МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз енерговитрат лінії з виробництва електричних запобіжників

Виконав: студент 4 курсу
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
О.М. Павліченко
(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф. Коваленко В.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент к.т.н., доц. Башлій С.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут_____
Кафедра____Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
Рівень вищої освіти____перший (бакалаврський) рівень_____
Спеціальність __141 Електроенергетика,електротехніка та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика,електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
к.т.н., доц.__ Д.М. Морозов
«_____»_____2026__року

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

_____Павліченко Олександр Миколайович_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи _Аналіз енерговитрат лінії з виробництва електричних запобіжників
керівник роботи ___д.т.н., проф. Коваленко В.Л._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_23_»_грудня__2025__року №_1833 - с_____
2 Строк подання студентом роботи _____11червня 2026 р._____
3 Вихідні дані до роботи Особливості технологічного процесу виготовлення кераміки.Техніко-економічна оцінка впроваджденння електричних печей для обпалу кераміки на ПрАТ «Кварц»Технічні характеристики електричних печей для обпалу кераміки
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _1)Особливості технологічного процесу виготовлення кераміки. 2) Дослідження можливості підвищення енергоефективності 3) Техніко-економічна оцінка впроваджденння електричних печей для обпалу кераміки на ПрАТ «Кварц».
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _1) Технологіявиробництва та печі для обпалукераміки.2) Технічні характеристики електричних печей для обпалу кераміки.

електричних печей 4) Зовнішній вигляд запропонованої печі 5) Техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		
Розділ 2	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		
Розділ 3	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		

7 Дата видачі завдання 01.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз показників якості електроенергії на межі балансової приналежності копрового цеху	01.03.2026	
2	Дослідження можливості підвищення енергоефективності копрового цеху	01.04.2026	
3	Техніко-економічні розрахунки щодо підвищення ефективності копрового цеху	10.05.2026	

Студент _____ (підпис) О.М. Павліченко (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ (підпис) В.Л. Коваленко (ініціади та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ (підпис) С.В.Башлій (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 134 сторінок, 18 рисунків, 16 таблиць, 33 джерела.

Об’єктом дослідження в дипломному проєкті є процес споживання паливно-енергетичних ресурсів на ПрАТ «Кварц» під час виготовлення керамічних ізоляторів і плавких запобіжників. Особливу увагу приділено енергоємним технологічним операціям, насамперед сушінню та випалу керамічних виробів, оскільки саме на цих етапах формується значна частина загальних витрат енергоресурсів підприємства.

Метою проєкту є комплексне дослідження виробничої діяльності ПрАТ «Кварц», оцінювання сучасного стану енерговикористання та визначення основних напрямів підвищення енергетичної ефективності. Для досягнення поставленої мети передбачається проаналізувати структуру енергоспоживання підприємства, встановити найбільш енергоємні ділянки технологічного процесу, виявити причини надмірних витрат енергоресурсів і запропонувати технічні та організаційні заходи щодо їх скорочення. Запропоновані рішення повинні бути не лише технічно обґрунтованими, а й економічно доцільними з урахуванням необхідних капітальних вкладень, очікуваної економії та строку окупності.

У першому розділі пояснювальної записки розглянуто загальну характеристику підприємства та особливості технології виготовлення керамічної продукції. Наведено послідовність основних виробничих операцій, починаючи з підготовки сировинних компонентів і формування заготовок та завершуючи сушінням, випалом і контролем якості готових виробів. Представлено технологічну схему керамічного виробництва, що дає змогу простежити рух матеріальних і енергетичних потоків між окремими стадіями процесу.

Окрему увагу приділено обладнанню, яке використовується для термічної обробки кераміки. Розглянуто конструктивні та експлуатаційні особливості газових і електричних печей, їх принцип дії, способи регулювання температури, рівень теплових втрат і можливості автоматизації. Проведене порівняння показало відмінності між зазначеними типами печей за коефіцієнтом корисної дії, точністю підтримання температурного режиму, рівнем енергоспоживання, складністю обслуговування та впливом на якість продукції.

У другому розділі виконано технічне обґрунтування переходу від газового до електричного способу випалу. На підставі виробничої програми та характеристик керамічних виробів обрано електричні печі, які найбільшою мірою відповідають умовам роботи підприємства. Для забезпечення раціонального завантаження та можливості оброблення партій різного обсягу запропоновано використання двох печей, що відрізняються встановленою потужністю та місткістю робочої камери.

Для вибраного обладнання виконано тепловий розрахунок, у межах якого визначено корисні витрати теплоти, втрати через огороджувальні конструкції, витрати енергії на нагрівання виробів, оснащення та повітря в робочому просторі. Результати розрахунків використано для встановлення необхідної потужності нагрівальних елементів, оцінювання тривалості технологічного циклу та перевірки відповідності параметрів печей реальним виробничим потребам.

Також досліджено можливі режими експлуатації електричних печей. Визначено умови, за яких забезпечується найбільш повне завантаження робочої камери, скорочується кількість холостих циклів і зменшуються питомі витрати електроенергії на одиницю продукції. Проведено розрахунок енергетичного ефекту від упровадження раціонального графіка роботи обладнання та узгодження завантаження печей з обсягами виробничих замовлень.

На основі отриманих результатів розроблено рекомендації щодо подальшого підвищення енергоефективності й продуктивності термічного обладнання. До них належать оптимізація температурних графіків, автоматичне

керування нагріванням і охолодженням, скорочення простоїв, підвищення якості теплоізоляції, контроль стану нагрівальних елементів та організація обліку питомих витрат електроенергії за окремими видами продукції.

Техніко-економічне оцінювання запропонованого проєкту виконано за сукупністю енергетичних та економічних показників. Визначено очікуване скорочення споживання паливно-енергетичних ресурсів, економію витрат на оплату природного газу й електроенергії, необхідний обсяг капітальних вкладень у придбання, монтаж і налагодження електричних печей. Крім того, розраховано річний економічний ефект і простий строк окупності інвестицій.

Таким чином, дипломний проєкт спрямований на комплексне обґрунтування модернізації процесу випалу керамічних виробів на ПрАТ «Кварц». Очікується, що реалізація запропонованих заходів дасть змогу знизити енергетичні витрати, підвищити коефіцієнт корисної дії термічного обладнання, покращити стабільність технологічного режиму, зменшити кількість браку та підвищити загальну ефективність виробництва.

ОБПАЛ КЕРАМІКИ, ГАЗОВА ПІЧ, ЕЛЕКТРИЧНА ПІЧ, ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК, РАЦІОНАЛЬНИЙ РЕЖИМ РОБОТИ, ЕКОНОМІЯ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

ЗМІСТ

Вступ……..7

1 Особливості технологічного процесу виготовлення кераміки …11

1.1 Призначення і опис продукції, що виготовляється ПрАТ «Кварц»……1

1.2 Технологічна схема керамічного виробництва ……..18

1.3 Характеристика обладнання для обпалу кераміки ……30

1.3.1 Газові печі для обпалу кераміки ……38.

1.3.2 Електричні печі для обпалу кераміки ……44

1.3.3 Порівняння електричних та газових печей для обпалу кераміки ……...…….51

2 Обгрунтування вибору електричних печей …….58

2.1 Вибір електричної печі для обпалу кераміки……..58

2.2 Тепловий розрахунок електропечі СДО 20.30.18/12,5 ..65

2.3 Вибір електричної печі меншої встановленої потужності……77

2.4 Тепловий розрахунок електропечі СНОЛ 500/12 ……..84

2.5 Визначення раціональних режимів експлуатації електричних печей ……..…..86

2.5.1 Розрахунок показників роботи печі СДО 20.30.18/12.5 ……...91

2.5.2 Розрахунок показників роботи печі СНОЛ 500/12…….97

2.5.3 Визначення економії електроенергії при виборі раціонального режиму роботи електричних печей ……..99

2.5.4 Рекомендації щодо підвищення енергоефективності та продуктивності печі ……...103

3 Техніко-економічна оцінка впроваджденння електричних печей для обпалу кераміки на ПрАТ «Кварц» ……..108

3.1 Визначення економії ПЕР при заміні печей……110

3.2 Визначення капітальних витрат та показників ефективності …….117

Висновки…….129

Перелік посилань……132

ВСТУП

Україна належить до країн з недостатнім рівнем забезпечення власними паливно-енергетичними ресурсами, оскільки внутрішні джерела покривають менше ніж 50 % загальних енергетичних потреб держави. Водночас енергоємність валового внутрішнього продукту України у два та більше разів перевищує відповідні показники розвинених країн. За таких умов упровадження енергозберігаючих технологій і підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів є одним із пріоритетних напрямів розвитку економіки та соціальної сфери.

ПрАТ «Кварц» з 1993 року спеціалізується на розробленні та виробництві високовольтних і низьковольтних плавких запобіжників, а також електротехнічних ізоляторів. Продукція підприємства постачається енергетичним компаніям, виробникам енергетичного обладнання та енергоємним промисловим підприємствам України, Азербайджану, Молдови, Вірменії, Казахстану та країн Балтії.

Одним із важливих етапів технологічного процесу на підприємстві є випалювання керамічних виробів. Для виконання цієї операції використовувалася газова піч, у якій тепло відхідних газів частково застосовувалося для попереднього підігрівання повітря, що надходило до пальників. Проте навіть за наявності системи утилізації тепла коефіцієнт корисної дії печі становив лише близько 17 %, що свідчить про значні втрати енергії та низьку ефективність її експлуатації.

Для випалювання 1000 одиниць продукції витрачалося приблизно 950 м³ природного газу. Раніше середня вартість 1000 м³ газу для підприємства становила близько 3900 грн, однак із березня 2015 року вона зросла до 11 500 грн. Водночас середній тариф на електроенергію становив 1,63 грн за 1 кВт·год. З урахуванням того, що коефіцієнт корисної дії електричних печей може

досягати 80 %, подальше використання газової печі стало економічно недоцільним.

У зв’язку з цим на підприємстві було розглянуто можливість припинення експлуатації газової печі та її заміни сучасними електричними печами. Таке технічне рішення дасть змогу суттєво скоротити питомі витрати енергоресурсів, зменшити експлуатаційні витрати, підвищити стабільність температурного режиму та покращити якість готової керамічної продукції.

Отже, тема дипломного проєкту є актуальною, оскільки передбачає розроблення заходів із підвищення енергоефективності процесу виготовлення керамічних виробів на ПрАТ «Кварц». Основним напрямом модернізації є заміна наявної газової печі електричними печами, які характеризуються значно вищим коефіцієнтом корисної дії, простішим регулюванням технологічних параметрів, зручністю експлуатації та нижчими витратами на обслуговування.

1 ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІКИ

1.1 Призначення і опис продукції, що виготовляється ПрАТ «Кварц»

ПрАТ «Кварц» є спеціалізованим підприємством електротехнічної промисловості, яке з 1993 року здійснює розроблення, виготовлення та постачання високовольтних і низьковольтних плавких запобіжників, а також електротехнічних ізоляторів різного призначення. За роки діяльності підприємство накопичило значний виробничий досвід, сформувало відповідну технологічну базу та налагодило серійний випуск продукції, що застосовується в системах електропостачання, промислових електроустановках і спеціалізованому електрообладнанні.

Основними споживачами продукції ПрАТ «Кварц» є енергогенерувальні та енергопостачальні компанії, підприємства з виробництва електротехнічного й енергетичного устаткування, а також великі промислові споживачі з високим рівнем електроспоживання. Продукція підприємства постачалася замовникам в Україні, Росії, Азербайджані, Молдові, Вірменії, Казахстані та країнах Балтії. Широка географія постачання свідчить про затребуваність виробів підприємства та можливість їх використання в різних системах електропостачання.

Відповідність продукції встановленим технічним вимогам підтверджувалася результатами сертифікаційних випробувань, проведених відповідно до вимог систем стандартизації України та Росії. На підприємстві також було впроваджено систему управління якістю відповідно до ДСТУ ISO 9001:2001. Надійність виробів підтверджувалася багаторічним досвідом їх експлуатації в енергетичних і промислових установках. Високовольтні та низьковольтні запобіжники виробництва ПрАТ «Кварц» за своїми технічними характеристиками забезпечували можливість заміни відповідних типів запобіжників російського виробництва.

Плавкий запобіжник являє собою комутаційний електричний апарат, основним призначенням якого є захист електричних кіл, мереж та обладнання від небезпечного підвищення струму. Такі апарати застосовуються для захисту електроустановок загальнопромислового призначення, розподільчих пристроїв, електричних машин, трансформаторів, кабельних і повітряних ліній, транспортного електрообладнання, зокрема вагонів метрополітену, а також інших споживачів електричної енергії.

Принцип роботи плавкого запобіжника ґрунтується на тепловій дії електричного струму. У разі виникнення перевантаження або короткого замикання струм у захищеному колі перевищує допустиме значення. Під дією підвищеного струму спеціально передбачена струмопровідна частина запобіжника, яка називається плавкою вставкою, інтенсивно нагрівається, розплавляється та розриває електричне коло. Унаслідок цього пошкоджена ділянка автоматично відключається від джерела живлення, що запобігає подальшому нагріванню обладнання, руйнуванню ізоляції та виникненню пожежонебезпечних ситуацій.

У спрощеному розумінні запобіжник є захисним пристроєм, який послідовно вмикається в електричне коло та автоматично розмикає його у випадку надмірного збільшення струму. Таке зростання може бути спричинене коротким замиканням, перевантаженням електричного обладнання, пошкодженням ізоляції або неправильним режимом роботи споживача. Без своєчасного відключення підвищений струм може спричинити сильне нагрівання проводів, плавлення або займання ізоляційних матеріалів, пошкодження приладів і виникнення пожежі.

Запобіжники встановлюються послідовно перед тими елементами електричної мережі, які необхідно захистити від струмових перевантажень. Їх застосовують у місцях приєднання провідників меншого перерізу до магістральних ліній, перед електричними машинами, освітлювальними приладами, трансформаторами, напівпровідниковими перетворювачами та іншими відповідальними споживачами. Правильно вибраний запобіжник

повинен забезпечити надійне проходження робочого струму та швидке відключення кола при виникненні аварійного режиму.

Низьковольтні плавкі запобіжники належать до комутаційних апаратів одноразової дії. Вони призначені для захисту електричних кіл напругою до 1000 В від струмів короткого замикання та перевантаження. Відключення кола відбувається внаслідок руйнування плавкої вставки, параметри якої вибираються з урахуванням номінального струму, умов експлуатації та характеристик обладнання, що захищається. Після спрацьовування плавка вставка підлягає заміні.

Окрему групу становлять швидкодіючі запобіжники, які застосовуються переважно для захисту силових напівпровідникових приладів. Діоди, тиристори, транзистори та інші напівпровідникові елементи мають малу теплову інерцію і дуже швидко нагріваються при проходженні струмів, що перевищують допустимі значення. Навіть короткочасне струмове перевантаження може спричинити пошкодження напівпровідникового переходу та повний вихід приладу з ладу.

Традиційні плавкі запобіжники та автоматичні вимикачі через відносно тривалий час спрацьовування не завжди здатні забезпечити ефективний захист напівпровідникових перетворювачів у разі короткого замикання. Тому для таких установок використовують спеціальні швидкодіючі запобіжники, які характеризуються малою тепловою інерцією, обмеженим значенням пропущеної енергії та високою швидкістю розриву електричного кола. Для виконання зазначених функцій на підприємстві було освоєно виробництво швидкодіючих запобіжників типів ППА та ПП.

Важливим напрямом діяльності ПрАТ «Кварц» є також виготовлення електротехнічних ізоляторів. Електричний ізолятор являє собою пристрій, призначений для електричного розділення та механічного кріплення струмопровідних частин, які перебувають під різними електричними потенціалами. Ізолятори застосовуються для закріплення проводів, шин,

контактних з’єднань, елементів електричних апаратів, повітряних ліній електропередачі, ліній зв’язку та інших струмопровідних конструкцій.

До продукції підприємства належать опорні ізолятори, які використовуються для кріплення струмопровідних частин у комплектних розподільчих пристроях, електричних апаратах, на електростанціях і підстанціях. Конструктивно опорний ізолятор виконується у вигляді деталі циліндричної або конічної форми, виготовленої з матеріалу з високими електроізоляційними та механічними властивостями. Усередині корпусу закладається металева арматура з різьбовими отворами, за допомогою яких здійснюється монтаж ізолятора і кріплення струмопровідних шин.

Для збільшення електричної міцності та підвищення розрядної напруги на зовнішній поверхні ізолятора формуються спеціальні ребра. Вони збільшують довжину шляху витоку струму по поверхні ізоляційного матеріалу, що особливо важливо в умовах підвищеної вологості, забруднення, запиленості та дії атмосферних опадів. Надійність ізолятора визначається не лише його електричними характеристиками, а й здатністю витримувати механічні навантаження, температурні перепади та тривалу експлуатацію.

ПрАТ «Кварц» виготовляє опорні ізолятори, а також декілька серій високовольтних і низьковольтних плавких запобіжників. До основної номенклатури належать високовольтні запобіжники серії ПКТ, розраховані на номінальну напругу 6, 10 і 35 кВ та струми від 2 до 200 А. Запобіжники цієї серії застосовуються для захисту силових трансформаторів, кабельних і повітряних ліній електропередачі від наслідків коротких замикань і небезпечних перевантажень.

Підприємство також виготовляє запобіжники серії ПКН, розраховані на напругу 10 і 35 кВ. Їх основним призначенням є захист кіл трансформаторів напруги. Такі запобіжники повинні забезпечувати надійне відключення пошкодженої ділянки та не допускати розвитку аварійного процесу в первинних і вторинних колах вимірювального обладнання.

До виробничої програми підприємства входять високовольтні плавкі запобіжники серії ПКЕ на напругу 6, 10 і 35 кВ та номінальні струми від 2 до 200 А. Вони призначені для захисту електрообладнання розподільчих пристроїв, кар’єрних і промислових екскаваторів, пересувних електростанцій та інших установок, що працюють у складних експлуатаційних умовах. Конструкція таких запобіжників повинна забезпечувати стійкість до вібрацій, механічних навантажень, пилу, перепадів температури та значних струмів короткого замикання.

Таким чином, продукція ПрАТ «Кварц» охоплює широкий спектр електротехнічних захисних пристроїв і ізоляційних конструкцій. Вироби підприємства використовуються для підвищення надійності електропостачання, забезпечення безпечної експлуатації електрообладнання та своєчасного відключення аварійних ділянок електричних мереж. На рисунку 1.1 представлено зовнішній вигляд високовольтних плавких запобіжників типів ПКЕ, ПКТ і ПКН, які відрізняються призначенням, конструктивним виконанням та номінальними електричними параметрами.



Рисунок 1.1 – Високовольтні плавкі запобіжники типу ПКТ, ПКН, ПКЕ

Низьковольтні плавкі запобіжники серії ПН22 є сучасним аналогом російських запобіжників типу ПН-2. Вони призначені для захисту електричних мереж, силового обладнання та електроприймачів від небезпечних струмів короткого замикання і тривалих перевантажень. Номінальний струм запобіжників цієї серії перебуває в межах від 31,5 до 630 А, що дозволяє застосовувати їх у різноманітних промислових і розподільчих електроустановках.

Запобіжники ПН22 використовуються в електричних колах змінного струму з номінальною напругою до 380 В і частотою 50 або 60 Гц. У разі виникнення аварійного режиму плавка вставка нагрівається під дією надмірного струму, розплавляється та швидко розриває електричне коло. Завдяки цьому забезпечується надійний захист кабельних ліній, електродвигунів, трансформаторів, розподільчих пристроїв та іншого електротехнічного обладнання від термічних і електродинамічних пошкоджень.

Низьковольтні швидкодіючі запобіжники типу ПП57У є аналогом російських запобіжників серії ПП-57. Основним їх призначенням є захист силових напівпровідникових приладів і перетворювальних установок від струмів короткого замикання. Такі запобіжники застосовуються в електричних колах змінного та постійного струму з номінальною напругою 380 і 660 В.

Особливістю запобіжників ПП57У є висока швидкість спрацьовування та обмеження величини аварійного струму ще до досягнення ним максимального значення. Це має особливе значення для захисту напівпровідникових елементів, зокрема діодів, тиристорів, транзисторних модулів і силових випрямлячів, які характеризуються низькою термічною стійкістю та можуть бути пошкоджені навіть при короткочасному перевищенні допустимого струму.

Запобіжники ПП57У широко використовуються у випрямних установках, частотних перетворювачах, електроприводах, системах автоматичного керування, зварювальному обладнанні та інших пристроях силової електроніки. Їх застосування дозволяє підвищити надійність роботи електроустановок,

скоротити ймовірність пошкодження дорогого напівпровідникового обладнання та зменшити тривалість аварійних режимів.

Таким чином, запобіжники серій ПН22 і ПП57У виконують різні, але взаємопов’язані функції. Запобіжники ПН22 переважно забезпечують загальний захист низьковольтних електричних мереж від коротких замикань і перевантажень, тоді як швидкодіючі запобіжники ПП57У орієнтовані на захист чутливих силових напівпровідникових пристроїв, для яких вирішальне значення має мінімальний час відключення аварійного струму.

