчий інтервал та альфа (рівень вибору). Вкладка «Дисперсійний аналіз/Ефекти» показана малюнку 2.8.

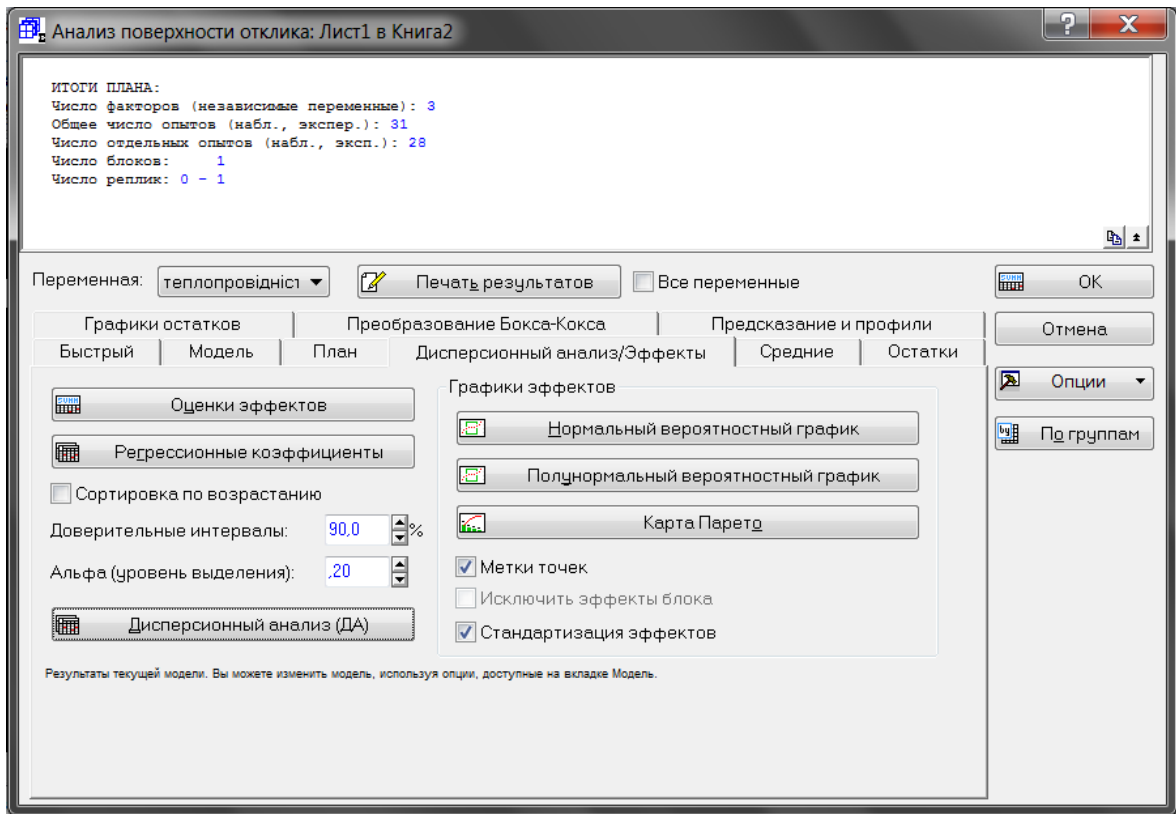


Рисунок 2.8 – Вкладка «Дисперсійний аналіз/Ефекти»

Довірчий інтервал визначає розраховані довірчі інтервали для всіх відповідних параметрів. Вибраний довірчий інтервал становить 90%.

Альфа (рівень вибору) визначає критерій статистичної значущості всім відповідних параметрів у діалоговому вікні. Вибрана альфа дорівнює 0,2. У таблиці «Коефіцієнти регресії» виділено значення, що входять до рівня 0,2 (дані виділені курсивом). Вибрані коефіцієнти використовують у рівнянні регресії.

Рівняння регресії було обрано з лінійним, квадратичним та парним коефіцієнтом.

Таблиця 2.3 – Коефіцієнти регресії вогнетривкості

	Регрес. коэф.	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 вогнестійкості у кодованій формі мають такий вигляд.

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

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.

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

За таблиць видно, що більшість отриманих даних входить у довірчий інтервал 0,2. Це свідчить про те, що похибка отриманих даних дуже мала.

В обох випадках матриця планування має такий вигляд

Таблиця 2.5 – Матриця планування експерименту

№ експер.	X ₁	X ₂	X ₃
1	1	1	1
2	1	-1	1
3	-1	1	1
4	-1	-1	1
5	1	1	-1
6	1	-1	-1
7	-1	1	-1
8	-1	-1	-1

Декодовані коефіцієнти мають значення, наведені у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Фактори для проведення експерименту

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

Декодовані рівняння мають такий вигляд:

- за температурою вогнетривкості

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

- для коефіцієнта теплопровідності

$$\lambda_{\text{еф}} = -60,6419 + 0,0318 \cdot t_{\text{обр}} + 0,4940 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,9326 \cdot X_3 - 0,0023 \cdot (\text{SiO}_2)^2 - 0,0002 \cdot t_{\text{обр}} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 0,0004 \cdot t_{\text{обр}} \cdot \text{SiO}_2.$$

На вкладці "Прогноз та профілі" виберіть вкладку "Профілі відповіді бажаності".

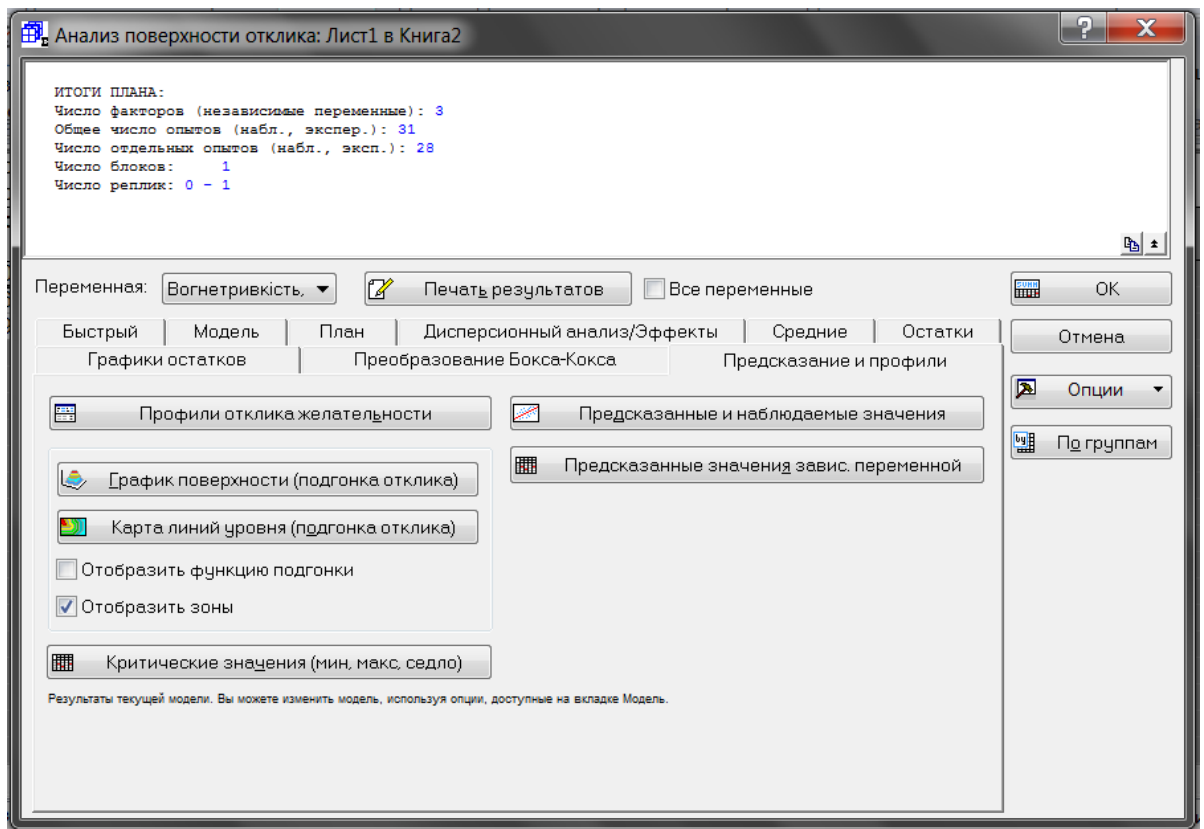


Рисунок 2.9 – Вкладка «Прогноз та профілі»

У вікні "Профілі відгуку бажаності" виберіть команду "Перегляд", потім розраховуються дані, за якими будуються графіки.