На рисунку 1.2 зображено низьковольтні швидкодіючі запобіжники типу ПН, ПП.



Рисунок 1.2 – Низьковольтні швидкодіючі запобіжники типу ПН, ПП

Також на підприємстві виготовляються керамічні ізолятори. На рисунку 1.3 зображено керамічний ізолятор.



Рисунок 1.3 – Керамічний ізолятор

Асортимент продукції підприємства зумовлений не тільки міцним фундаментом підприємства, закладеним за останні півтора десятка років, а і грамотною маркетинговою політикою, яку проводить керівництво ВАТ «Кварц».

1.2 Технологічна схема керамічного виробництва

Керамічні матеріали мають складну багатофазну структуру, від якої безпосередньо залежать їхні експлуатаційні та технологічні характеристики. У більшості випадків основу кераміки утворюють кристалічна і склоподібна фази, співвідношення між якими визначається складом початкової сировини, температурою випалювання, тривалістю спікання та умовами охолодження готових виробів. Окремим структурним компонентом може бути газова фаза, представлена повітрям або іншими газами, що залишаються в порах матеріалу після завершення технологічного процесу.

Кристалічна фаза є головною складовою кераміки та найбільшою мірою визначає її функціональні властивості. Вона може бути утворена однією або кількома хімічними сполуками, а також твердими розчинами різного складу. Тип кристалічної ґратки, розмір і форма зерен, характер їхнього взаємного розташування та міцність зв’язків між ними істотно впливають на електричні, механічні, теплові й магнітні параметри матеріалу. Саме особливостями кристалічної структури значною мірою зумовлюються діелектрична проникність, електрична міцність, п’єзоелектричні та сегнетоелектричні властивості, температурний коефіцієнт лінійного розширення, твердість, зносостійкість і механічна міцність керамічних виробів.

Склоподібна фаза зазвичай розташовується між кристалічними зернами у вигляді тонких прошарків. Вона виконує роль зв’язувального середовища, забезпечуючи цілісність і щільність структури після випалювання. Її кількість

та хімічний склад істотно впливають не лише на кінцеві властивості матеріалу, а й на перебіг технологічного процесу. Зокрема, від склоподібної складової залежать температура спікання, швидкість ущільнення керамічної маси, її пластичність під час формування, а також здатність матеріалу зберігати задану форму при термічній обробці. Збільшення частки склоподібної фази може сприяти зменшенню пористості та підвищенню щільності, однак надмірний її вміст у деяких випадках погіршує теплостійкість і механічну стабільність виробу.

Важливим чинником, що впливає на якість кераміки, є наявність пор і газових включень. Газова фаза виникає внаслідок недостатнього ущільнення сировинної маси, видалення вологи та органічних речовин під час випалювання, а також через недосконаліть режимів формування і спікання. Гази можуть залишатися в замкнених порах, утворюючи локальні дефекти структури. Такі порожнини зменшують ефективну площу перерізу матеріалу, сприяють концентрації механічних напружень і стають осередками зародження тріщин. Унаслідок цього знижуються механічна міцність, ударостійкість та довговічність керамічних деталей.

Особливо негативно пористість впливає на електроізоляційні властивості. За високої напруженості електричного поля всередині газових включень можуть виникати процеси іонізації та часткові розряди, що призводять до збільшення діелектричних втрат і поступового руйнування матеріалу. Відкриті пори також здатні поглинати вологу з навколишнього середовища. Це спричиняє зниження питомого електричного опору, погіршення електричної міцності та прискорення старіння ізоляції. Саме тому під час виготовлення електротехнічної кераміки особливу увагу приділяють зменшенню пористості, забезпеченню рівномірної структури та герметизації поверхні виробів.

Для цілеспрямованого регулювання властивостей керамічної маси до її складу вводять різноманітні мінеральні й органічні добавки. Вони можуть виконувати функції пластифікаторів, стабілізаторів, пороутворювачів, зміцнювальних або легувальних компонентів. Наприклад, введення невеликої

кількості деревної тирси після випалювання створює додаткову пористість і дає змогу зменшити масу виробу. Водночас така добавка має застосовуватися обґрунтовано, оскільки надмірне пороутворення може знизити механічну та електричну міцність матеріалу.

Однією з основних переваг кераміки є можливість заздалегідь формувати необхідний комплекс характеристик шляхом зміни рецептури сировини та параметрів технологічного процесу. Варіювання співвідношення компонентів, ступеня подрібнення, вологості маси, тиску формування, температури і тривалості випалювання дає змогу отримувати матеріали з різною щільністю, міцністю, теплопровідністю, електричним опором та стійкістю до зовнішніх впливів.

Широке застосування керамічних матеріалів пояснюється їхньою високою нагрівостійкістю, хімічною стабільністю, корозійною стійкістю, достатньою механічною міцністю та тривалим терміном експлуатації. Більшість видів технічної кераміки характеризується низькою гігроскопічністю, стабільністю електричних параметрів і здатністю працювати в умовах високих температур, сильних електричних полів та інтенсивного випромінювання. Окремі різновиди мають виражені п’єзоелектричні, сегнетоелектричні, напівпровідникові або магнітні властивості, що забезпечує їх використання в електротехніці, електроніці, енергетиці, приладобудуванні, машинобудуванні та металургії.

Вибір сировини для виготовлення кераміки здійснюється відповідно до призначення майбутнього виробу. Традиційними компонентами є природні глини та каоліни, які широко поширені й мають добрі формувальні властивості. Глини забезпечують пластичність маси, а каоліни сприяють підвищенню вогнетривкості та стабільності матеріалу. Під час виробництва тонкої кераміки важливу роль відіграють польові шпати, зокрема мікроклін, які виконують функцію плавнів і сприяють утворенню склоподібної фази. Кварц вводять для регулювання усадки, міцності та термічних характеристик виробів.

Однак традиційна кераміка не завжди відповідає підвищеним вимогам сучасної промисловості. Розвиток металургії, електротехніки, електроніки й точного приладобудування зумовив необхідність створення спеціальних видів технічної кераміки з чітко визначеними параметрами. Для її виробництва застосовують високочисті оксиди алюмінію, магнію, цирконію, берилію, а також карбіди, нітриди, бориди та складні багатокомпонентні сполуки. Такі матеріали відзначаються високою температурною і механічною стійкістю, підвищеною електричною міцністю, зносостійкістю та стабільністю властивостей у складних умовах експлуатації.



Рисунок 1.4 – Операції та енерговитрати керамічного виробництва

Як свідчать дані, наведені на рисунку 1.4, основна частина енергетичних витрат у технологічному циклі виробництва кераміки припадає на термічну

обробку сформованих виробів. Процес спікання, або високотемпературного випалу, становить близько 90 % від загального енергоспоживання. Така значна частка пояснюється необхідністю нагрівання печей і керамічних заготовок до високих температур, тривалим витримуванням матеріалу за заданого температурного режиму, а також витратами енергії на кероване охолодження виробів. Порівняно зі спіканням інші технологічні операції — подрібнення, змішування, підготовка шихти, формування та допоміжна обробка — характеризуються відносно невеликим споживанням енергоресурсів. Отже, основний резерв підвищення енергоефективності керамічного виробництва пов’язаний передусім з удосконаленням конструкції випалювальних печей, теплоізоляції, систем автоматичного регулювання температури та утилізації теплоти відхідних газів.

Початковим етапом виготовлення керамічної продукції є підготовка сировинних компонентів, яка включає їх подрібнення, дозування та ретельне перемішування. Для отримання необхідного ступеня дисперсності застосовують кульові, вібраційні та інші типи млинів. Залежно від складу сировини, вимог до готового порошку та особливостей подальших операцій помел проводять сухим або мокрим способом. Під час сухого подрібнення матеріал обробляється без додавання рідкого середовища, тоді як мокрий помел здійснюється у воді або іншій технологічній рідині. Мокрий спосіб забезпечує більш рівномірний гранулометричний склад, зменшує запиленість виробничих приміщень і полегшує змішування компонентів, однак потребує додаткового видалення вологи.

За технологічною поведінкою підготовлені керамічні маси умовно поділяють на пластичні, малопластичні та непластичні. Пластичні суміші містять значну частку глинистих компонентів, завдяки чому легко деформуються під дією зовнішніх сил і зберігають надану форму. Малопластичні маси характеризуються обмеженим вмістом глинистих речовин і потребують введення спеціальних зв’язувальних або пластифікувальних добавок. Непластичні композиції майже не містять глини й зазвичай

складаються з порошків оксидів, карбідів, нітридів, феритів та інших технічних матеріалів. Для їх формування необхідно застосовувати пресування, лиття під тиском або інші спеціалізовані методи.

Хімічний і мінералогічний склад шихти значною мірою визначає спосіб її підготовки до формування. Після завершення дозування та змішування сировину доводять до стану, за якого вона здатна рівномірно заповнювати форму, ущільнюватися та зберігати геометричні параметри заготовки. Для цього до суміші вводять органічні пластифікатори, зв’язувальні речовини, поверхнево-активні компоненти, мастильні матеріали або тимчасові технологічні добавки. Їхній склад і кількість обирають з урахуванням типу кераміки, методу формування та режиму подальшого випалювання.

До порошків, призначених для виготовлення керамічних виробів, висувається комплекс вимог. До найважливіших належать заданий хімічний і фазовий склад, необхідний розподіл частинок за розмірами, висока однорідність, достатня активність під час спікання, відсутність небажаних домішок і стабільність властивостей у різних партіях сировини. Важливе значення мають також форма частинок, їхня питома поверхня, сипкість, здатність до ущільнення та взаємодія з пластифікаторами. Від характеристик порошку залежать щільність сирої заготовки, усадка під час випалу, кінцева пористість і механічна міцність готового виробу.

Технології одержання керамічних порошків можна об’єднати у дві принципово відмінні групи. До першої належать методи диспергування, що передбачають механічне або фізичне руйнування початкового матеріалу до частинок необхідного розміру. Друга група охоплює конденсаційні методи, за яких тверда речовина формується шляхом виділення з рідкої, газоподібної або парової фази.

Диспергаційні способи розрізняються за механізмом руйнування матеріалу. Подрібнення може відбуватися внаслідок стирання, удару, роздавлювання, високого тиску, вибухової дії або багаторазового механічного навантаження. У виробництві спеціальних порошків застосовують також

ультразвукову обробку, електромагнітні імпульси, електроіскрове чи дугове диспергування, лазерний вплив, електрохімічну та хімічну корозію. Окремим напрямом є руйнування матеріалу під дією циклічних температурних змін. Під час багаторазового нагрівання й охолодження в матеріалі виникають внутрішні напруження, які спричиняють утворення тріщин і поступове розділення його на дрібні частинки.

Конденсаційні методи дають змогу отримувати високодисперсні порошки з більш однорідним складом і контрольованою структурою. До них належать термічне розкладання металоорганічних сполук, осадження речовин із розчинів, упарювання сольових розчинів, проведення хімічних реакцій у газовій фазі, конденсація пари, кріохімічна обробка та розпилювальне сушіння. Такі способи особливо важливі під час виготовлення технічної кераміки, для якої необхідні висока чистота компонентів, малий розмір частинок і точне дотримання хімічного складу.

Підготовка порошків складних оксидних систем часто супроводжується перебігом декількох взаємопов’язаних хімічних реакцій. Спочатку відбувається розкладання початкових сполук — солей, гідроксидів, органічних речовин або термічно нестійких проміжних фаз.

Після видалення летких компонентів здійснюється твердофазний синтез, у результаті якого формуються кристалічні фази заданого складу.

Для забезпечення повноти реакцій важливо контролювати температуру, тривалість витримки, склад газового середовища та ступінь перемішування компонентів. Недотримання цих умов може спричинити появу сторонніх фаз, неоднорідність структури та погіршення властивостей готової кераміки.

Після підготовки маси здійснюється формування заготовок. Для цього використовують пресування, пластичне витискування через профільований мундштук, шлікерне лиття, гаряче лиття під тиском та інші методи.

Вибір конкретної технології залежить від геометричної форми і розмірів виробу, вимог до точності, серійності виробництва, властивостей керамічної маси та економічної доцільності застосування певного обладнання. Додатково

враховуються допустима усадка, необхідна щільність заготовки, складність подальшої механічної обробки та можливість автоматизації технологічного процесу.

Великогабаритні вироби складної конфігурації часто виготовляють методом шлікерного лиття. Рідку керамічну суспензію, або водний шлікер, заливають у пористі гіпсові форми, які поглинають частину води й забезпечують поступове утворення ущільненого шару матеріалу. Після досягнення необхідної товщини надлишковий шлікер видаляють, а сформовану заготовку висушують і виймають із форми. У разі виготовлення особливо складних виробів форма може бути розбірною або одноразовою.

Господарський фарфор і фаянс переважно формують із пластичних мас у гіпсових формах із застосуванням напівавтоматичних та автоматизованих установок.

Виробництво санітарно-будівельної кераміки складної конфігурації здійснюють здебільшого методом шлікерного лиття на механізованих конвеєрних лініях. Така організація процесу дає змогу забезпечити стабільну якість продукції, зменшити частку ручної праці та підвищити продуктивність підприємства.

Радіокераміку, п’єзокераміку, кермети, ферити та інші види технічної кераміки виготовляють переважно пресуванням порошкоподібних композицій. Для виробів складної форми також застосовують лиття парафінового шлікера у сталеві прес-форми. Парафінова зв’язка забезпечує необхідну текучість маси під час формування та достатню міцність сирої заготовки.

Перед остаточним випалом органічні компоненти поступово видаляють за спеціально розробленим температурним режимом, щоб уникнути утворення тріщин і внутрішніх дефектів.

Пресування являє собою процес формування виробу із сипкої або слабкозв’язаної порошкової маси під дією зовнішнього тиску. У результаті частинки зближуються, переміщуються, деформуються та утворюють компактну заготовку заданої форми. У керамічному виробництві застосовують

напівсухе, мокре, ізостатичне, гідростатичне та гаряче пресування. Напівсухе пресування є поширеним у масовому виробництві деталей простої конфігурації, тоді як ізостатичні методи забезпечують рівномірний розподіл тиску по всьому об’єму заготовки та зменшують неоднорідність її щільності.

Гаряче пресування поєднує ущільнення порошку з одночасною дією підвищеної температури. Завдяки цьому прискорюються процеси дифузії та спікання, зменшується залишкова пористість і формується дрібнозерниста структура.

Такий метод використовують для одержання практично безпористих виробів із контрольованими розмірами зерен, які можуть становити до 0,1 мкм. Отримані матеріали відрізняються підвищеною щільністю, механічною міцністю, зносостійкістю та стабільністю властивостей.

Для ферокерамічних матеріалів зниження пористості та формування однорідної мікроструктури сприяють поліпшенню магнітних характеристик. Зокрема, підвищуються магнітна проникність і індукція, скорочується час перемагнічування, зменшуються втрати та зростає стабільність роботи виробів у змінних електромагнітних полях.

Гаряче пресування є особливо ефективним під час виготовлення феритів для магнітних головок пристроїв запису й відтворення звукових та відеосигналів, матеріалів надвисокочастотного діапазону, а також окремих видів п’єзокераміки.

Застосування традиційних технологій для таких матеріалів часто не дає змоги забезпечити необхідну щільність, точність розмірів і функціональні властивості, тому використання спеціальних методів формування та спікання є технологічно обґрунтованим.

Сформовані вироби піддаються сушці в камерних, тунельних або конвеєрних сушарках. На рисунку 1.5 схематично зображено тунельну сушарку.

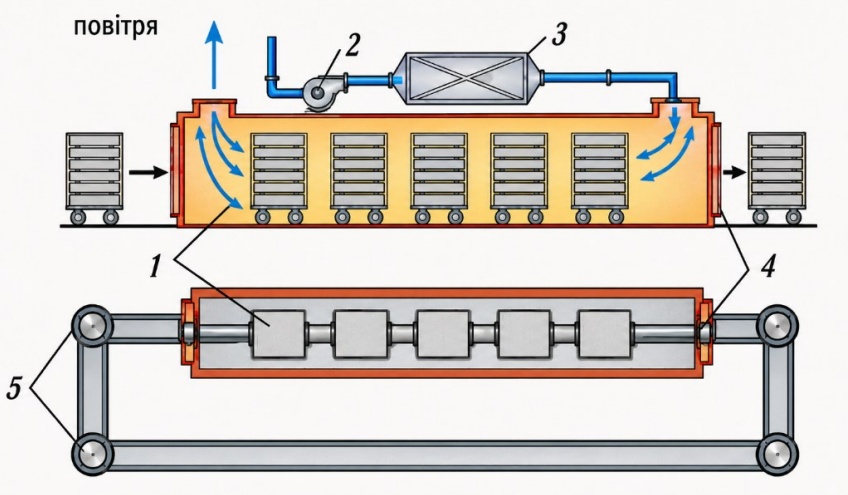


Рисунок 1.5 – Схема тунельної сушарки

На рисунку 1.5 цифрами позначено наступні деталі сушарної шафи: 1 – вагонетка, 2 – вентилятор, 3 – калорифер, 4 – герметичні двері, 5 – поворотні круги.

Початковим етапом виготовлення високовольтних і низьковольтних ізоляторів є витискування та нарізання заготовок із готової керамічної маси на шнековому пресі. Після цього заготовкам надають необхідної форми за допомогою обдирного верстата. Сформовані вироби висушують у сушильній шафі, а потім глазурують методом занурення.

Глазур утворює на поверхні кераміки щільний і гладкий захисний шар. Вона закриває пори, підвищує механічну міцність, хімічну стійкість та електроізоляційні властивості виробів, покращує їхній зовнішній вигляд і захищає декоративне покриття від механічних та хімічних впливів.

За складом глазурі належать переважно до лужних, алюмосилікатних і алюмоборосилікатних стекол. Додавання оксидів металів дає змогу змінювати колір покриття, а введення компонентів з іншими показниками заломлення світла забезпечує його непрозорість.

Прозорі глазурі мають переважно однорідну однофазну структуру. Незначна кількість нерозчинених кристалів або дрібних газових бульбашок не погіршує зовнішній вигляд покриття. Такі глазурі придатні для підглазурного та надглазурного декорування, однак можуть знижувати білизну поверхні й виявляти схильність до утворення мікротріщин.

Глушені глазурі застосовують для маскування природного кольору керамічного черепка. Їхня непрозорість утворюється внаслідок розсіювання та відбиття світла твердими частинками або газовими включеннями, оптичні властивості яких відрізняються від властивостей склоподібної фази. Білі непрозорі покриття отримують шляхом формування дрібнодисперсних кристалів або газових бульбашок у шарі глазурі.

Сучасні глазурувальні дільниці оснащуються машинами для очищення, нанесення глазурі, зачистки та сушіння виробів. На потокових конвеєрних лініях автоматично контролюються температура сушіння, тиск газу та повітря. Для послідовного нанесення різних видів глазурі можуть використовуватися дві розпилювальні камери. Найефективнішим способом вважається дискове відцентрове розпилення, що забезпечує рівномірність покриття та високу продуктивність. Схему глазурувальної камери наведено на рисунку 1.6.

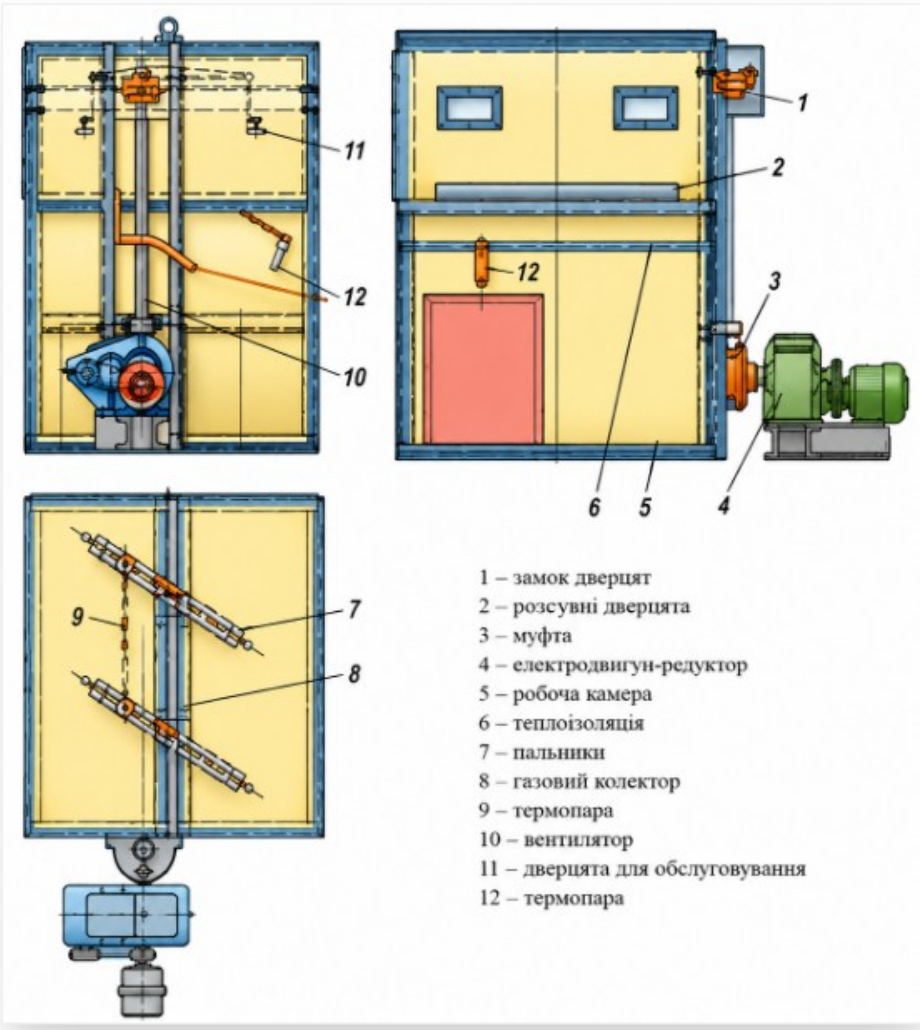


Рисунок 1.6 – Глазурувальна камера

Для глазурування дрібних керамічних виробів, зокрема ізоляторів і фітингів, застосовують карусельні машини. Виріб закріплюють на штирі, послідовно занурюють у воду та глазурну суспензію, після чого він разом із рухомим ланцюгом надходить до сушильної камери. На підприємствах із широким асортиментом продукції глазур також може наноситися ручними розпилювачами безпосередньо на конвеєрі.