Таблиця 2.7 - Дані для побудови графіків залежності від $t_{\text{вогн}}$

	Фактор Уровень	Предск. $t_{\text{вогн}}, ^\circ\text{C}$	-90,% $t_{\text{вогн}}, ^\circ\text{C}$	+90,% $t_{\text{вогн}}, ^\circ\text{C}$
$t_{\text{обр}}, ^\circ\text{C}$	1400	1692,621	1431,526	1953,717
$t_{\text{обр}}, ^\circ\text{C}$	1425	1687,765	1492,562	1882,968
$t_{\text{обр}}, ^\circ\text{C}$	1450	1682,909	1553,049	1812,769
$t_{\text{обр}}, ^\circ\text{C}$	1475	1678,052	1611,349	1744,756
$t_{\text{обр}}, ^\circ\text{C}$	1500	1673,196	1643,845	1702,547
$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$	17,21	2183,172	1283,640	3082,705
$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$	32,158	1713,611	1612,564	1814,657
$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$	47,105	1785,011	1588,264	1981,759
$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$	62,053	2397,374	1163,175	3631,574
$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$	77	3550,700	341,573	6759,827
$\text{SiO}_2, \%$	17	5203,749	1114,932	9292,565
$\text{SiO}_2, \%$	30,29	3169,639	1435,095	4904,183
$\text{SiO}_2, \%$	43,58	1996,896	1608,394	2385,397
$\text{SiO}_2, \%$	56,87	1685,519	1630,561	1740,476
$\text{SiO}_2, \%$	70,16	2235,508	1561,479	2909,537

Таблиця 2.8 - Дані для побудови графіків залежності від $t_{\text{вогн}}$

	Фактор Уровень	Предск. λ , Вт/(м·К)	-90,% λ , Вт/(м·К)	+90,% λ , Вт/(м·К)
$t_{\text{обр}}$, °C	1400	0,70367	0,44726	0,960081
$t_{\text{обр}}$, °C	1425	0,78986	0,59816	0,981561
$t_{\text{обр}}$, °C	1450	0,87605	0,74852	1,003580
$t_{\text{обр}}$, °C	1475	0,96224	0,89673	1,027747
$t_{\text{обр}}$, °C	1500	1,04843	1,01961	1,077254
Al ₂ O ₃ , %	17,21	0,42019	-0,46320	1,303581
Al ₂ O ₃ , %	32,158	0,86231	0,76308	0,961542
Al ₂ O ₃ , %	47,105	1,04811	0,85489	1,241324
Al ₂ O ₃ , %	62,053	0,97759	-0,23446	2,189639
Al ₂ O 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 були побудовані графіки, на яких також відзначено припустиму ймовірність 90%.