Після глазурування ізолятори та корпуси запобіжників повторно висушують, а потім направляють на завершальну й найбільш відповідальну операцію — високотемпературний випал. Спікання здійснюють у муфельних або тунельних електричних печах за температури близько 1250–1260 °С і вище. У цей період видаляється пластифікатор, завершуються хімічні реакції між компонентами, ущільнюється структура та закріплюється форма виробу. Залежно від складу матеріалу випал проводять в окиснювальному, нейтральному або відновному середовищі.

Точність дотримання температурного режиму визначає фазовий склад, щільність, механічну міцність і електроізоляційні властивості кераміки. Під час нагрівання випаровується залишкова волога, вигорають органічні добавки та відбувається усадка виробів. Нанесена перед випалом глазур за температури 1000–1400 °С плавиться й утворює гладкий водо- та газонепроникний шар.

За призначенням кераміку поділяють на будівельну, побутову, санітарно-технічну, хімічно стійку, електротехнічну, радіотехнічну, теплоізоляційну та вогнетривку. За структурою розрізняють грубу, тонку, пористу й високопористу кераміку.

Одним зі способів скорочення витрат є одноразовий випал, за якого глазур наносять на висушений виріб і проводять термічну обробку за один цикл. Це зменшує витрати енергії, тривалість виробництва та кількість вантажно-розвантажувальних операцій. Водночас висушені заготовки мають невисоку міцність, тому потребують обережного глазурування й обмежують можливості механізованої обробки.

Таким чином, випал є найбільш енергоємною операцією у виробництві керамічних виробів. Саме тому заходи з енергозбереження доцільно спрямовувати передусім на оптимізацію температурних режимів, удосконалення теплоізоляції печей, скорочення тривалості нагрівання та використання теплоти відхідних газів.

1.3 Характеристика обладнання для обпалу кераміки

Випалювання керамічних виробів здійснюють у спеціальних теплових агрегатах — печах. Залежно від джерела теплової енергії їх поділяють на електричні та паливні. В електричних печах нагрівання відбувається за рахунок перетворення електричної енергії на теплову, а в паливних — унаслідок спалювання природного газу, деревини, мазуту або інших видів органічного палива. Упродовж тривалого розвитку керамічного виробництва було створено велику кількість конструкцій як паливних, так і електричних печей.

Незалежно від типу та конструктивного виконання будь-яка піч містить кілька основних елементів. До них належать:

робоча камера, призначена для розміщення керамічних виробів;

вогнетривка та теплоізоляційна оболонка, тобто футеровка;

джерело теплоти — електричний нагрівач, газовий пальник або інший теплогенерувальний пристрій;

система контролю й автоматичного регулювання температурного режиму.

Регулювальна система зазвичай включає датчик температури, найчастіше термопару, пристрій керування потужністю нагрівальних елементів або пальників, а також контролер, який обробляє отримані дані та забезпечує підтримання заданого режиму випалювання. Завдяки узгодженій роботі цих

компонентів у печі підтримуються необхідні температура, швидкість нагрівання та тривалість витримки.

. На рисунку 1.7 наведено схему печі для обпалу кераміки.

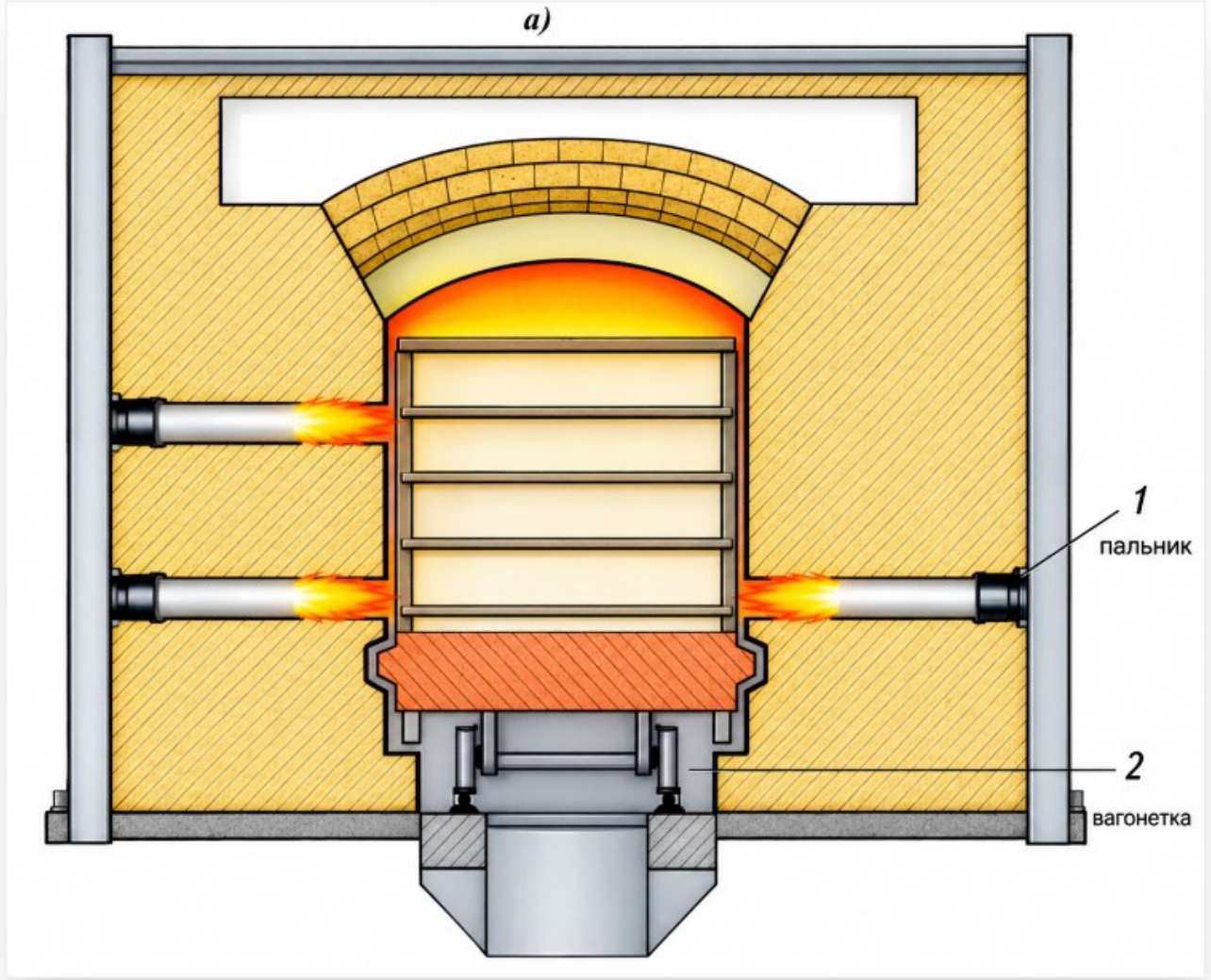


Рисунок 1.7 – Схема печі для обпалу кераміки

Класифікацію печей здійснюють за конструкцією робочої камери, типом футеровки, видом нагрівальних елементів і способом регулювання температури. Під час вибору або замовлення печі ці характеристики необхідно обов’язково зазначати, оскільки саме вони визначають її продуктивність, температурні можливості та умови експлуатації.

Одним із головних параметрів є об’єм робочої камери. У печах періодичної дії він визначає кількість виробів, які можна обпалити за один цикл, а в тунельних печах — обсяг продукції, що розміщується на одній

вагонетці. Невеликі лабораторні печі мають камери об’ємом близько 1–2 л і використовуються переважно для пробних випалів або виготовлення малогабаритних виробів, наприклад керамічних прикрас. У майстернях і студіях зазвичай застосовують печі об’ємом від 50–100 л до 1–1,5 м³. Для промислового виробництва характерні значно більші агрегати з робочою камерою об’ємом приблизно від 3 до 20 м³.

Максимально допустима температура в печі залежить від властивостей футеровки та нагрівальних елементів. Чим вищою має бути температура випалу, тим більш термостійкі й дорогі вогнетривкі матеріали необхідно використовувати. У деяких конструкціях робоча камера додатково відокремлюється від нагрівачів спеціальною оболонкою — муфелем, який захищає вироби від безпосереднього впливу полум’я або продуктів згоряння та сприяє рівномірнішому нагріванню.

На рисунку 1.8 приведено схему печі для обпалу кераміки з муфелем.

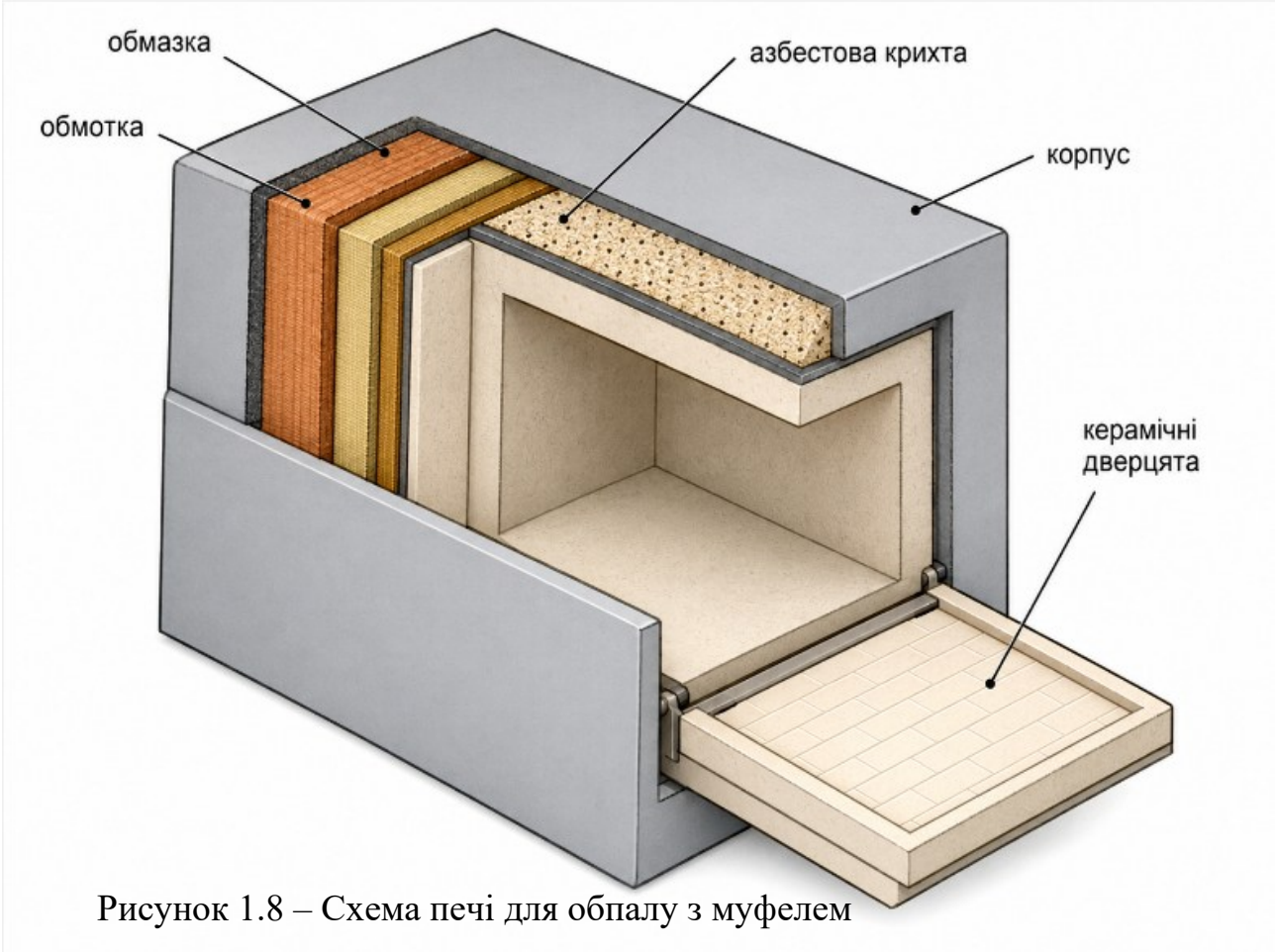


Рисунок 1.8 – Схема печі для обпалу з муфелем

Найбільш енергоємною операцією у технологічному процесі виготовлення керамічних ізоляторів і корпусів запобіжників є високотемпературний випал. За результатами аналізу енергоспоживання на цю стадію може припадати близько 90 % усієї електроенергії, що витрачається під час виробництва. Тому конструкція печі, склад футеровки, спосіб завантаження виробів і точність підтримання температурного режиму безпосередньо впливають на загальну енергоефективність підприємства.

Під час експлуатації печі на газі, вугіллі або іншому паливі, а також при випалюванні фарфорових виробів за високих температур доцільно застосовувати футеровочні матеріали з підвищеною термостійкістю. Замість легковагової теплоізоляційної шамотної цегли ШЛ-0,4 № 5 у найбільш термічно навантажених ділянках може використовуватися мулітова цегла МЛС-62 № 5. Вона краще витримує тривалий вплив високих температур і повторювані цикли нагрівання та охолодження.

У разі застосування такої футеровки склепіння робочої камери доцільно формувати не зі стандартних шамотних плит, а з більш жаростійких матеріалів. Для цього може використовуватися високощільна клинова мулітокорундова цегла МКВ-72 № 87 розміром приблизно 230×113×65–55 мм. Клиноподібна форма цегли дає змогу створити міцне аркове перекриття, здатне витримувати значні температурні та механічні навантаження.

Зовнішній бік вогнетривкої кладки необхідно захищати ефективною теплоізоляцією. Для цього укладають декілька шарів мулітокремнеземистого фетру завтовшки не менше 10 мм кожний. Поверх ізоляційного шару споруджують зовнішній захисний кожух із шамотної цегли, наприклад ША-5, а верхню частину перекривають шамотними плитами типу ША-96. Додаткове зовнішнє утеплення зменшує тепловіддачу в навколишнє середовище, скорочує витрати енергії та підвищує безпечність експлуатації печі.

Водночас у печах періодичної дії використання надмірно масивної футеровки з важких шамотних, мулітових або мулітокорундових матеріалів має бути технічно обґрунтованим. Висока теплоємність такої конструкції збільшує

тривалість нагрівання і подальшого охолодження агрегату. У результаті значна частина енергії витрачається не лише на обробку продукції, а й на нагрівання самої кладки. Тому для періодичних печей часто доцільно поєднувати тонкий робочий шар міцного вогнетриву з легкими високоефективними теплоізоляційними матеріалами.

Важливо також обмежувати надлишкове надходження повітря до паливної печі. Завелика кількість холодного повітря збільшує обсяг продуктів згоряння, підвищує теплові втрати з відхідними газами та ускладнює досягнення необхідної температури випалу. Співвідношення палива і повітря повинно регулюватися так, щоб забезпечити повне згоряння палива без надмірного охолодження робочої камери.

Для розміщення виробів усередині печі використовують вогнетривкий пічний припас — плити, стійки, полиці та інші опорні елементи. Їх виготовляють із матеріалів, температура експлуатації яких перевищує температуру випалу кераміки. Пічний припас забезпечує раціональне розташування продукції та рівномірний доступ теплоти до кожного виробу. Проте він також має власну теплоємність, тому збільшення маси плит і стійок призводить до додаткових витрат енергії.

У деяких технологічних процесах застосовують вогнетривкі капселі, усередині яких розміщують керамічні вироби. Вони захищають продукцію від безпосереднього впливу полум’я, золи, пилу та небажаного контакту з газовим середовищем. Разом із тим капселі підвищують загальну масу садки, яку необхідно нагріти, тому їх використання повинно визначатися вимогами до якості готової продукції.

Масивна футеровка має не лише недоліки. Завдяки значній тепловій інерції вона сприяє вирівнюванню температури в робочій камері та зменшує різкі коливання теплового режиму. Це особливо важливо для печей, що працюють на дровах або вугіллі, де інтенсивність горіння змінюється в часі. Накопичена футеровкою теплота частково компенсує нерівномірність подавання палива та допомагає підтримувати стабільніші умови випалювання.

Найбільш зручною з погляду керування технологічним процесом є електрична піч. Вона забезпечує високу точність регулювання температури, рівномірне нагрівання, можливість програмування режимів і відсутність продуктів згоряння в робочій камері. Газові печі дещо поступаються електричним за точністю регулювання, однак можуть бути економічно вигідними за наявності доступного газопостачання. Печі на рідкому паливі, вугіллі та дровах є складнішими в обслуговуванні та потребують постійного контролю процесу горіння.

Дров'яні печі характеризуються невисокою вартістю спорудження і можуть застосовуватися в місцевостях, де відсутня електрична мережа достатньої потужності або централізоване газопостачання. Водночас їх виведення на заданий режим є складним, а точність підтримання температури значно нижча, ніж в електричних агрегатах. Для підвищення ефективності такої печі робочу камеру розміщують над футеровкою топки за принципом хлібної камери або кам'янки.

Полум'я та гарячі продукти згоряння повинні рівномірно проходити по всій площі нижньої частини камери. Для цього в перекритті між топкою і зоною випалу передбачають канали або щілини. Топку виконують достатньо довгою і широкою, але відносно невисокою, що сприяє рівномірному розподілу полум'я та передачі теплоти пічному припасу й керамічним виробам.

Над топкою можуть установлюватися опорні елементи із шамотних плит або аркові перекриття з клинової шамотної, мулітової чи мулітокорундової цегли. Конструкція з мулітокорундових матеріалів є довговічнішою та краще витримує багаторазові цикли нагрівання. На сформовану горизонтальну поверхню встановлюють вогнетривкі стійки й полиці, на яких розміщують вироби для випалу.

Отже, підвищення енергоефективності обпалювальних печей повинно передбачати оптимальне поєднання термостійкої робочої футеровки та легкої теплоізоляції, зменшення маси пічного припасу, контроль надлишкового повітря, рівномірний розподіл температури й автоматичне регулювання

режиму. Надмірне збільшення теплоємності конструкції не завжди є доцільним, оскільки воно підвищує стабільність температури, але одночасно збільшує тривалість циклу та витрати енергії на нагрівання самої печі.

На рисунку 1.9 зображено схему обпалювальної печі, що працює на дровах.