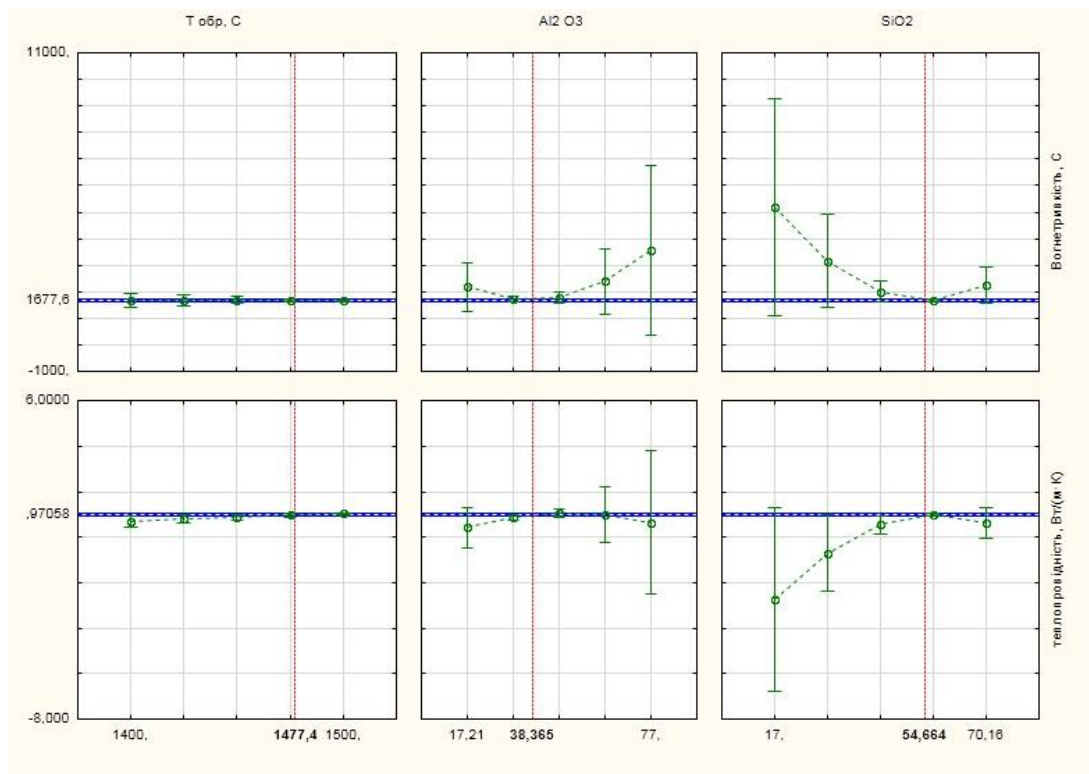


Рисунок 2.10 – Графіки залежності вогнетривкості та теплопровідності від температури обробки та хімічного складу

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_2O_3 дорівнює 38,36 %, вміст SiO_2 дорівнює 54,66 %. З першого ряду графіків ($t_{вогн}$) видно, що $t_{вогн}$ – це одне з найменших значень, які є на графіку. Значення λ навпаки – одно з найбільших.