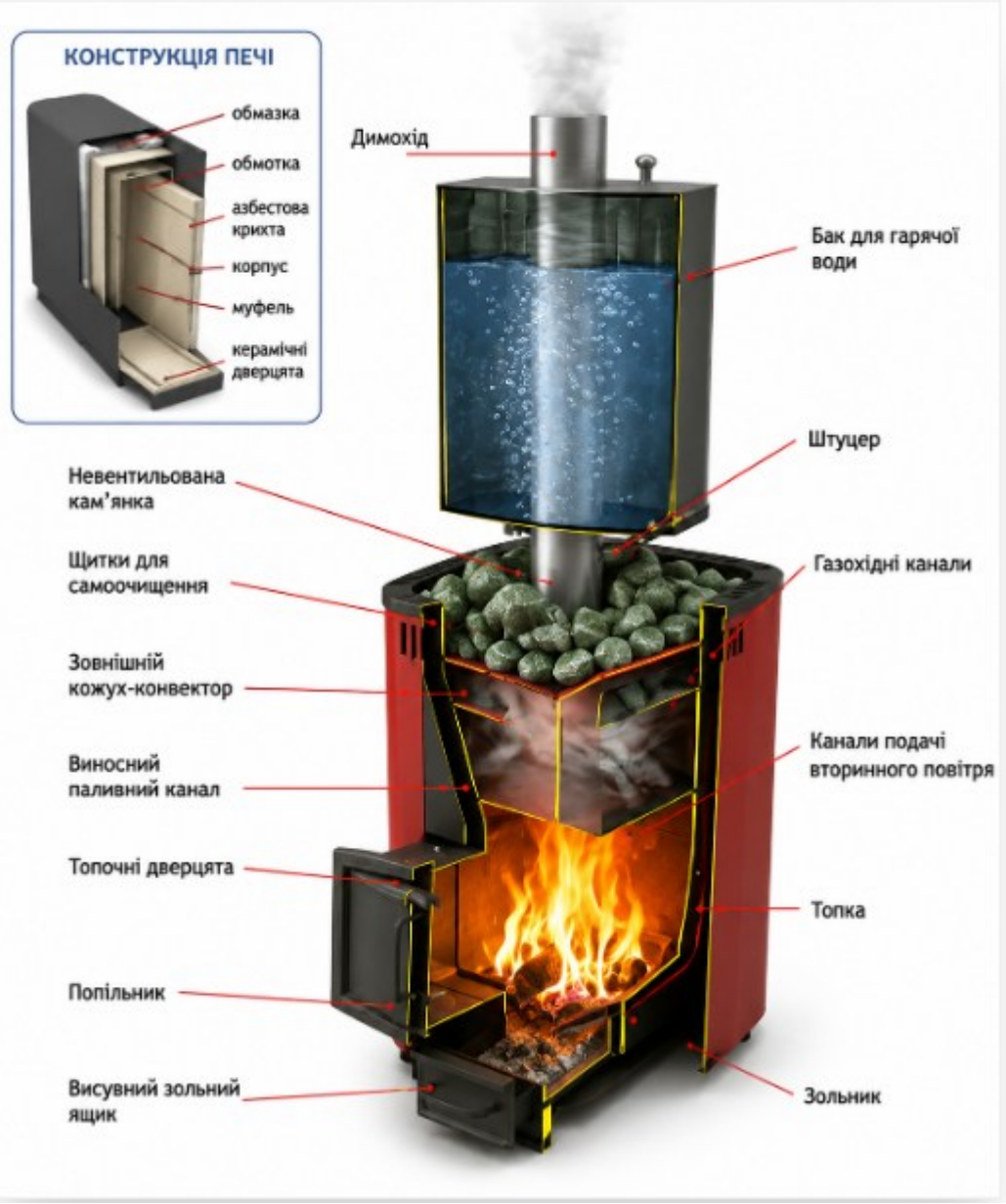


Рисунок 1.9 – Схема обпалювальної печі, що працює на дровах

Для електричних печей доцільно мінімізувати теплоємність робочої камери, оскільки значна маса футеровки потребує додаткових витрат електроенергії на нагрівання. Через незначний повітрообмін і відсутність

великих втрат теплоти з продуктами згоряння електропечі швидко досягають заданої температури, забезпечують точне регулювання режиму та характеризуються високою енергетичною ефективністю.

У печах, що працюють на дровах, стінки камери випалу, навпаки, доцільно виконувати з матеріалів із підвищеною теплоємністю. Вони акумулюють теплоту гарячих димових газів, а потім передають її керамічним виробам і вогнетривкому оснащенню переважно шляхом теплового випромінювання. Для таких умов ефективнішими за звичайний шамот є мулітові та мулітокорундові вогнетривкі матеріали, які відзначаються високою термостійкістю і довговічністю.

Подібний принцип побудови може застосовуватися і для печей, що працюють на природному газі або пропан-бутановій суміші. Водночас використання пропан-бутану зазвичай є менш зручним і дорожчим порівняно з централізованим газопостачанням.

Корпус робочої камери та топкову частину необхідно ретельно теплоізолювати. Якісна ізоляція скорочує втрати теплоти, прискорює вихід печі на робочий режим, зменшує споживання палива та забезпечує прийнятну температуру повітря у виробничому приміщенні.

Для печей на дровах і вугіллі важливим елементом є димохід, який забезпечує необхідну тягу та відведення продуктів згоряння і шкідливих речовин, що утворюються під час випалу. Його висота і переріз мають гарантувати стабільну роботу печі за різних погодних умов. Надмірну тягу регулюють спеціальною димовою засувкою, що дає змогу контролювати інтенсивність горіння та зменшувати теплові втрати.

Для забезпечення економічної роботи об’єм виробничої камери випалу повинен відповідати запланованій продуктивності та ступеню її завантаження. Важливим конструктивним елементом є теплоізольовані двері, які забезпечують зручний доступ до робочого простору під час розміщення виробів на вогнетривких полицях і їх виймання після завершення термічної обробки.

Герметичність дверей також істотно впливає на рівномірність температури й енергетичну ефективність печі.

1.3.1 Газові печі для обпалу кераміки

Промислові печі належать до найпоширеніших газоспоживальних теплотехнічних агрегатів. Перехід на газове паливо за умови правильної організації процесу його спалювання дає змогу отримати помітний економічний ефект. Це пояснюється не лише зниженням витрат на паливо в собівартості продукції, а й підвищенням продуктивності печей, поліпшенням якості нагрівання та спрощенням керування температурним режимом.

Ефективність роботи газової печі значною мірою залежить від організації теплообміну в її робочій камері. За температурою і переважним способом передачі теплоти промислові печі поділяють на три основні групи.

До високотемпературних належать печі, температура в робочому просторі яких перевищує 1000 °С. Основна частина теплоти в них передається випромінюванням, а газове паливо зазвичай спалюється безпосередньо в робочій камері.

Середньотемпературні печі працюють у діапазоні приблизно 650–1000 °С. Теплообмін у них здійснюється одночасно за рахунок випромінювання та конвекції. Спалювання газу переважно відбувається в спеціальних топкових камерах, конструктивно відокремлених від зони розміщення виробів.

У низькотемпературних печах температура робочого середовища не перевищує 650 °С, тому визначальним механізмом теплопередачі є конвекція. Паливо спалюється в окремій камері, після чого гарячі продукти згоряння змішуються з повітрям або рециркуляційними газами. Утворений теплоносій необхідної температури подається до робочої зони печі.

У високотемпературних і середньотемпературних агрегатах вироби нагріваються переважно завдяки випромінюванню полум’я, розігрітої футеровки та продуктів згоряння, зокрема вуглекислого газу і водяної пари. Важливу роль при цьому відіграє кладка печі, яка поглинає теплоту, а потім повторно випромінює її на вироби. Особливо помітним цей ефект є за кінетичного спалювання газу, коли полум’я і продукти згоряння мають відносно невисоку випромінювальну здатність.

У низькотемпературних печах інтенсивність нагрівання підвищують завдяки примусовій або природній циркуляції газового середовища. Рух теплоносія покращує конвективний теплообмін, вирівнює температуру в робочій камері та забезпечує рівномірне прогрівання всієї садки виробів.

Витрата газу в печах залежить від їх конструкції, експлуатаційного стану, режиму роботи, продуктивності і температури газів, що відходять. На рисуку 1.10 зображено схему теплообміну в камерній печі.

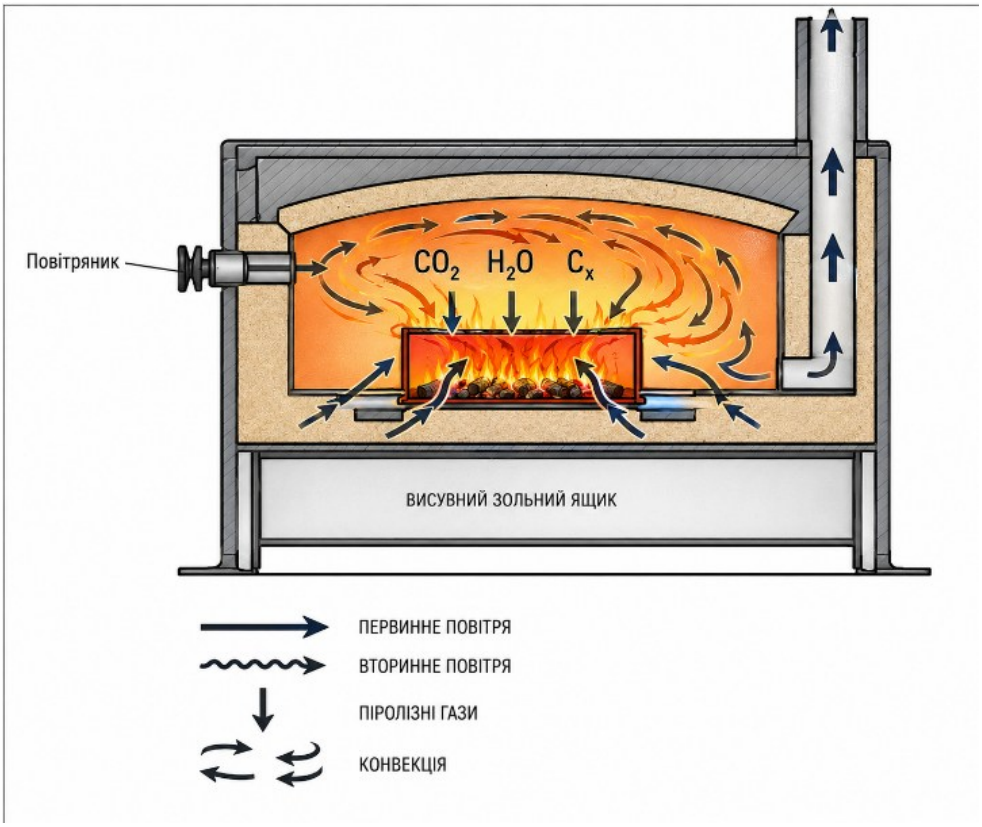


Рисунок 1.10 – Схема теплообміну в камерній печі

Одним із найбільш ефективних напрямів підвищення паливної економічності промислових печей є використання теплоти відхідних газів для попереднього підігрівання повітря, що подається на горіння. Для цього застосовують рекуператори або регенеративні теплообмінники, у яких гарячі продукти згоряння передають частину своєї теплоти холодному повітрю. Завдяки підвищенню температури повітря перед його надходженням до пальників зменшується кількість палива, необхідного для досягнення заданої температури в робочій камері. Залежно від конструкції печі, температури відхідних газів і ефективності теплообмінного обладнання економія газу може становити приблизно 20–30 %.

Утилізація теплоти відхідних газів не лише скорочує витрати палива, а й підвищує загальний коефіцієнт корисної дії печі, прискорює вихід агрегату на робочий температурний режим та зменшує теплове навантаження на навколишнє середовище. Особливо доцільним є використання рекуператорів у великих високотемпературних печах, де температура продуктів згоряння на виході залишається достатньо високою. Водночас під час проєктування таких систем необхідно враховувати можливість забруднення поверхонь теплообміну пилом, продуктами випалу та конденсатом, оскільки це знижує ефективність передачі теплоти.

У низці термічних процесів важливим є не тільки підтримання необхідної температури, а й створення спеціального захисного газового середовища. Ним заповнюють муфелі, робочі камери або тунелі печей, щоб запобігти небажаному окисненню, зневуглецюванню та іншим хімічним змінам поверхні матеріалів. Як захисну атмосферу часто застосовують продукти неповного згоряння вуглеводневих газів, які залежно від технологічних вимог частково або повністю очищують від водяної пари й вуглекислого газу.

Склад отриманого захисного середовища визначається коефіцієнтом надлишку повітря α, тобто співвідношенням фактичної кількості повітря до теоретично необхідної для повного згоряння палива. За неповного згоряння газу цей коефіцієнт є меншим за одиницю. Для одержання екзотермічної

атмосфери процес проводять, як правило, за α у межах 0,60–0,90. У такому разі реакції супроводжуються виділенням теплоти, а сформована газова суміш називається екзогазом.

До складу екзогазу можуть входити азот, оксид вуглецю, водень, водяна пара, вуглекислий газ і невелика кількість метану. Після охолодження та відповідного очищення його використовують як захисну атмосферу в процесах термічної обробки матеріалів, які не потребують сильно відновного середовища. Перевагами екзогазу є відносно проста технологія отримання та відсутність необхідності в значному підведенні зовнішньої теплоти.

Для одержання ендотермічної атмосфери вуглеводневий газ спалюють за значно меншої кількості повітря — орієнтовно за α = 0,25–0,40. У цьому випадку перебіг реакцій потребує підведення теплоти ззовні, тому процес називають ендотермічним, а отриману газову суміш — ендогазом. Його виробляють у спеціальних генераторах, заповнених каталізатором, за підвищеної температури. Основними компонентами ендогазу є азот, водень і оксид вуглецю, а вміст водяної пари та вуглекислого газу підтримують на мінімальному рівні.

Ендогаз характеризується високою відновною здатністю та широко застосовується в процесах термічної й хіміко-термічної обробки металів. Його використовують під час нагрівання під загартування середньо- і високовуглецевих, а також легованих сталей. Така атмосфера дає змогу зменшити окиснення поверхні, запобігти утворенню окалини та зберегти необхідний вміст вуглецю у поверхневому шарі виробів.

Крім того, ендогаз ефективно застосовують під час цементації та нітроцементації, твердої пайки сталевих деталей, спікання порошкових і вуглецевих композиційних матеріалів. Контроль складу газового середовища має особливе значення, оскільки навіть незначне відхилення співвідношення його компонентів може вплинути на швидкість насичення поверхні вуглецем, якість з’єднання деталей або структуру спеченого матеріалу.

Таким чином, використання рекуперації теплоти відхідних газів у поєднанні з правильно організованим газовим середовищем дає змогу одночасно скоротити витрати палива, підвищити ефективність печі та забезпечити необхідну якість термічної обробки продукції. Схему рекуператора, призначеного для використання у великих промислових печах, наведено на рисунку 1.11.

.

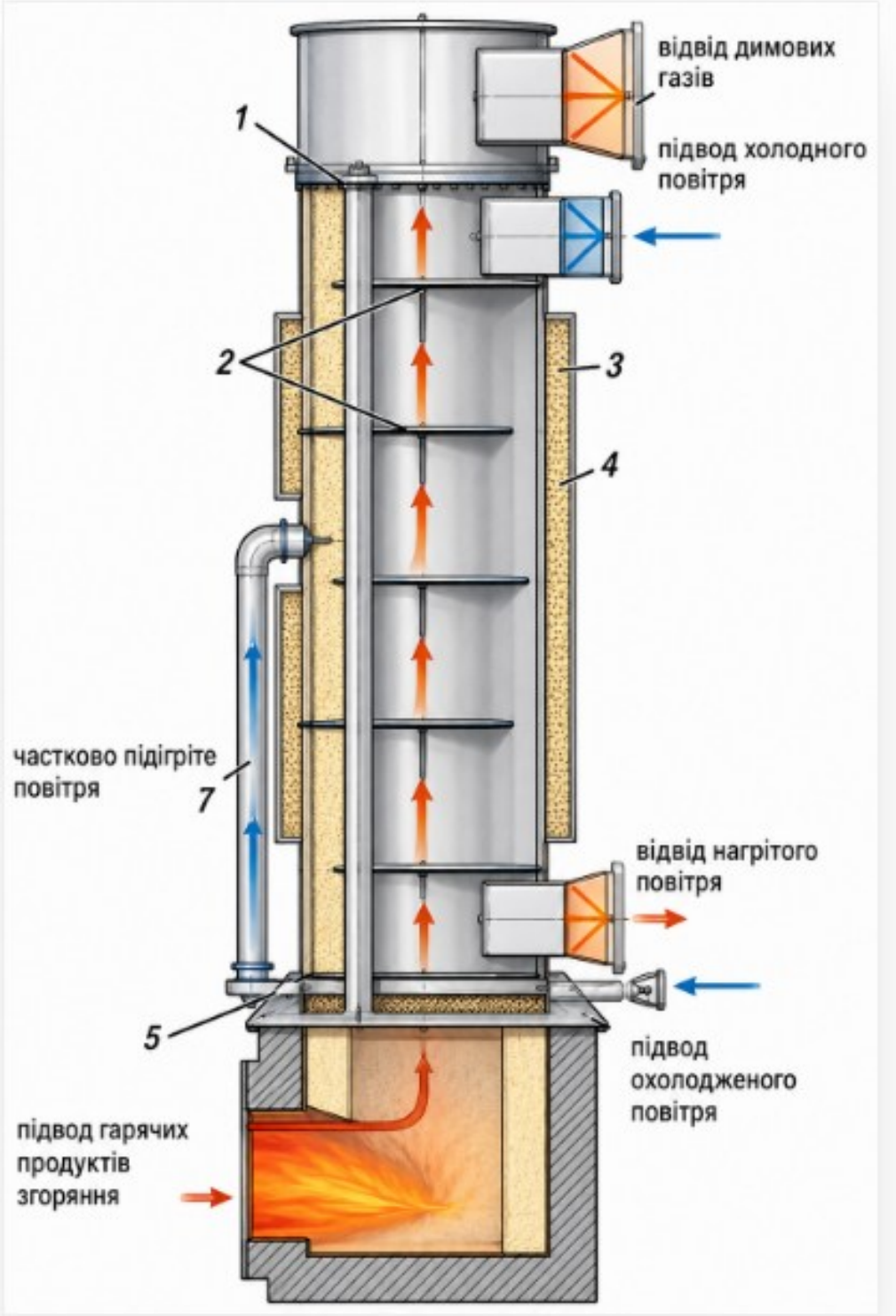


Рисунок 1.11 – Рекуператор для великих печей

Однією з найважливіших переваг киплячого шару як проміжного теплоносія є практично однакова температура в усьому об’ємі робочої камери. Такий ефект досягається завдяки інтенсивному перемішуванню твердих частинок у псевдозрідженому стані. Рівномірність температурного поля забезпечує стабільний нагрів виробів із відхиленням, що зазвичай не перевищує ±5 °С.

Інтенсивність теплообміну в киплячому шарі лише незначною мірою залежить від початкової температури деталей, а швидкість нагрівання може регулюватися відповідно до вимог технологічного процесу. Завдяки цьому в таких установках можна швидко нагрівати або охолоджувати вироби складної конфігурації та змінного поперечного перерізу. При цьому знижується ймовірність локального перегрівання, утворення значних температурних напружень, деформації та викривлення окремих частин деталей.

Водночас технологія киплячого шару має певні недоліки. До них належать значні витрати газу або повітря, необхідного для створення та підтримання режиму псевдозрідження, а також нерівномірність теплообміну між шаром і різними поверхнями виробів. Зокрема, інтенсивність теплопередачі до вертикальних і горизонтальних плоских поверхонь може істотно відрізнятися, що необхідно враховувати при проєктуванні та експлуатації нагрівальних установок.

Для нагрівання киплячого шару застосовують два основні способи спалювання газового палива. Перший передбачає спалювання газу у виносній топці, розташованій під газорозподільним пристроєм або решіткою. У цьому випадку теплота надходить до шару разом із потоком гарячих продуктів згоряння. Такий спосіб широко використовується під час сушіння та зневоднення різних сипких матеріалів, зокрема ливарних пісків. Його основними перевагами є простота конструкції, надійність роботи та достатньо високий рівень експлуатаційної безпеки. Виносні топки таких установок, як правило, функціонують під надлишковим тиском.

Другий спосіб полягає у спалюванні газоповітряної суміші безпосередньо в киплячому шарі. Попередньо підготовлена суміш газу та повітря проходить крізь отвори газорозподільної решітки, розділяється на велику кількість дрібних струменів і потрапляє до попередньо нагрітого шару інертного матеріалу. Процес горіння відбувається у безпосередній присутності розжарених частинок, які сприяють інтенсифікації запалювання, стабілізації полум’я та рівномірному розподілу теплоти в робочому об’ємі.

У масовому виробництві керамічних виробів для проведення процесу випалювання широко застосовують тунельні печі. Такі печі забезпечують високу продуктивність, безперервність технологічного процесу та стабільність температурного режиму. Їх конструкція дозволяє механізувати й автоматизувати переміщення пічних вагонеток із продукцією, завдяки чому зменшується вплив людського фактора на якість випалювання та точність дотримання заданих параметрів.

Важливою перевагою тунельних печей є також зниження питомих витрат палива на одиницю готової продукції. Це досягається шляхом використання сучасних вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів, які зменшують втрати теплоти через огороджувальні конструкції. Ще вагомішу роль відіграє принцип повторного використання теплоти відхідних газів. Перед видаленням із печі гарячі продукти згоряння проходять через зону попереднього нагрівання та віддають частину своєї теплоти необпаленим виробам. У результаті знижується витрата палива, підвищується енергетична ефективність установки та забезпечується більш плавне нагрівання керамічної продукції.

1.3.2 Електричні печі для обпалу кераміки

Електричні печі опору за способом виділення тепла можна підрозділити на дві групи: побічної дії і прямої дії. До першої групи відноситься переважна

кількість усіх печей опору, до другої - лише декілька типів печей, що отримали обмежене застосування. Крім того, печі опору можуть бути поділені на низькотемпературні, середньо- і високотемпературні, а також на печі термічні і плавильні. І, нарешті, вони можуть бути розділені на печі періодичної і безперервної дії (методичні).

Класифікацію електричних печей наведено на рисунку 1.12.

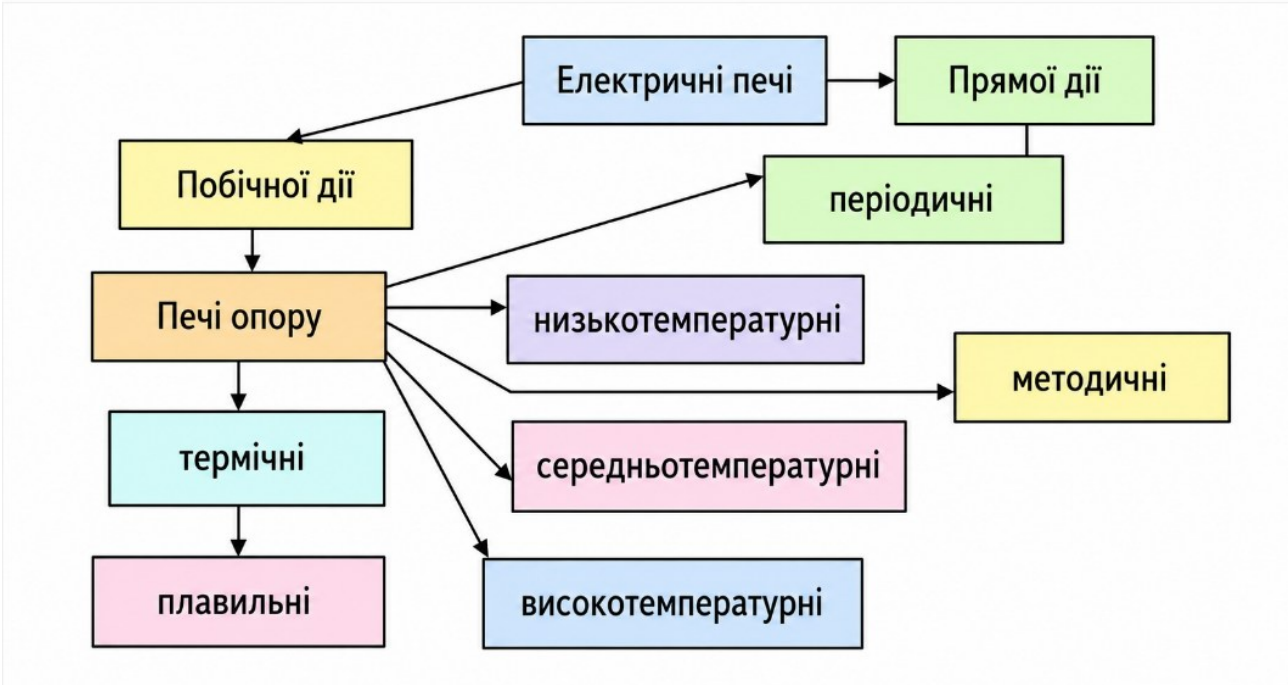


Рисунок 1.12 – Класифікація електричних печей

У печах періодичної дії вироби завантажують у робочу камеру, де вони залишаються нерухомими протягом усього циклу теплової обробки та поступово нагріваються до заданої температури. У певний момент часу температура в різних точках робочого простору такої печі є приблизно однаковою, проте її значення змінюється відповідно до встановленого в часі температурного режиму. Після завершення нагрівання та необхідної витримки вироби вивантажують, а піч готують до наступного робочого циклу.

У печах безперервної дії, які також називають методичними, технологічний процес організований інакше. Вироби подаються через завантажувальну частину печі, поступово переміщуються вздовж її робочого простору, послідовно проходять різні температурні зони та виходять із

розвантажувального кінця нагрітими до необхідної температури. У таких установках температура змінюється переважно вздовж довжини печі: відносно низькі значення спостерігаються в зоні завантаження, а найбільш високі — у зоні остаточного нагрівання. Водночас за сталого режиму роботи температура в кожній окремій точці камери практично не змінюється з часом.

За конструкцією методичні печі є складнішими порівняно з печами періодичної дії, оскільки вони повинні оснащуватися спеціальними механізмами для безперервного або періодичного переміщення виробів. Незважаючи на це, такі печі забезпечують вищу продуктивність за аналогічних габаритних розмірів, дозволяють підтримувати стабільні умови нагрівання та гарантують повторюваність режимів термічної обробки. Завдяки цим перевагам печі безперервної дії широко використовуються у великосерійному та масовому виробництві, де необхідно обробляти значні потоки однотипних деталей.

Конструктивне виконання методичних печей значною мірою визначається способами завантаження, вивантаження та транспортування виробів усередині робочої камери. Залежно від технологічного призначення для цього можуть використовуватися конвеєри, роликові столи, штовхачі, підвісні механізми, пічні вагонетки або інші транспортні пристрої. Обрана система переміщення впливає не лише на загальну будову печі, а й на її продуктивність, надійність, енергоефективність і зручність експлуатації.

До середньотемпературних зазвичай відносять печі, робоча температура яких перебуває приблизно в межах від 600–700 до 1250 °C. У цьому температурному діапазоні основним механізмом передавання теплоти до виробів стає теплове випромінювання. Верхня межа температури значною мірою визначається можливістю застосування металевих нагрівальних елементів, здатних тривалий час працювати в окиснювальному середовищі без істотної втрати міцності та електричних властивостей.

За температур, вищих за зазначений діапазон, необхідно використовувати нагрівачі, виготовлені з неметалевих матеріалів, сполук на основі дисиліциду молібдену або спеціальних тугоплавких металів. Частина таких матеріалів

може надійно працювати лише у вакуумі чи захисній атмосфері. Це потребує застосування герметичних робочих камер, систем вакуумування або подачі захисних газів, що суттєво ускладнює конструкцію печі та відрізняє високотемпературні установки від звичайних середньотемпературних агрегатів.

Середньотемпературні термічні печі характеризуються значним різноманіттям конструкцій. Лише окремі їх типи випускаються серійно та можуть розглядатися як відносно універсальні. Значно більшу групу становлять спеціалізовані печі, конструкція яких пристосована до нагрівання конкретних виробів, виконання визначених технологічних операцій і забезпечення заданої продуктивності. Найбільше практичне значення мають типи печей, які відображають основні напрями розвитку сучасного промислового пічного обладнання.

Одним із найпростіших і водночас універсальних типів термічного обладнання є камерна піч. Її основним елементом є робоча камера прямокутної форми, внутрішня поверхня якої захищена вогнетривким футеруванням і шаром теплоізоляції. Зверху камера перекривається склепінням, а вся конструкція розміщується всередині металевого кожуха, який забезпечує механічну міцність агрегату та захист його зовнішніх елементів.

Завантаження і вивантаження виробів здійснюють через спеціальний отвір у передній стінці печі, який закривається теплоізольованими дверцятами. Печі невеликої потужності для зручності обслуговування та завантаження зазвичай встановлюють на опорних ніжках або металевій рамі. Великогабаритні промислові агрегати переважно монтують безпосередньо на спеціально підготовленому фундаменті або підлозі виробничого приміщення.

Нагрівальні елементи камерної печі найчастіше розміщують у поді та на бічних стінках робочої камери. У деяких конструкціях нагрівачі додатково встановлюють на склепінні. У печах великих розмірів для підвищення рівномірності температурного поля нагрівальні елементи можуть також розташовуватися на задній стінці та внутрішній поверхні дверцят. Така схема

дозволяє зменшити різницю температур між центральними й периферійними зонами робочого простору.

Нагрівачі, розміщені в поді печі, зазвичай перекривають жаростійкими або вогнетривкими плитами. На ці плити встановлюють деталі, піддони або технологічну тару з виробами, що підлягають нагріванню. Захисне покриття запобігає безпосередньому контакту виробів із нагрівальними елементами, захищає їх від механічних пошкоджень і сприяє більш рівномірному розподілу теплоти.

Повна герметизація камерної печі є складним завданням, оскільки в місцях прилягання дверцят неминуче виникають незначні щілини. Через них до робочої камери може проникати атмосферне повітря, а пічні гази або захисна атмосфера — виходити назовні. Надходження кисню посилює окиснення поверхні металевих виробів, спричиняє утворення окалини та може негативно впливати на якість термічної обробки.

Для зменшення надходження кисню під час відкривання дверцят застосовують так звану полум’яну завісу. Її утворюють шляхом подавання горючого газу через трубку з рядом отворів, установлену поблизу завантажувального вікна печі. Під час виходу газу з отворів він запалюється та створює суцільний або переривчастий шар полум’я. У процесі горіння витрачається кисень повітря, що надходить через відкритий отвір, унаслідок чого зменшується його проникнення всередину камери. Використання полум’яної завіси дозволяє обмежити окиснення нагрітих деталей і частково зберегти необхідний склад газового середовища в печі.

На рисунку 1.13 показано схему електричної печі опору.

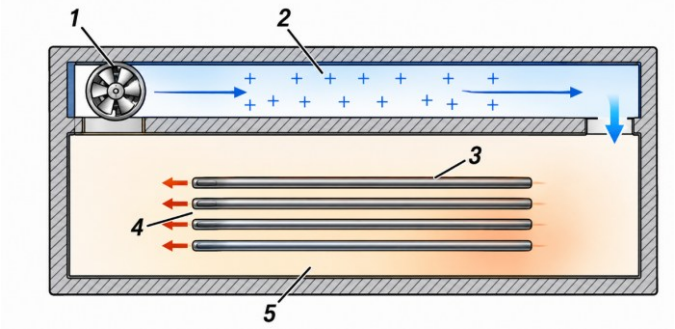


Рисунок 1.13 – Схема електричної печі опору

На рисунку 1.13 за допомогою вентилятора 1 створюється циркуляція повітря. Нагріте до заданої температури в камері з нагрівними елементами 2 повітря потрапляє в робочу камеру 5 печі, де розташовані вироби 4. переміщуючись вздовж виробів повітряний потік 3 нагріває їх, а сам при цьому охолоджується. Максимальне охолодження повітря відбувається в початковий момент, після завантаження холодних виробів до печі.

Для цехів із великою виробничою потужністю та стабільним технологічним режимом доцільно застосовувати печі безперервної дії. Такі агрегати забезпечують постійне переміщення виробів через окремі температурні зони та дають змогу організувати нагрівання, ізотермічну витримку, а за потреби — контрольоване охолодження продукції.

Середньотемпературні методичні печі зазвичай складаються з кількох послідовно розташованих ділянок. Спочатку вироби поступово нагріваються, після чого надходять до зони витримки. Її довжина визначається особливостями технологічного процесу. Під час загартування достатньо короткочасної витримки, необхідної лише для вирівнювання температури по всьому об’єму виробу, після чого продукцію переміщують у водяне або масляне охолоджувальне середовище. У процесі цементації зона витримки має бути значно довшою, оскільки насичення поверхневого шару вуглецем відбувається поступово і потребує тривалого перебування виробів за заданої температури.

Якщо технологія передбачає повільне охолодження безпосередньо в печі, після зони витримки встановлюють спеціальну охолоджувальну камеру без нагрівальних елементів. Залежно від допустимої швидкості зниження температури вона може мати посилену теплоізоляцію або систему водяного охолодження.

До високотемпературних відносять печі, робоча температура яких перевищує приблизно 1200–1250 °С. Раніше межа між середньо- і високотемпературними агрегатами становила близько 1000–1050 °С. Однак застосування нагрівальних елементів із залізохромоалюмінієвих сплавів дало

змогу підвищити її. Печі, що працюють у діапазоні 1150–1250 °С, займають проміжне положення, оскільки за таких температур використання металевих внутрішніх механізмів і муфелів істотно ускладнюється.

У цьому температурному інтервалі перевагу надають конструкціям, які не потребують складних металевих пристроїв усередині робочої камери. До них належать камерні, шахтні, карусельні печі, а також агрегати з крокуючим подом.

Передача теплоти в електричних печах здійснюється переважно випромінюванням від розжарених нагрівальних елементів. Частка конвективного теплообміну, спричиненого рухом газів у камері, зазвичай є невеликою. Тому зі збільшенням поперечного перерізу печі зростає ризик нерівномірного розподілу температури, що необхідно враховувати під час розміщення нагрівачів і виробів.

Для ефективнішого використання теплоти електричні тунельні печі можуть виконуватися двоканальними. Вагонетки в паралельних каналах рухаються назустріч одна одній: холодні вироби попередньо нагріваються теплотою вагонеток, які виходять із зони випалу та поступово охолоджуються. За близького рівня споживання електроенергії продуктивність двоканальної печі може бути майже вдвічі вищою, ніж одноканальної. Крім того, така конструкція дає змогу одночасно проводити два види випалу за різних температурних режимів.

Електричне нагрівання є особливо ефективним під час випалу продукції, яка в полуменевих печах потребує використання захисних капселів. Відсутність безпосереднього контакту виробів із продуктами згоряння спрощує організацію процесу та покращує якість готової продукції. Водночас застосування капселів збільшує масу садки й витрати енергії на її нагрівання, тому їх використання повинно бути технологічно обґрунтованим.

Важливим питанням експлуатації електричних печей є довговічність і вартість нагрівальних елементів. Середній ресурс їхньої роботи може становити близько 2000 годин, унаслідок чого заміна іноді проводиться кілька разів

протягом року. Водночас нагрівальні елементи є одним із небагатьох компонентів, що потребують регулярного ремонту. Автоматичні регулятори температури обмежують перегрівання, забезпечують стабільний режим випалу та сприяють продовженню строку служби електропечі.

1.3.3 Порівняння електричних та газових печей для обпалу кераміки

Одним із суттєвих недоліків газових печей є складність організації руху повітря та продуктів згоряння. Їх аеродинамічний тракт характеризується значним опором, що ускладнює підтримання необхідних режимів нагрівання й охолодження виробів та збільшує витрати електроенергії на роботу вентиляційного обладнання.

Особливо проблемною є зона охолодження. Для поступового та рівномірного зниження температури керамічних виробів через неї необхідно пропускати значно більший об’єм повітря, ніж потрібно безпосередньо для спалювання палива в зоні випалу. Це пов’язано з необхідністю охолодити продукцію до температури, за якої її можна безпечно вивантажувати з печі без ризику виникнення тріщин, деформацій та інших дефектів.

Якщо кількість охолоджувального повітря обмежити лише витратою, необхідною для горіння газу, тривалість охолодження істотно збільшиться. У результаті подовжується загальний технологічний цикл, знижується пропускна здатність печі та погіршуються техніко-економічні показники виробництва. Тому через зону охолодження доцільно подавати більшу кількість повітря, а його надлишок після нагрівання відбирати та використовувати в інших технологічних процесах, наприклад для сушіння сировини або напівфабрикатів.

Збільшення об’єму теплоносія, що циркулює в печі, супроводжується підвищенням швидкості руху димових газів і гарячого повітря каналами, повітроводами та іншими елементами системи. Водночас опір аеродинамічного

тракту зростає пропорційно квадрату швидкості потоку. Через це навіть відносно невелике підвищення продуктивності печі може вимагати суттєвого збільшення частоти обертання вентиляторів і значного зростання їх електроспоживання.

Отже, спроба підвищити продуктивність діючої газової печі лише за рахунок збільшення витрати повітря та потужності вентиляторів часто виявляється малоефективною. Отриманий приріст випуску продукції не компенсує зростання витрат електроенергії, підвищення навантаження на обладнання та ускладнення стабілізації температурного режиму.

Важливий вплив на роботу печі має також спосіб розміщення керамічних виробів у робочому просторі. Садка повинна відповідати конструкції печі, забезпечувати вільний рух газового потоку та не створювати надмірного аеродинамічного опору. При цьому необхідно зберегти можливість контролювати поширення полум’я і температуру по висоті та перерізу пічного каналу.

Конструкція садки має бути механічно стійкою, зручною для завантаження і розвантаження, а також забезпечувати рівномірний розподіл теплового потоку між виробами. Від правильності укладання продукції значною мірою залежать інтенсивність теплообміну, рівномірність нагрівання, тривалість випалу та якість готової кераміки. Невдале розміщення виробів може спричинити утворення локальних зон перегрівання або недостатнього нагрівання, що збільшує кількість браку.

Сучасні газові печі можуть обладнуватися автоматизованими системами керування. Такі системи забезпечують автоматичний розпал пальників, регулювання тиску в окремих зонах, підтримання заданого співвідношення газу і повітря, а також керування процесами нагрівання та охолодження. Автоматизація підвищує стабільність технологічного режиму, однак не усуває повністю недоліків, пов’язаних із невисоким коефіцієнтом корисної дії та значними аеродинамічними втратами.

У керамічному виробництві газові печі зазвичай застосовують для випалу великогабаритних і масивних виробів, де необхідний значний тепловий потік та велика місткість робочої камери. Водночас розвиток електротермічних технологій сприяв поширенню електричних печей, які за багатьма експлуатаційними показниками успішно конкурують із полум'яними агрегатами.

Основною перевагою електричних печей є можливість точного формування температурного графіка. Система керування дозволяє програмувати швидкість нагрівання, тривалість витримки та темп охолодження відповідно до заздалегідь заданої кривої випалу. Це особливо важливо для керамічних виробів, які чутливі до різких температурних змін і потребують суворого дотримання технологічного режиму.

Відсутність продуктів згоряння безпосередньо в робочій камері забезпечує чистіші умови випалу. Поверхня виробів не забруднюється сажею, золою або домішками палива, що позитивно впливає на їх зовнішній вигляд, структуру та якість. Завдяки більш рівномірному температурному полю зменшується кількість дефектних виробів і підвищується стабільність характеристик готової продукції.

Електричні печі також відзначаються меншою тривалістю виходу на робочий режим, простішим обслуговуванням та зручністю автоматизації. Їх експлуатація не потребує газорозподільного обладнання, пальників, систем підготовки палива і складних димових каналів. Це спрощує конструкцію установки, зменшує кількість допоміжного обладнання та полегшує проведення технічного обслуговування.

Додатковою перевагою є покращення санітарно-гігієнічних умов праці. Відсутність відкритого полум'я та продуктів згоряння зменшує забруднення повітря в цеху, рівень теплового випромінювання і пожежну небезпеку. Крім того, електричні печі створюють менше шуму та не потребують постійного контролю за подачею газу.

Висока енергоефективність електричних печей значною мірою забезпечується якісною теплоізоляцією. Між нагрівальною камерою і зовнішнім корпусом передбачають теплоізоляційні шари та повітряні проміжки, які знижують втрати теплоти в навколишнє середовище. Завдяки цьому для досягнення необхідної температури потрібно менше підведеної потужності, а зовнішні поверхні обладнання нагріваються слабше.

Застосування декількох незалежних груп нагрівальних елементів дозволяє гнучко керувати температурою в окремих частинах робочої камери. Піч може функціонувати як у повністю автоматичному, так і в ручному режимі. Автоматичний режим забезпечує високу точність і повторюваність циклу, тоді як ручне керування дає змогу спростити систему та знизити початкову вартість обладнання.

Важливим аргументом на користь електричних печей є економічність випалу. За умови високого коефіцієнта корисної дії та точного регулювання температури витрати енергії на одиницю продукції можуть бути нижчими, ніж у газових установках. Економічний ефект додатково посилюється завдяки скороченню кількості браку, зменшенню витрат на допоміжні матеріали, спрощенню обслуговування та відсутності втрат, пов’язаних із видаленням значного об’єму продуктів згоряння.

Таким чином, газові печі доцільно використовувати переважно для великомасштабного випалу масивної продукції, однак їх експлуатація пов’язана зі значними аеродинамічними опорами, високими витратами на вентиляцію та складністю керування тепловими потоками. Електричні печі забезпечують точніше регулювання температури, вищу чистоту процесу, кращі умови праці та можливість зниження питомих енергетичних витрат. Порівняльні переваги, недоліки та основні технічні характеристики газових і електричних печей для випалу кераміки наведено в таблиці 1.1.

В таблиці 1.1 наведено переваги та недоліки, а також технічні характеристики газових та електричних печей для обпалу кераміки.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика печей

Тип печі	Газові печі	Електричні печі
1	2	3
переваги	1)час, що витрачається на обпал однієї садки менший	1)можливість чіткого контролю температурного режиму і автоматичного регулювання обпалу за заздалегідь наміченою кривою температур; 2)абсолютна чистота обпалу; 3)зниження кількості браку; 4)скорочення тривалості обпалу; 5)економія у витратах допоміжних засобів (капселів, коробів і т. ін.); 6)легкість обслуговування; 7)покращення санітарно гігієнічних умов праці
1	2	3
Недоліки	1)великі опори аеродинамічної системи; 2)незначне збільшення продуктивності печі призводить до значного збільшення витрат електроенергії; 3)високі ціни на газ для виробництва; 4)низький ККД печей	1)більше часу витрачається на обпал однієї садки
Технічні характеристики: -встановлена потужність; -температура	До 2 МВт До 1250ºС	До 500 кВт До 1250ºС

Застосування автоматичного режиму керування електричною піччю дає змогу суттєво спростити процес випалу керамічних виробів і зменшити потребу в постійному втручанні обслуговуючого персоналу. Після введення необхідних параметрів і запуску програми терморегулятор самостійно підтримує заданий температурний графік, контролює швидкість нагрівання, тривалість витримки

та момент завершення технологічного циклу. Завдяки цьому забезпечується висока точність дотримання режиму випалу, зменшується ймовірність помилок оператора та підвищується стабільність якості готової продукції.