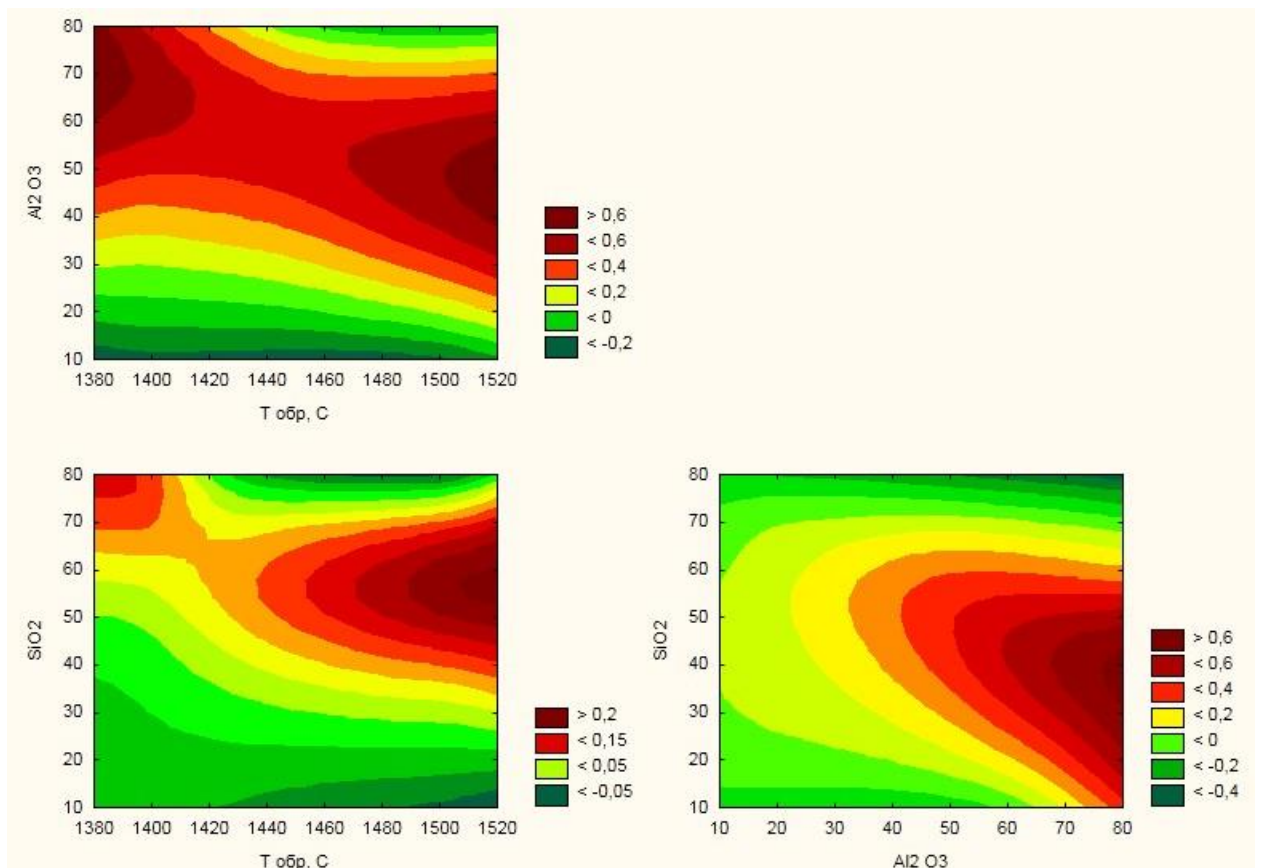


Рисунок 2.11 – Контурні графіки бажаності для парних незалежних змінних

На рисунку 2.11 показано контурні графіки бажаності для пар незалежних змінних. Поруч із графіками відображаються легенди, різні кольори яких відповідають будь-якій ймовірності появи одних даних по відношенню до інших. Оптимальна ймовірність спостерігається за значенням 0.

Коефіцієнти регресії, використані для побудови рівняння регресії, були розраховані за допомогою програми. Для рівняння вибираються ті

коефіцієнти, які мають заданий критерій статистичної значимості. Також за допомогою програми було отримано графіки, за допомогою яких визначаються оптимальні характеристики вогнетривів. Контурні графіки показують бажаність даних для незалежних змінних.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розглянуті вогнетривкі матеріали, їх характеристики, властивості, класифікація та застосування. Вогнетриви класифікують за хімічним складом (кремнієві, магнеєві, вуглецеві, оксидні та ін), по вогнетривкості (тугоплавкі, високовогнетривкі та вищі вогнетривкі). Вогнетривки випускаються у вигляді цегли та неформових виробів. Неформові вогнетриви застосовують для виготовлення монолітних футеровок з вогнетривкого бетону та пакувальних матеріалів.

Вибір вогнетривкого матеріалу визначається як його термостійкістю, а й хімічними характеристиками тліючого речовини, і навіть властивостями палива чи золи.

Для детальнішого розгляду було обрано шамот. Шамот - вогнетривка глина, обпалена до втрати пластичності. Шамотні вироби складаються з SiO_2 та Al_2O_3 та класифікуються за їх наявністю у ньому Al_2O_3 відрізняється також наявністю в ньому шамотного компонента (безшамотного, малошамотного, шамотного та багатошамотного). Шамотні вироби використовуються в доменних печах, повітрянагрівачах доменних печей, при виробництві сталевого лиття, печах кольорової металургії, коксових та газових печах, скляній та цементній промисловості.

Однією з важливих властивостей вогнетривів є пористість. Коефіцієнт теплопровідності вогнетривів залежить від часу, розташування в просторі, розміру відкритих або закритих пір. Найменший коефіцієнт теплопровідності має матеріал із порами, розташованими перпендикулярно тепловому потоку.

Матеріальний баланс виробництва розрахований за шамотною цеглою. Спочатку представлена технологічна схема виробництва вогнетривів, що включає подачу необхідних матеріалів, їх змішування, сушіння та формування. Ця схема потім була застосована до виробництва шамоту. Для аналізу витрат та зниження витрат необхідне графічне представлення процесу виробництва шамотної цегли.

Матеріальний баланс складається з вхідної та вихідної частин. Вхідна частина складається з шамотної глини, глини для сполучного та води для суміші. Вихід - від витрат на обробку глини та формованого матеріалу. Також малюються схеми вхідної та вихідної частин. На схемі доходної частини найбільший відсоток становить глина, що йде на шамот. співвідношення шамотна глина – глина для склеювання може впливати на коефіцієнт теплопровідності.