Автоматизація також створює можливість проводити випал у нічний період без постійного нагляду персоналу. За наявності багатозонного обліку електроенергії це дозволяє використовувати нижчий нічний тариф і відповідно зменшувати експлуатаційні витрати підприємства. Терморегулятори, що застосовуються в сучасних електричних печах, характеризуються достатньо високою надійністю, тривалим терміном служби та простотою налаштування. Вони мають відносно невисоку вартість у порівнянні з економічним ефектом, який забезпечують завдяки точному керуванню процесом і зниженню кількості браку.

Для регулювання електричних параметрів печі можуть використовуватися спеціальні трансформатори. Зміна напруги живлення дає можливість керувати потужністю нагрівальних елементів і, відповідно, інтенсивністю нагрівання робочої камери. Крім того, трансформаторне регулювання дозволяє частково компенсувати зміну електричного опору нагрівачів у міру підвищення їх температури. Це сприяє стабільнішій роботі печі, зменшенню електричних і теплових перевантажень нагрівальних елементів та подовженню строку їх експлуатації.

У тих випадках, коли технологія випалу передбачає створення відновлювальної атмосфери, до робочої камери подають спеціальні газові суміші. Вони змінюють хімічний склад середовища та впливають на процеси, що відбуваються в матеріалі під час нагрівання. У печах безперервної дії подача таких газів може здійснюватися автоматично. Система керування регулює їх склад, витрату та співвідношення залежно від температури, тривалості обробки і вимог до властивостей готового виробу. Це забезпечує відтворюваність технологічного режиму і дозволяє отримувати продукцію із заданими характеристиками.

Порівняння характеристик газових та електричних печей свідчить про те, що електричні установки мають низку суттєвих експлуатаційних і технологічних переваг. До них належать точніше регулювання температури, простіша автоматизація, відсутність продуктів згоряння в робочій зоні, вищий коефіцієнт корисної дії, менші теплові втрати та зручніше обслуговування.

Хоча газові печі можуть мати вищу встановлену теплову потужність і використовуватися для оброблення великих партій масивної продукції, їх застосування не завжди є економічно обґрунтованим. Висока вартість природного газу для промислових споживачів, значні втрати теплоти з димовими газами, порівняно низький коефіцієнт корисної дії та додаткові витрати на роботу вентиляційного і газорозподільного обладнання підвищують собівартість випалу.

Отже, за умов виробництва невеликих і середніх партій керамічних виробів, а також за необхідності точного дотримання температурного режиму застосування електричних печей є більш доцільним. Їх використання дозволяє знизити питомі енергетичні витрати, скоротити тривалість технологічного циклу, підвищити якість продукції та забезпечити більш гнучке керування виробничим процесом.

2 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕЧЕЙ

2.1 Вибір електричної печі для обпалу кераміки

Для виготовлення керамічних корпусів плавких запобіжників та опорних ізоляторів на підприємстві тривалий час використовувалася газова піч установленою тепловою потужністю 1 МВт. Основною технологічною операцією, що виконувалася в цій печі, був високотемпературний випал керамічних виробів із забезпеченням заданого температурного режиму та необхідної тривалості витримки.

З метою скорочення витрат природного газу та підвищення енергетичної ефективності піч була оснащена рекуператором. У цьому теплообмінному пристрої теплота відхідних продуктів згоряння використовувалася для попереднього нагрівання повітря, яке надходило до газових пальників. Таке технічне рішення дозволяло частково повертати теплоту в технологічний процес і зменшувати втрати енергії з димовими газами.

Однак навіть за наявності системи рекуперації фактичний коефіцієнт корисної дії газової печі становив лише близько 17 %. Це означає, що основна частина енергії палива втрачалася разом із відхідними газами, через нагріті огороджувальні конструкції, завантажувальні отвори та внаслідок інших теплових втрат. Низький ККД установки спричиняв значну питому витрату природного газу та підвищував собівартість керамічної продукції.

У початковому техніко-економічному розрахунку використовувалися ціни 2011 року: приблизно 3900 грн за 1000 м³ природного газу та 0,79 грн за 1 кВт·год електроенергії. Для приведення розрахунку до умов 2025 року необхідно врахувати суттєве зростання вартості енергетичних ресурсів.

У 2025 році середньозважений ціновий індекс електроенергії базового навантаження на ринку «на добу наперед» становив приблизно 5292,40 грн/МВт·год без ПДВ. Крім вартості самої електроенергії, непобутові споживачі оплачували передачу, розподіл і послуги постачальника. Тариф НЕК

«Укренерго» на передачу електричної енергії у 2025 році становив 686,23 грн/МВт·год без ПДВ.

Ціна природного газу для промислових споживачів протягом 2025 року також істотно змінювалася. Наприкінці року біржові ціни перебували переважно в межах 19 140–21 250 грн за 1000 м³ без ПДВ. Після врахування ПДВ, транспортування та розподілу кінцева вартість газу для конкретного підприємства могла бути вищою.

Для виконання укрупненого порівняльного розрахунку приймаємо такі орієнтовні ціни енергоносіїв у 2025 році:

природний газ — 26 000 грн за 1000 м³ з урахуванням ПДВ і мережевих складових;

електрична енергія — 7,80 грн/кВт·год з урахуванням ПДВ, передачі, розподілу та послуг постачальника.

Необхідно зазначити, що ціна електроенергії для непобутових споживачів не є єдиною для всієї України. Вона залежить від умов договору з постачальником, графіка споживання, оператора системи розподілу та класу напруги, до якого приєднане підприємство.

За виробничими даними, для випалювання партії з 1000 ізоляторів витрачається:

у газовій печі — 950 м³ природного газу;

в електричній печі — 1600 кВт·год електроенергії.

Вартість одного випалу в газовій печі за цінами 2025 року становитиме:

$$Сгаз = 950 / 1000 \cdot 26\,000 = 24\,700 \text{ грн.}$$

Вартість аналогічного випалу в електричній печі:

$$Сел = 1600 \cdot 7{,}80 = 12\,480 \text{ грн.}$$

Отже, економія під час випалювання кожної партії з 1000 ізоляторів дорівнюватиме:

$$Е = 24\,700 – 12\,480 = 12\,220 \text{ грн.}$$

Питомі енергетичні витрати на один виріб становитимуть:

при використанні газової печі — 24,70 грн на один ізолятор;

при використанні електричної печі — 12,48 грн на один ізолятор.

Таким чином, застосування електричної печі дозволяє скоротити витрати на енергоносії приблизно на 49,5 % порівняно з газовою установкою. Вартість енергії, необхідної для випалювання продукції в газовій печі, майже у два рази перевищує відповідний показник електричної печі.

Додатковою перевагою електричного нагрівання є вищий коефіцієнт корисної дії. Якщо ККД газової установки становить близько 17 %, то для електричної печі він може досягати приблизно 80 %. Електричні печі також забезпечують точніше регулювання температури, рівномірніше температурне поле, спрощення автоматизації процесу та відсутність продуктів згоряння безпосередньо в робочій камері.

На підставі проведеного техніко-економічного порівняння було обґрунтовано рішення про припинення експлуатації газової печі як недостатньо енергоефективної та економічно невигідної. Замість неї запропоновано встановити дві електричні печі різної потужності, призначені для випалювання керамічних виробів, які відрізняються габаритами, масою та необхідним температурним режимом.

Використання двох установок дозволить раціональніше розподіляти виробниче навантаження. Для невеликих партій і виробів меншого розміру можна застосовувати піч меншої потужності, не витрачаючи енергію на нагрівання надлишкового об’єму робочої камери. Для великих виробів або значних партій продукції доцільно використовувати потужнішу електричну піч.

Річний економічний ефект від заміни обладнання залежатиме від кількості виробничих циклів. Його можна визначити за залежністю:

$$Еріч = 12\ 220 \cdot n,$$

де n — кількість випалів протягом року.

Наприклад, при виконанні 100 випалів на рік очікуване скорочення витрат на енергоносії становитиме:

$$Еріч = 12\ 220 \cdot 100 = 1\ 222\ 000 \text{ грн на рік.}$$

Установлена потужність Ny — це максимальна електрична потужність, яку споживає піч під час реалізації заданого режиму термічної обробки. Її визначають із певним запасом, необхідним для компенсації старіння нагрівальних елементів, можливого зниження напруги в електричній мережі, теплових втрат і забезпечення необхідної швидкості нагрівання виробів.

Отже, встановлена потужність електричних печей повинна бути достатньою не лише для нагрівання керамічної продукції до температури випалу, а й для компенсації втрат теплоти через футерування, дверцята, завантажувальні отвори та інші елементи конструкції. Подальший вибір потужності печей виконується на основі теплового балансу, тривалості технологічного циклу, маси завантаження та допустимого запасу потужності.

Встановлена потужність N_y - це споживана електропіччю при заданому режимі термообробки потужність, узята із запасом, що враховує " старіння" нагрівачів і можливе тимчасове падіння напруги в мережі. Встановлену потужність N_y можна визначити за формулою:

$$N_y = k_з \cdot N_{потр} \qquad (2.1)$$

де $N_{потр}$ - потужність, споживана з мережі при заданомурежимі, Вт;

$k_з$ - коефіцієнт запасу потужності, $k_з$ =1,2 ÷1,4 - для ЕПО періодичної дії.

Споживана потужність витрачається на нагрів садки і допоміжних пристроїв, прогрів футерування і атмосфери печі, на компенсацію теплових втрат. Визначити споживану потужність $N_{потр}$ можна за формулою:

$$N_{потр} = N_з + N_{всп} + N_{пот} \qquad (2.2)$$

де $N_з$ - потужність, необхідна для нагріву завантаження і проходження фізико-хімічних процесів в ній, Вт;

$N_{всп}$ - потужність, необхідна для нагріву допоміжних пристосувань (човників, тиглів, конвеєра і тому подібне),Вт;

$N_{пот}$ - потужність, необхідна для компенсації теплових втрат, Вт.

Теплоту, необхідну для нагріву завантаження ідопоміжних пристроїв, слід називати корисною $Q_{кор}$, а відповідну потужність - корисною потужністю $N_{кор}$.

Індекс типу електропечі - складається з трьох або чотирьох букв, ряду цифр і допоміжних букв і цифр.

Перша буква С означає вид нагріву - опором;

Друга - основна конструктивна ознака електропечі :

Н – камерна; Ш – шахтна; Я – ямна (сундукова); Г – колпакова; Д - з висувним черенем.

Третя буква означає середовище в пічному просторі:

О – окислювальна (повітря); З – захисна (контрольована) атмосфера; А - що азотує; Ц - цементація.

Четверта (допоміжна) буква, вживана в індексі печей із специфічними особливостями конструкції, означає:

З – сушарна; М - муфельна.

Цифри після букв (через тире) відповідають розмірам робочого простору в дециметрах: прямокутних печей -ширина, довжина і висота, циліндричних - діаметр і висота. Далі через дріб вказується номінальна температура печі в сотнях градусів Цельсія.

Нижче наведено розрахунки печей, необхідних для встановлення на виробництві.

За формулою (2.2) для печі з потужністю, необхідною для нагріву завантаження і проходження фізико-хімічних процесів $N_з$=153 кВт і потужністю, необхідною для компенсації теплових втрат $N_{пот}$=20 кВт визначаємо споживану потужність:

$$N_{потр} = 153 + 20 = 173, кВт.$$

За формулою (2.1) визначаємо встановлену потужність. Встановлена потужність дорівнюватиме:

$$N_у = 1{,}3 \cdot 173 = 224{,}9, кВт$$

Відповідно до розрахованої встановленої потужності для виконання високотемпературного випалу доцільно обрати електричну піч СДО 20.30.18/12,5, оснащену викатним черенем. Така конструкція істотно спрощує завантаження і розвантаження керамічних виробів, оскільки садка формується поза межами робочої камери. Після завершення укладання виробів черінь за допомогою електропривода переміщується всередину печі, що скорочує тривалість допоміжних операцій і підвищує безпечність обслуговування обладнання.

Робочу камеру печей цього типу виготовляють переважно з легких волокнистих вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів. Порівняно з традиційною цегляною футеровкою вони мають значно меншу масу та теплоємність, тому для їх нагрівання потрібно менше електроенергії. Це забезпечує швидкий вихід печі на заданий температурний режим, скорочує тривалість охолодження та зменшує непродуктивні втрати теплоти. Використання волокнистої теплоізоляції також дає змогу створювати печі з великим об’ємом робочого простору за відносно невисокої питомої встановленої потужності.

Об’єм камери промислових печей такої конструкції може досягати 100 м³ і більше, що робить їх придатними як для серійного, так і для великосерійного виробництва. Номінальна температура експлуатації становить до 1300 °С, тому обладнання може використовуватися для випалювання електротехнічного фарфору, керамічних ізоляторів, корпусів запобіжників та інших виробів, які потребують високотемпературного спікання. За відсутності садки час нагрівання до номінальної температури зазвичай становить приблизно 1–2 години, хоча фактична тривалість виходу на режим залежить від об’єму камери, маси завантаження, початкової температури та заданої швидкості нагрівання.

Електричні нагрівальні елементи розміщують усередині камери на спеціальних керамічних або жаростійких трубках. Вони можуть

встановлюватися на бічних і торцевих стінках, внутрішній поверхні дверей, а за необхідності — також у нижній частині печі або безпосередньо в конструкції череня. Таке розташування забезпечує підведення теплоти з різних напрямків і сприяє більш рівномірному нагріванню всієї садки.

Для зменшення температурної нерівномірності робочий простір поділяють на кілька незалежних зон нагрівання. Кожна зона оснащується окремими нагрівальними елементами, датчиками температури та власним каналом регулювання потужності. Автоматична система керування порівнює фактичні значення температури із заданою програмою і коригує роботу кожної групи нагрівачів. Завдяки цьому зменшується перепад температур між різними ділянками камери, забезпечується рівномірне спікання виробів і знижується ймовірність появи тріщин, деформацій та інших дефектів.

Переміщення викатного череня і відкривання дверей здійснюються за допомогою електромеханічних приводів. Це дає змогу механізувати операції завантаження, вивантаження та закривання камери, зменшити фізичне навантаження на персонал і підвищити точність позиціонування конструктивних елементів. У системі керування можуть бути передбачені блокування, які не допускають увімкнення нагрівачів за відкритих дверей або неправильного положення череня.

Для полегшення транспортування і монтажу великогабаритні печі СДО можуть виготовлятися у модульному виконанні. У цьому разі корпус, робоча камера, двері, черінь, система нагрівання та інші основні вузли постачаються окремими секціями й збираються безпосередньо на промисловому майданчику. Елементи, що перевищують допустимі транспортні габарити, виконують знімними. Такий підхід спрощує автомобільне перевезення обладнання, скорочує витрати на доставку та полегшує проведення ремонтних і модернізаційних робіт.

Отже, застосування електропечі СДО 20.30.18/12,5 з викатним черенем забезпечує поєднання високої температури випалу, низької теплоємності футеровки, рівномірного нагрівання садки та автоматизованого керування

технологічним процесом. Це сприяє зниженню питомого енергоспоживання, підвищенню продуктивності та поліпшенню якості готових керамічних виробів.

Технічні характеристики печі СДО20.30.18/12,5 наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики печі СДО 20.30.18/12,5

Встановлена потужність	215±15 кВт
Кількість зон нагріву	3
Типи терморегуляторів/ типи термопар	ТРП-08 ТП/ТВП
Максимальна температура в робочому просторі печі	1250 °С
Розмір робочого простору(ширина × довжина × висота)	2000×3000×1800 мм
Середовище в робочому просторі	повітря
Діапазон автоматичного регулювання температури	40÷1250 °С
Стабільність регулювання температури в тепловому режимі, що встановлюється, без садіння	±2 °С
Механізм переміщення череня	електропривід
Механізм підйому дверей	електропривід

Зовнішній вигляд печі СДО 20.30.18/12,5 показано на рисунку 2.1



Рисунок 2.1 – Електропіч СДО 20.30.18/12,5

2.2 Тепловий розрахунок електропечі СДО 20.30.18/12,5

Метою теплового розрахунку електричних печей опору є визначення раціональних енергетичних, конструктивних, геометричних та економічних параметрів установки, за яких забезпечується надійне виконання заданого технологічного процесу. Такий розрахунок дає змогу встановити необхідні умови нагрівання матеріалу, забезпечити задану температуру, швидкість її підвищення, тривалість витримки та допустиму рівномірність температурного поля в робочій камері.

Під час теплового розрахунку враховують характеристики матеріалу, що обробляється, масу завантаження, початкову та кінцеву температури виробів,

тривалість технологічного циклу, режим роботи печі, а також особливості передавання теплоти випромінюванням, конвекцією і теплопровідністю. Важливе значення мають також форма та розміри робочої камери, розташування нагрівальних елементів, умови завантаження продукції та властивості газового середовища всередині печі.

За результатами розрахунку визначають кількість теплоти, необхідну для нагрівання виробів до заданої температури, а також для здійснення фізичних і хімічних перетворень у матеріалі. До таких процесів можуть належати випаровування вологи, дегідратація, спікання, випалювання, плавлення, зміна структури матеріалу та інші перетворення, передбачені технологією виробництва.

Окрему увагу приділяють складанню теплового балансу печі. У ньому порівнюють загальну кількість енергії, що надходить від електричних нагрівачів, із корисно використаною теплотою та тепловими втратами. Корисна складова витрачається безпосередньо на нагрівання продукції, технологічної тари, піддонів, футерування та інших елементів, які беруть участь у робочому циклі.

До основних теплових втрат належать втрати через стінки, склепіння, подину та дверцята печі, витрати теплоти на нагрівання повітря, яке проникає до камери, а також втрати під час завантаження і вивантаження продукції. Для печей безперервної дії додатково враховують теплоту, що виноситься нагрітими виробами, транспортними пристроями та відхідними газами. Правильне визначення цих складових необхідне для об’єктивної оцінки енергетичної ефективності установки.

На підставі теплового балансу визначають установлену потужність електричної печі. Вона повинна забезпечувати нагрівання завантаження із заданою швидкістю, компенсацію всіх теплових втрат і підтримання необхідної температури протягом технологічної витримки. При цьому потужність приймають із певним запасом, який враховує можливе зниження напруги в

електричній мережі, старіння нагрівальних елементів, зміну умов експлуатації та необхідність стабільної роботи обладнання.

Важливим результатом теплового розрахунку є вибір конструкції футерування печі. Визначають матеріали та товщину вогнетривкого і теплоізоляційного шарів, здатних витримувати задану робочу температуру, механічні навантаження та багаторазові цикли нагрівання й охолодження. Раціонально спроєктоване футерування знижує температуру зовнішньої поверхні корпусу, скорочує втрати теплоти в навколишнє середовище та підвищує коефіцієнт корисної дії печі.

Крім того, у процесі розрахунку обґрунтовують основні розміри робочої камери, площу тепловіддавальної поверхні, кількість і схему розміщення нагрівачів. Їх необхідно розташовувати таким чином, щоб забезпечити максимально рівномірний нагрів продукції та не допустити утворення локальних зон перегрівання або недостатнього прогріву.

Економічна частина розрахунку передбачає визначення питомого споживання електричної енергії, експлуатаційних витрат і собівартості теплової обробки одиниці продукції. Також оцінюють можливість зниження енерговитрат завдяки покращенню теплоізоляції, оптимізації температурного графіка, застосуванню автоматичного регулювання потужності та раціональному завантаженню робочої камери.

Таким чином, тепловий розрахунок є основою для проєктування, вибору та ефективної експлуатації електричної печі опору. Він дозволяє узгодити технологічні вимоги з конструктивними можливостями обладнання, визначити необхідну потужність нагрівачів, мінімізувати непродуктивні втрати теплоти та забезпечити високу якість термічної обробки виробів за найменших можливих витрат електричної енергії.

Завершують тепловий розрахунок обчисленням продуктивності печі, питомї витрати електроенергії і теплового ККД.

Теплоту $Q_{кор}$ розраховують виходячи з термодинаміки процесів, що відбуваються при термообробці завантаження.

У разі, коли функціональна залежність теплоємності від температури не відома, можна приблизно прийняти і визначити її за наступними формулами:

$$Q_{кор} = M \cdot c_c (T_к - T_н) \quad (2.3)$$

$$c_c = \frac{1}{2}(c_к - c_н), \quad (2.4)$$

де c_c - усереднена теплоємність завантаження, Дж/кг·К;

$c_н$ - теплоємність завантаження при $T_н$, Дж/кг·К;

$c_к$ - теплоємність завантаження при $T_к$, Дж/кг·К.

При розрахунку потужності, необхідної для компенсації теплових втрат ЕПО, приймають, що піч працює в тепловому режимі, що встановився, коли теплові потоки постійні в часі. Зазвичай обмежуються розрахунками втрат через стінки печі $N_ф$ і через отвори $N_{отв}$. Визначити потужність, необхудну для компенсації теплових втрат ЕПО можна за формулою:

$$N_{пот} = k_з^{'}(N_ф + N_{отв}), \quad (2.5)$$

де $k_з'$ - коефіцієнт запасу.

Коефіцієнт запасу на невраховані втрати потужності, наприклад, "старіння" футерування, втрати через нещільність футерування, через шви, теплові короткі замикання приймають рівним 1,2÷1,4.

Розрахунок теплових втрат через стіни печі зводиться до розв’язання задачі теплопередачі через багатошарову плоску поверхню.

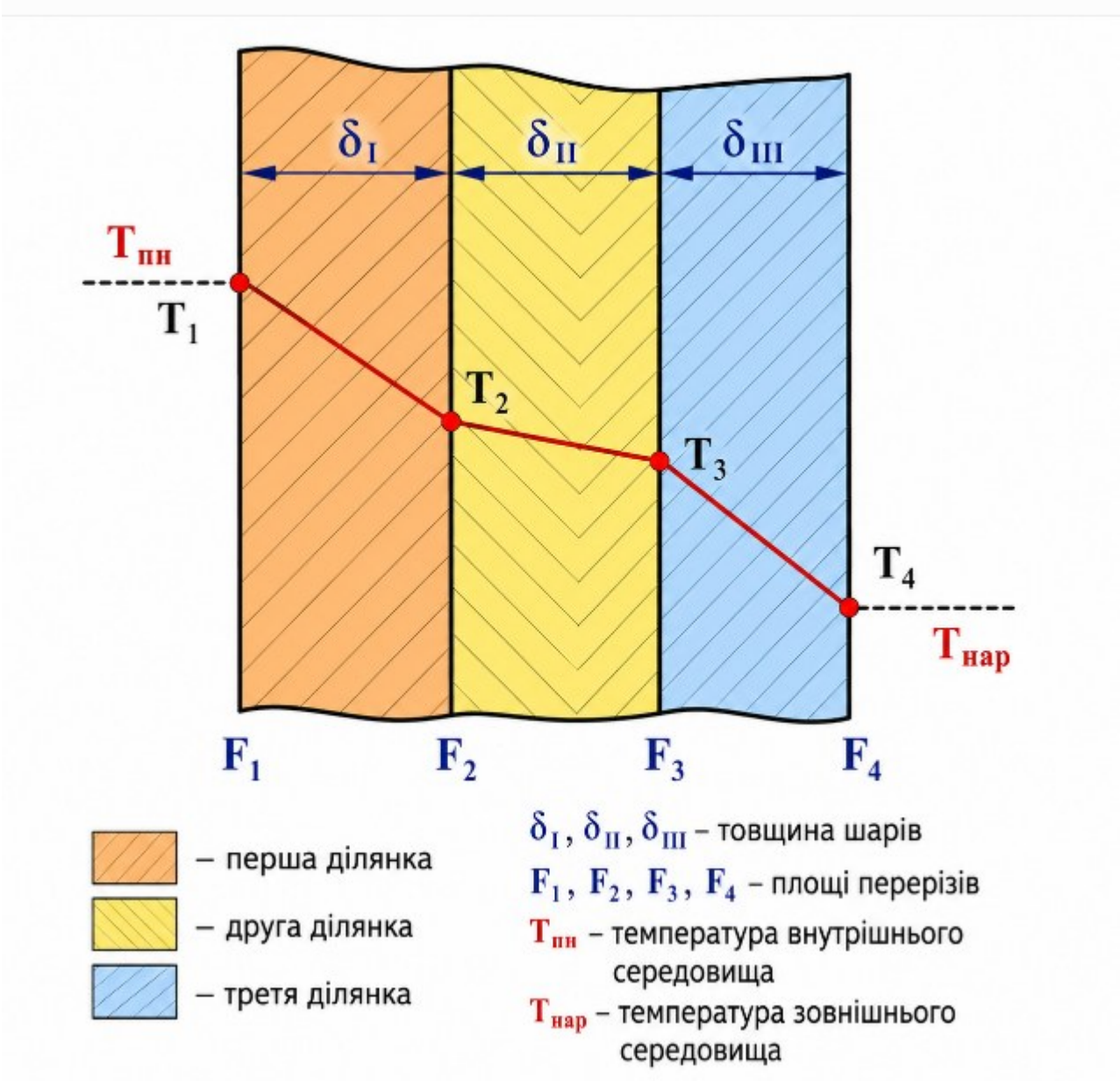


Рисунок 2.2 – Тришарова тонка стінка

На рисунку 2.2: $T_{вн}$ – температура всередині печі; T_i - температура на і поверхні теплоізолюючого шару; $T_{нар}$- температура ззовні печі; δ_j – товщина j шару теплоізолювання; F_i- площа і поверхні теплоізолюючого шару.

Рівняння теплопередачі має вигляд:

$$N_ф = \frac{T_{вн} - T_{нар}}{\frac{1}{\alpha_{вн} \cdot F_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1 \cdot F_1} + \frac{\delta_П}{\lambda_П \cdot F_П} + \frac{\delta_Ш}{\lambda_Ш \cdot F_Ш} + \frac{1}{\alpha_{нар} \cdot F_4}}, \qquad (2.6)$$

де $\alpha_{вн}$, $\alpha_{нар}$ - коефіцієнт тепловіддачі внутрішнього і зовнішнього шарів, відповідно, Вт/м^2·К;

λ_J - коефіцієнт теплопровідності j шару, Вт/м·К;

F_j -усереднена площа j шару, м^2.

Поверхню F_j беруть як середнє квадратичне площ поверхні j шару, наприклад $F_{Ш} = \sqrt{F_3 \cdot F_4}$.

Теплові втрати через завантажувальні та розвантажувальні вікна, технологічні прорізи, оглядові отвори, нещільності дверей та інші порушення суцільності футерування виникають унаслідок безпосереднього теплообміну між нагрітим робочим простором печі й навколишнім середовищем. Наявність таких отворів призводить до виходу нагрітого повітря або пічної атмосфери назовні, проникнення холодного повітря всередину камери та додаткового охолодження внутрішніх поверхонь установки.

Загальна величина теплових втрат через відкриті або недостатньо герметизовані ділянки печі визначається двома основними складовими: втратами внаслідок конвективного теплообміну та втратами теплової енергії випромінюванням. Співвідношення між цими складовими залежить від температури в робочій камері, площі й геометричної форми отвору, його розташування, тривалості відкривання, температури навколишнього повітря та характеру руху газового середовища.

Конвективні втрати виникають через переміщення нагрітих газів із робочої камери в навколишнє середовище та одночасне надходження холоднішого повітря до печі. Інтенсивність цього процесу визначається різницею температур між пічним простором і виробничим приміщенням, площею відкритого отвору, швидкістю руху повітря, а також положенням отвору відносно робочої камери. Особливо значними конвективні втрати можуть бути при тривалому відкриванні дверей під час завантаження або вивантаження продукції.

Теплові втрати випромінюванням зумовлені безпосереднім перенесенням енергії від нагрітих внутрішніх поверхонь печі через відкритий отвір у навколишній простір. Зі збільшенням температури робочої камери ця складова швидко зростає і для середньо- та високотемпературних печей може бути визначальною. На її величину впливають температура внутрішніх поверхонь, площа отвору, коефіцієнт випромінювання матеріалів, форма й глибина прорізу, а також наявність екранів, заслінок або теплових завіс.

Загальні теплові втрати через отвори печі визначають як суму конвективної та променевої складових. Якщо отвір залишається відкритим лише протягом певної частини технологічного циклу, у розрахунку додатково враховують тривалість його відкривання. Для печей періодичної дії такі втрати переважно виникають під час операцій завантаження та вивантаження, тоді як у печах безперервної дії вони можуть мати постійний характер через наявність відкритих вхідних і вихідних ділянок.

Під час визначення втрат необхідно також враховувати фактичну площу відкритого перерізу. Якщо завантажувальний отвір частково перекритий дверцятами, виробами, транспортним механізмом або захисним екраном, розрахункова площа повинна відповідати лише тій частині прорізу, через яку реально відбувається теплообмін із навколишнім середовищем.

Величина теплових втрат через отвори суттєво впливає на загальний тепловий баланс печі, її коефіцієнт корисної дії та необхідну встановлену потужність нагрівальних елементів. Недостатнє врахування цієї складової може призвести до заниження розрахункової потужності, збільшення тривалості нагрівання, нестабільності температурного режиму та погіршення якості термічної обробки продукції.

Для зменшення таких втрат застосовують теплоізольовані дверцята, ущільнення, автоматичні заслінки, захисні екрани, тамбури, повітряні або полум’яні завіси. Важливим організаційним заходом є скорочення тривалості відкривання печі та механізація процесів завантаження і вивантаження. У печах безперервної дії використовують спеціальні конструкції вхідних і вихідних

тунелів, які перешкоджають прямому випромінюванню теплоти та зменшують вільний рух нагрітих газів.

Таким чином, теплові втрати через завантажувальні, розвантажувальні й технологічні отвори визначаються сукупною дією конвекції та теплового випромінювання. Їх кількісне значення розраховують за відповідними залежностями окремо для кожної складової, після чого отримані результати підсумовують з урахуванням площі отворів, температурного режиму та тривалості їх відкривання.

$$N_{отв.i} = (N_{к.i} + N_{и.i}) \frac{t_{откр.i}}{t_ц}, \tag{2.7}$$

$$N_{отв} = \sum_i N_{отв.i}, \tag{2.8}$$

де $N_{отв.i}$ - втрати тепла через і отвір, Вт;

$N_{к.i}$ - втрати тепла через і отвір за рахунок конвекції, Вт;

$N_{и.}$і - втрати тепла через і отвір за рахунокмвипромінювання, Вт;

$t_{откр.}$ і - час відкритого стану і отвору, с;

$t_ц$ - час термообробки завантаження (циклу), с.

Втрати тепла через отвір нагрітої печі зарахунок конвекції можна визначити за формулою:

$$N_к = \frac{320 \cdot F_{отв} \cdot h^{0,5} \cdot T_п}{l^{0,4}}, \tag{2.9}$$

де $F_{отв}$ - площа перерізу отвору, м^2;

h - висота отвору, м;

l - глибина отвору, м;

$T_п$ - температура печі, °С.

Втрати тепла через отвір випромінюванням описуються наступним рівнянням:

$$N_u = 5{,}67 \cdot \varepsilon_{отв}[(\frac{T_n}{100})^4 - (\frac{T_{нар}}{100})^4] \cdot F_{отв} \cdot \varphi\,, \qquad (2.10)$$

де $\varepsilon_{отв}$ - коефіцієнт теплового випромінювання отвору;

φ - коефіцієнт діафрагмування.

Коефіцієнт теплового випромінювання для великих отворів і отворів (сумірних з розміром пічного простору) беруть рівним 0,8, для дрібних отворів $\varepsilon_{отв}$ =1,0. Коефіцієнт діафрагмування враховує глибину отвору і екрануючу дію його стінок, що показано на рисунку 2.3.

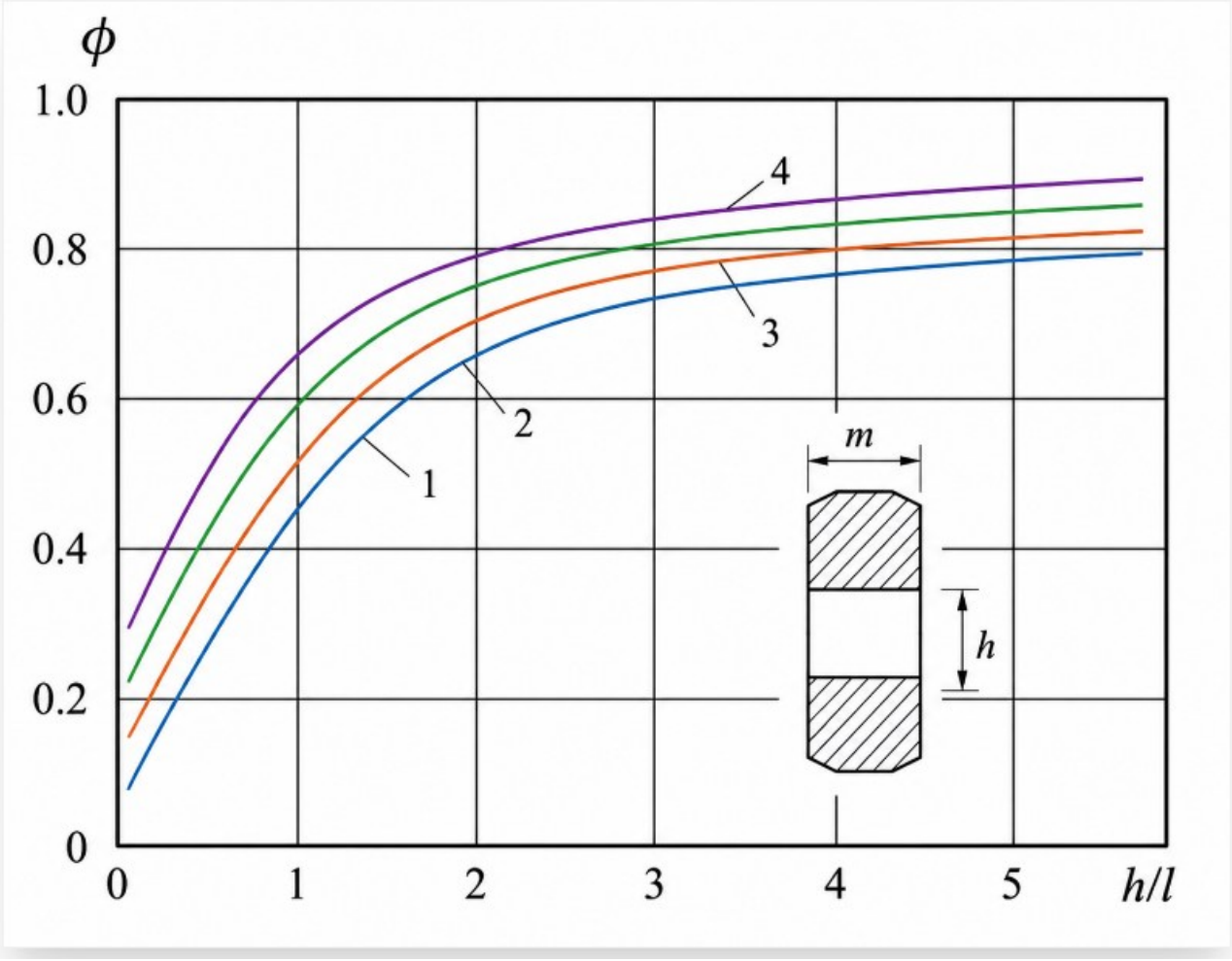


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнта діафрагмування від розмірів отвору.

На рисунку 2.3: 1 – круглі, 2 – квадратні, 3 – прямоугольні із співвідношенням сторін 2:1, 4 – вузькі щілини висотою *h*.

Коефіцієнт теплового випромінювання для великих отворів і отворів (сумірних з розміром пічного простору)беруть рівним 0,8. Коефіцієнт діафрагмування враховує глибину отвору і екрануючу дію його стінок і дорівнює 0,55.

Для ЕПО, продуктивність зручно розраховувати за наступною формулою:

$$G = \frac{L \cdot m}{t_ц}, \qquad (2.11)$$

де L – довжина печі, м

m – маса завантаження, кг/м.

Знання питомої витрати електроенергії дозволяє оцінити енергетичну ефективность процесу. Для обчислення питомої витрати електроенергії використовують рівняння:

$$q_э = \frac{N_{потр}}{G}, \qquad (2.12)$$

де $q_э$ - питома витрата електроенергії, Дж/кг;

$N_{потр}$ - потужність, споживана піччю з мережі, Вт.

Тепловий ККД характеризує роботу печі як джерела енергії. Визначити тепловий ККД можна за наступною формулою:

$$\eta_T = \frac{N_з}{N_{потр}}, \qquad (2.13)$$

де $\eta_т$ - тепловий ККД печі;

$N_з$ - потужність, що витрачається на нагрів і фізико-хімічні процеси у завантаженному зразку, Вт.

За отриманою встановленою потужністю обираємо піч з висувним черенем і окислювальною середою у просторі печі типу СДО 20.30.18/12,5, з

максимальною температурою нагріву 1300 ºС і встановленою потужністю 215+-15 кВт.

Усереднена теплоємність завантаження дорівнює:

$$c_c = \frac{c_к - c_н}{2} = \frac{0,84 - 0,8}{2} = 0,02, \text{Дж/кг} \cdot \text{К}.$$

Корисна теплота дорівнює:

$$\text{Q}_{\text{кор}} = 1300 \cdot 0,02 \cdot (1473 - 293) = 30602\text{Дж}=30,6,\text{кДж}.$$

Розрахунок теплових втрат через стіни печі.

Товщина шарів стінок δ_1=1500мм,δ_2=500мм, δ_3=361мм.

Коефіцієнти теплопровідності шарів: λ_1=0,81, λ_2=0,35, λ_3=0,23.

$T_{вн}$=1523К, $T_{нар}$=303К, T_1=1273К, T_2=873К, T_3=473К, T_4=323К.

Коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_{\text{вн}}$=0,5, $\alpha_{\text{нар}}$=0, 7.

Площі поверхонь шарів тепло ізолюючих матеріалів дорівнюють:

F_1=30м^2, F_2=84,3м^2, F_3=108,4м^2, F_4=127,7м^2, F_I=50,3м^2 , F_{II}=95,6м^2, F_{III}=117,7м^2.

Втрати теплоти дорівнюватимуть:

$$N_ф = \frac{1523 - 303}{\frac{1}{0,5 \cdot 30} + \frac{1,5}{0,81 \cdot 50,3} + \frac{0,5}{0,35 \cdot 95,6} + \frac{0,361}{0,23 \cdot 117,7} + \frac{1}{0,7 \cdot 127,7}} = 9,3\text{кВт}$$

Втрати тепла через отвір нагрітої печі за рахунок конвекції будуть мати значення:

$$N_к = \frac{320 \cdot 6 \cdot 1,8^{0,5} \cdot 1573}{0,75^{0,4}} = 4545128,4\text{Вт}=4,5\text{МВт}.$$

Втрати тепла через отвір нагрітої печі за рахунок випромінювання становитимуть:

$$\text{N}_{\text{и}} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot ((\frac{1573}{100})^4 - (\frac{303}{100})^4) \cdot 1,8 \cdot 0,55 = 274552,12\text{Вт}=274,6\text{кВт}.$$

Втрати тепла крізь завантажувальні і розвантажувальні отвори дорівнюватимуть:

$$N_{отв.} = (4545128,4 + 274552,12)\frac{3600}{129600} = 133,9\text{кВт}.$$

Продуктивність печі становитиме:

$$G = \frac{3900}{133200} = 0,029,\text{кг/с}.$$

Питомі витрати електроенергії дорівнюватимуть:

$$q_э = \frac{173000}{0,029} = 5,9\text{МДж}.$$

Тепловий ККД складатиме:

$$\eta_T = \frac{153000}{173000} = 0,81.$$

2.3 Вибір електричної печі меншої встановленої потужності

За формулою (2.2) для печі з потужністю, необхідною для нагріву завантаження і проходження фізико-хімічних процесів $N_з$=27 кВт і потужністю, необхідною для компенсації теплових втрат $N_{пот}$=*8* кВт. Визначаємо споживану потужність, що дорівнюватиме:

$$N_{потр} = 27 + 8 = 35,\text{кВт}.$$

За формулою (2.1) визначаємо встановлену потужність. Встановлена потужність становитиме:

$$\mathrm{N_у} = 1,3 \cdot 35 = 45,5,\text{кВт}.$$

За результатами визначення необхідної встановленої потужності для виконання високотемпературної обробки виробів обрано електричну камерну піч типу СНОЛ 500/12-ВП. Цей електротермічний агрегат працює в повітряному, тобто окиснювальному, середовищі та забезпечує максимальну температуру нагрівання до 1250 °С. Встановлена електрична потужність печі становить 42 кВт, що відповідає розрахунковим параметрам технологічного

процесу й дає змогу забезпечити необхідний температурний режим випалу керамічних ізоляторів, корпусів запобіжників та інших виробів.

Камерні електропечі серії СНОЛ із викатним черенем призначені для здійснення широкого комплексу операцій термічної обробки. У них можуть виконуватися нагрівання, відпалювання, загартування, високотемпературний випал, спікання та інші процеси, що проводяться в повітряному середовищі. Обладнання цього типу застосовують для оброблення металевих деталей, технічної кераміки, електрофарфору, вогнетривких матеріалів, порошкових композицій та інших термостійких виробів. Максимальна робоча температура 1250 °С дає змогу використовувати піч для більшості технологічних процесів, пов’язаних із випалом електротехнічної кераміки.

Конструктивною особливістю печі СНОЛ 500/12-ВП є наявність викатного череня, яке одночасно виконує функцію нижньої частини робочої камери та платформи для розміщення садки. Під час завантаження черінь повністю виводиться за межі печі. Це забезпечує вільний доступ до всієї площі платформи та дає можливість раціонально розташовувати вироби з урахуванням їхніх геометричних розмірів, маси, конфігурації та вимог до циркуляції теплового потоку.