Розрахований енергетичний баланс шамотного виробництва. Тепловиділення складається з теплоти згоряння палива, фізичної теплоти, що вноситься паливом, та теплоти екзотермічної реакції. Тепло витрачається на сушіння, випалення, при охолодженні матеріалу тепло, що віддається газами, витрачається в навколишнє середовище. Також розраховуються невизнані витрати.

У другому розділі було розглянуто такі методи дослідження ефективного коефіцієнта теплопровідності, як стаціонарний метод плоского шару, метод поздовжнього теплового потоку та інші. Далі, після аналізу літератури та виключення грубих помилок, було складено таблицю алюмосилікатних вогнетривів. Вибрані дані будуть проаналізовані та за допомогою програми STATISTICA 10 будуть знайдені коефіцієнти регресії, отримані розрахунки на основі цих коефіцієнтів, графіки залежностей та оптимальні характеристики вогнетривів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бельский В. И., Сергеев Б. В. Промышленные печи и трубы – М., Стройиздат, 1974. 301 с.
2. Губинский В. И. Metallургические печи. Теория и расчеты : учебник. В 2 т. Минск: Беларус. наука, 2007. Т.2. 832 с.
3. Стрелков К. К., Мамыкин П. С. Технология огнеупоров Москва, Metallургия, 1978. 376 с.
4. Чейлитко А. О. Формування теплофізичних властивостей елементів конструкцій теплового захисту шляхом створення прогнозованих пористих структур: монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 318с.
5. Казанцев Е. М. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. Москва : Metallургия», 1975.- 368 с.
6. Чейлитко А. О. Використання вторинних енергоресурсів, Навчально-методичний посібник Запоріжжя: ЗГІА, 2014 –251 с.
7. Клінкерні керамічні матеріали на основі природної і техногенної сировини України : монографія / О. Ю. Федоренко та ін. Харків : Планета Принт, 2018. 185 с.
8. Керамічні, композиційні матеріали й вогнестійкі покриття на основі гібридних гелів : монографія / О. Б. Скородумова та ін. Харків : НУЦЗУ, 2017. 102 с.
9. Лічконенко Н. В., Безпалов Р. І. Вогнетриви металургійного виробництва : навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА напряму 6.050401 «Metallургія». Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 70 с.
10. Семченко Г. Д. Вогнетривкі вироби для футерування теплових технологічних агрегатів : навч. посібник. Харків : НТУ «ХШ», 2009. 176 с.
11. Бережний А. С., Пітак Я. М., Пономаренко О. Д., Соболев Н. П. Фізикохімічні системи тугоплавких, неметалічних і силікатних матеріалів : навч. посіб. Київ : НМК ВО, 1992. 172 с.

12. Лічконенко Н. В. Вогнетриви металургійного виробництва : методичні вказівки до виконання контрольних і самостійних робіт та підготовки до тестування. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 31 с.

13. Цибенко Н. О., Лічконенко Н. В. Виробництво периклазовуглецевих вогнетривів для футеровки кисневих конвертерів. Збірник наукових праць студентів, аспірантів і молодих вчених «МОЛОДА НАУКА-2019». Запоріжжя: ЗНУ, 2019. Т. Том V. С. 114-115.

14. Refractory Linings : ThermoMechanical Design and Applications / edited by Charles Schacht. New York : Marcel Dekker Inc., 480 p. 7. Hhloben P. Refractory materials major industrial applications. Published by Rexxon Corporation, 2011. 350 p.

15. Стрелов К.К., Мамыкин П.С., Кашеев И.Д. Технология огнеупоров. М.: Металлургия, 1988. 528 с.

16. Огнеупоры и их применение / Под ред. Инамуры Я. М.: Металлургия, 1984. 448 с.

17. Плотников Л.А. Огнеупоры в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1973. 276 с.

18. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок: Справочное издание: В двух книгах. Кн.2. Служба огнеупоров / И.Д. Кашеев и др. М.: Интернет Инжиниринг, 2002. 656 с.

19. Огнеупорное производство: Справочник под ред. Д.И. Гавриша. М.: Металлургия, 1965.- Том 2.- 578 с.

20. Аристов Г.Г. Огнеупорные изделия для разливки стали. М.: Металлургия, 1969. 264 с.