На відміну від звичайної камерної печі, де завантаження здійснюється через обмежений дверний отвір, конструкція з викатним черенем значно полегшує виконання вантажно-розвантажувальних операцій. Обслуговувальному персоналу не потрібно розміщувати вироби в глибині гарячої камери вручну. Усі операції здійснюються поза робочим простором печі, у більш безпечних і комфортних умовах. Це особливо важливо під час роботи з великогабаритною, важкою або крихкою продукцією, для якої необережне переміщення може спричинити механічні пошкодження.

Викатне виконання череня дає змогу повніше використовувати корисний об’єм робочої камери. Вироби можна рівномірно розподіляти по всій площі платформи, формуючи оптимальну садку з кількох ярусів. Для цього застосовуються вогнетривкі стійки, полиці, плити та інший пічний припас.

Раціональне розміщення продукції сприяє збільшенню кількості виробів, які проходять термообробку за один цикл, і водночас забезпечує достатні проміжки для поширення теплового випромінювання.

Під час завантаження важких деталей або великогабаритних керамічних виробів можуть використовуватися кран-балки, талі, підйомники, штабелери та інші вантажопідіймальні пристрої. Відсутність обмежень, пов’язаних із розмірами дверного отвору та глибиною камери, істотно спрощує застосування механізованого обладнання. Завдяки цьому знижується частка ручної праці, скорочується тривалість підготовчих операцій і підвищується безпечність технологічного процесу.

Додатковою перевагою є можливість використання декількох викатних черенів. Поки один із них перебуває в печі разом із виробами, що проходять термічну обробку, на іншому можна здійснювати підготовку наступної партії продукції. Після завершення циклу нагрітий черінь виводиться з камери, а замість нього відразу встановлюється заздалегідь завантажена платформа. Така організація виробництва дає змогу істотно скоротити простій печі між окремими циклами.

У традиційній камерній печі частина робочого часу витрачається на виймання готової продукції, очищення камери, установлення пічного припасу та завантаження нової партії. У печі з декількома викатними черенями більшість цих операцій виконується паралельно з основним процесом випалу. У результаті збільшується коефіцієнт використання обладнання, скорочується тривалість виробничого циклу та підвищується добова продуктивність термічної дільниці.

Конструкція печі допускає виведення череня з робочої камери за підвищеної температури. У штатному режимі платформу можна викочувати за температури приблизно 500 °C, а короткочасно — за значно вищої температури, якщо це передбачено технологічними вимогами та допускається виробником обладнання. Такий спосіб експлуатації дає змогу скоротити

тривалість охолодження безпосередньо в печі й раніше розпочати підготовку агрегату до наступного циклу.

Водночас виведення нагрітої садки повинно виконуватися з дотриманням установлених вимог безпеки. Необхідно враховувати термічну стійкість виробів, допустиму швидкість їх охолодження, стан футеровки, пічного припасу та механізму переміщення. Для деяких видів кераміки різке зниження температури може спричинити виникнення внутрішніх напружень, утворення тріщин або руйнування глазурного шару. Тому момент викочування череня визначається не лише конструктивними можливостями печі, а й прийнятим режимом випалу.

Застосування викатного череня позитивно впливає на продуктивність обладнання. За однакового корисного об’єму продуктивність печі СНОЛ такого виконання може бути в 1,5–2,5 раза вищою порівняно зі звичайною камерною електропіччю. Це досягається завдяки скороченню часу завантаження та розвантаження, повнішому використанню об’єму камери, можливості паралельної підготовки садки й зменшенню міжопераційних простоїв.

Підвищення продуктивності не супроводжується пропорційним збільшенням енергоспоживання. Навпаки, питомі витрати електроенергії на одиницю продукції можуть зменшуватися приблизно на 10–20 %. Економія забезпечується передусім завдяки збільшенню коефіцієнта завантаження камери, скороченню тривалості допоміжних операцій та раціональнішому використанню накопиченої теплоти. Чим менше часу піч перебуває в нагрітому стані без продукції, тим меншою є частка непродуктивних теплових втрат.

Важливим показником якості термообробки є рівномірність температури в усьому об’ємі робочої камери. У печі СНОЛ 500/12-ВП ця вимога забезпечується завдяки розподіленому розміщенню електричних нагрівальних елементів. Нагрівачі встановлюються на бічних і задній стінках, на внутрішній поверхні дверей, а також у конструкції викатного череня. У результаті теплота підводиться до садки з кількох напрямків.

Наявність нижнього нагрівання є особливо важливою для великої та щільно завантаженої камери. У печах, де нагрівачі розташовані лише на стінках, нижні шари садки можуть прогріватися повільніше. Розміщення частини нагрівальних елементів у черені зменшує різницю температур між верхньою і нижньою зонами, сприяє рівномірнішому спіканню матеріалу та знижує ймовірність утворення дефектів.

Нагрівальні елементи перетворюють електричну енергію на теплоту, яка передається виробам переважно шляхом випромінювання. Додатковий теплообмін відбувається через нагріте повітря та елементи футеровки. Розподілене розташування нагрівачів дає змогу сформувати рівномірне температурне поле, що є необхідною умовою для отримання керамічної продукції зі стабільною щільністю, механічною міцністю та електроізоляційними характеристиками.

Піч працює в повітряному середовищі, тому всередині робочої камери формуються окиснювальні умови. Такий режим підходить для випалу багатьох видів технічної кераміки та електрофарфору. Під час нагрівання з виробів видаляється залишкова волога, вигорають органічні пластифікатори та зв’язувальні компоненти, завершуються хімічні реакції між складовими керамічної маси. За подальшого підвищення температури відбувається спікання частинок, зменшення пористості й формування кінцевої структури виробу.

Ефективність випалу значною мірою залежить від точності відтворення заданого температурного графіка. Надто швидке нагрівання може призвести до інтенсивного видалення вологи та газоподібних продуктів розкладання, що створює внутрішній тиск у заготовках. Унаслідок цього виникають тріщини, розшарування, деформації та інші дефекти. Недостатня температура або скорочена витримка можуть спричинити неповне спікання, підвищену пористість і зниження механічної та електричної міцності.

Для керування температурою електропіч оснащується цифровими мікропроцесорними регуляторами. Вони отримують сигнали від термопар, установлених у контрольних точках камери, порівнюють фактичну температуру

із заданим значенням і змінюють потужність нагрівальних елементів. Завдяки цьому температура підтримується з високою точністю протягом усього циклу.

Мікропроцесорна система дає змогу здійснювати термічну обробку за попередньо заданою програмою. Оператор може встановлювати початкову температуру, швидкість нагрівання, температури окремих ступенів, тривалість ізотермічної витримки та швидкість охолодження. Після запуску програми регулятор автоматично виконує всі передбачені етапи, що зменшує вплив людського чинника та забезпечує повторюваність результатів для різних партій продукції.

Серійні електропечі СНОЛ можуть оснащуватися регуляторами, які забезпечують програмування температурного режиму щонайменше на двох послідовних ділянках. Наприклад, на першій ділянці може виконуватися поступове нагрівання і видалення вологи, а на другій — підвищення температури до рівня випалу з подальшою витримкою. За потреби система керування може бути модернізована для реалізації складніших багатоступеневих режимів.

Автоматичне регулювання не лише підвищує якість продукції, а й сприяє енергозбереженню. Потужність нагрівачів змінюється відповідно до фактичної потреби в теплоті. На початку циклу агрегат може працювати з підвищеною потужністю, а після досягнення заданої температури регулятор зменшує її до рівня, необхідного для компенсації теплових втрат. Це запобігає перегріванню печі та непродуктивному споживанню електроенергії.

У системі керування можуть передбачатися захисні блокування, аварійна сигналізація та обмеження максимально допустимої температури. У разі несправності термопари, порушення роботи регулятора, відкривання дверей або неправильного положення викатного череня подавання живлення на нагрівачі припиняється. Такі заходи підвищують безпечність експлуатації та захищають футеровку, нагрівальні елементи й продукцію від пошкодження.

Футеровка робочої камери повинна поєднувати високу вогнетривкість із низькою теплопровідністю та малою теплоємністю. Зменшення маси

теплоізоляційних матеріалів сприяє швидшому виходу печі на задану температуру та скорочує витрати енергії на нагрівання конструкції. Якісна теплоізоляція також знижує температуру зовнішньої поверхні корпусу й покращує умови праці персоналу.

Герметичність прилягання дверей і викатного череня до корпусу печі має істотне значення для її економічності. Через нещільності може надходити холодне повітря та виходити нагріте газове середовище, що збільшує теплові втрати і спричиняє локальне зниження температури. Тому місця стикування оснащуються термостійкими ущільненнями, а положення рухомих елементів повинно регулярно контролюватися.

Під час експлуатації печі необхідно стежити за станом нагрівачів, футеровки, ущільнень, термопар і приводного механізму викатного череня. Нерівномірне старіння нагрівальних елементів може спричинити відхилення температури в окремих зонах. Пошкодження теплоізоляції збільшує втрати теплоти, а забруднення напрямних ускладнює переміщення платформи. Регулярне технічне обслуговування дає змогу підтримувати розрахункову продуктивність та енергетичну ефективність агрегату.

Отже, електрична камерна піч СНОЛ 500/12-ВП з максимальною температурою 1250 °С і встановленою потужністю 42 кВт відповідає вимогам високотемпературної обробки керамічних виробів. Викатний черінь забезпечує швидке й безпечне завантаження, повне використання робочого об’єму та можливість застосування механізованих вантажопідіймальних засобів. Використання декількох змінних платформ практично усуває простої між циклами, а багатостороннє розміщення нагрівачів забезпечує рівномірний розподіл температури.

Порівняно зі звичайними камерними електропечами аналогічного об’єму вибрана модель характеризується вищою продуктивністю та меншими питомими витратами електричної енергії. Застосування програмованих мікропроцесорних регуляторів дає змогу точно відтворювати задані режими нагрівання, витримки й охолодження. У сукупності ці особливості

забезпечують підвищення якості готової продукції, скорочення тривалості виробничого циклу, зниження енергоспоживання та поліпшення умов експлуатації термічного обладнання.

Технічні характеристики печі СНОЛ 500/12-ВП наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики печі СНОЛ 500/12 – ВП

Об'єм печі	500 л
Максимальна температура нагріву	1250 °С
Встановлена потужність	42 кВт
Габарити: робочої камери	665х1170х640 мм
Габарити печі	1450х2100х1700 мм
Вага печі	1600 кг
Вартість	85771 грн

На рисунку 2.4 показано зовнішній вигляд печі СНОЛ 500/12 – ВП.



Рисунок 2.4 – Електропіч СНОЛ 500/12

2.4 Тепловий розрахунок електропечі СНОЛ 500/12

Усереднена теплоємність завантаження дорівнюватиме:

$$c_c = \frac{c_к - c_н}{2} = \frac{0,84 - 0,8}{2} = 0,02, \text{Дж/кг} \cdot \text{К}.$$

Корисна теплота дорівнюватиме:

$$\text{Q}_{\text{кор}} = 1300 \cdot 0,02 \cdot (1473 - 293) = 30602\text{Дж}=30,6,\text{кДж}.$$

Розрахунок теплових втрат через стіни печі.

Товщина шарів стінок δ_1=300мм,δ_2=285мм, δ_3=200мм.

Коефіцієнти теплопровідності шарів: λ_1=0,81, λ_2=0,35, λ_3=0,23.

$T_{вн}$=1523К, $T_{нар}$=303К, T_1=1273К, T_2=873К, T_3=473К, T_4=323К.

Коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_{вн}$=0,5, $\alpha_{нар}$=0, 7.

Площі поверхонь шарів тепло ізолюючих матеріалів дорівнюють:

F_1=3,9м^2, F_2=7,41м^2, F_3=11,75м^2, F_4=15,37м^2, $F_I = \sqrt{3,9 \cdot 7,41} = 5,38\,\text{м}^2$, F_{II}=9,33м^2, F_{III}=13,44м^2.

Втрати теплоти становитимуть:

$$N_ф = \frac{1523 - 303}{\frac{1}{0,5 \cdot 3,9} + \frac{0,3}{0,81 \cdot 5,38} + \frac{0,285}{0,35 \cdot 9,33} + \frac{0,2}{0,23 \cdot 13,44} + \frac{1}{0,7 \cdot 15,37}} = 1,47\text{кВт}.$$

Втрати тепла через отвір нагрітої печі за рахунок конвекції дорівнюватимуть:

$$N_к = \frac{320 \cdot 0,78 \cdot 0,64^{0,5} \cdot 1523}{0,785^{0,4}} = 334189,7\text{Вт}=334,2\text{кВт}.$$

Втрати тепла через отвір нагрітої печі за рахунок випромінювання складатимуть:

$$\text{N}_\text{и} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot ((\frac{1523}{100})^4 - (\frac{303}{100})^4) \cdot 0,78 \cdot 0,55 = 104531,8\text{Вт}=104,5\text{кВт}.$$

Втрати тепла крізь завантажувальні і розвантажувальні отвори дорівнюватимуть:

$$N_{отв.} = (334189,7 + 104531,8)\frac{3600}{129600} = 12186,7\text{Вт}=12,2\text{кВт}.$$

Продуктивність печі дорівнюватиме:

$$G = \frac{546}{133200} = 0,0041, \text{кг/с}.$$

Питомі витрати електроенергії становитимуть:

$$q_э = \frac{35000}{0,0041} = 8,5\text{МДж}.$$

Тепловий ККД складатиме:

$$\eta_T = \frac{27000}{35000} = 0,77.$$

2.5 Визначення раціональних режимів експлуатації електричних печей

Вартість нагрівання, термічної обробки або плавлення матеріалів в електричних печах опору в багатьох галузях промисловості становить значну частину собівартості готової продукції. Це пояснюється високою енергоємністю технологічних процесів і тривалою роботою обладнання за підвищених температур. На підприємствах, де широко застосовуються електротермічні установки, печі опору часто є одними з найбільших споживачів електричної енергії. Тому правильна організація їх експлуатації, технічного обслуговування та завантаження має важливе економічне значення.

Зниження собівартості термічної обробки в електричних печах опору може бути досягнуто за рахунок трьох взаємопов’язаних напрямів: збільшення продуктивності обладнання, підвищення його експлуатаційної надійності та скорочення питомого споживання електроенергії. Кожен із зазначених напрямів безпосередньо впливає як на витрати підприємства, так і на стабільність технологічного процесу та якість продукції.

Підвищення продуктивності печі дає змогу виготовляти більшу кількість продукції за одиницю часу без пропорційного збільшення теплових втрат. Підвищення надійності обладнання зменшує кількість аварійних зупинок, тривалість ремонтів і витрати на відновлення нагрівальних елементів, футеровки та допоміжних механізмів. Зниження питомої витрати

електроенергії забезпечує безпосереднє скорочення енергетичної складової собівартості одиниці продукції.

Оскільки робота електричних печей пов’язана зі значним споживанням електроенергії, основним резервом підвищення економічної ефективності є зменшення питомих енерговитрат на нагрівання одного кілограма або одиниці продукції. Водночас цей напрям неможливо розглядати окремо від продуктивності та надійності. Збільшення обсягу продукції, що проходить обробку за один цикл, скорочує частку постійних теплових втрат, яка припадає на кожний виріб. Надійна робота нагрівачів зменшує кількість простоїв і повторних нагрівань печі після ремонту. Автоматизація температурного режиму забезпечує точніше дотримання технологічного графіка та запобігає перевитраті електроенергії.

Раціональна експлуатація електричних печей опору повинна передбачати комплексне виконання таких заходів:

забезпечення надійної роботи електротермічного обладнання;

підвищення продуктивності печей;

скорочення теплових втрат через футеровку, двері, отвори та систему вентиляції;

зменшення витрат енергії на акумулювання теплоти конструктивними елементами печі;

повторне використання теплоти нагрітих виробів, вагонеток, піддонів, капселів та іншої технологічної тари.

Надійність електричної печі опору значною мірою залежить від довговічності нагрівальних елементів, вогнетривких матеріалів і жаростійких деталей. Нагрівачі працюють у складних умовах, оскільки піддаються високій температурі, багаторазовим циклам нагрівання та охолодження, окисненню, механічним навантаженням і впливу пічної атмосфери. Неправильний вибір матеріалу або перерізу нагрівального елемента може призвести до його локального перегрівання, деформації, зміни електричного опору та передчасного руйнування.

Для продовження строку служби нагрівачів необхідно виконувати їх точний електричний і тепловий розрахунок, правильно вибирати матеріал, діаметр або площу поперечного перерізу, а також забезпечувати рівномірне розміщення в робочій камері. Нагрівальні елементи доцільно експлуатувати за рекомендованої температури, не допускаючи їх постійної роботи на межі максимально допустимого значення. Навіть незначне зниження температури поверхні нагрівача може істотно збільшити його довговічність.

Важливим є також правильний вибір матеріалу жаростійких деталей. Муфелі, піддони, напрямні, захисні екрани та інші елементи повинні відповідати температурі, складу пічної атмосфери та характеру механічних навантажень. Наприклад, муфелі з жаростійких сталей зазвичай мають значно більший ресурс порівняно з аналогічними конструкціями з вуглецевої сталі. Хоча їх початкова вартість є вищою, збільшення строку служби зменшує витрати на ремонт, простої та заміну обладнання.

Особливе значення має підтримання печі в справному технічному стані. Пошкодження футеровки, порушення герметичності дверей, руйнування ущільнень і ослаблення електричних контактів призводять до збільшення теплових та електричних втрат. Тому необхідно регулярно контролювати стан нагрівачів, ізоляції, термопар, силових з’єднань, механізмів завантаження та системи автоматичного регулювання.

Корисно використана теплота, тобто теплота, передана виробам, прямо залежить від продуктивності печі. Натомість значна частина теплових втрат залишається практично постійною і не залежить безпосередньо від кількості продукції. До таких втрат належать теплопередача через футеровку й корпус, витікання нагрітого повітря, охолодження через двері та отвори, а також витрати енергії на підтримання заданої температури порожньої або недостатньо завантаженої камери.

Якщо продуктивність печі знижується, постійні теплові втрати розподіляються на меншу кількість виробів. Унаслідок цього коефіцієнт корисної дії обладнання зменшується, а питома витрата електроенергії на

одиницю продукції зростає. Тому експлуатація печі з неповним завантаженням економічно невигідна, особливо коли маса футеровки, пічного оснащення та тари значно перевищує масу самої продукції.

Збільшення продуктивності електропечі можливе лише за наявності відповідного резерву встановленої потужності та допустимого теплового навантаження. Наявність такого резерву визначають шляхом порівняння фактичної продуктивності обладнання з максимально можливою, установленою на підставі теплового балансу. При цьому необхідно враховувати не тільки електричну потужність нагрівачів, а й допустиму швидкість нагрівання виробів, рівномірність температурного поля, тривалість витримки та можливість відведення газів, що утворюються під час обробки.

Підвищення продуктивності не повинно здійснюватися шляхом надмірного збільшення швидкості нагрівання, оскільки це може погіршити якість продукції. Для керамічних виробів занадто інтенсивне підвищення температури здатне спричинити розтріскування, деформацію, нерівномірне спікання або порушення глазурного покриття. Тому збільшення завантаження та скорочення циклу повинні узгоджуватися з технологічними обмеженнями.

Потужність, яку споживає піч протягом циклу, не залишається постійною. На початковій стадії нагрівання нагрівачі зазвичай працюють із потужністю, близькою до номінальної. У міру наближення до заданої температури система автоматичного регулювання починає періодично або плавно зменшувати подавання енергії, запобігаючи перегріванню виробів і робочої камери.

Для процесів, які не потребують тривалої високотемпературної витримки, зокрема загартування, нормалізації, відпуску, нагрівання під штампування або кування, активне регулювання потужності часто починається після проходження приблизно двох третин загальної тривалості нагрівання. На завершальній стадії середня потужність поступово зменшується від номінального значення до потужності холостого ходу, необхідної переважно для компенсації теплових втрат печі.

Потужність холостого ходу характеризує кількість енергії, яка витрачається на підтримання заданої температури робочої камери без корисного нагрівання продукції. Вона залежить від температури процесу, якості футеровки, площі зовнішньої поверхні агрегату, герметичності дверей, наявності вентиляції та інших конструктивних особливостей. Чим нижчою є потужність холостого ходу, тим більша частина споживаної електроенергії використовується безпосередньо на нагрівання виробів.

Для орієнтовних інженерних розрахунків середню потужність печі протягом циклу можна приймати на рівні близько 85 % її максимальної або номінальної потужності:

$$P_{ср} \approx 0{,}85 P_{ном}.$$

Таке наближення може застосовуватися як для камерних печей періодичної дії, так і для методичних багатозонних агрегатів, якщо їхній режим роботи відповідає прийнятим умовам. Для точніших розрахунків середня потужність повинна визначатися за фактичним графіком навантаження печі.

Середня потужність витрачається за двома основними напрямами. Перша її частина використовується корисно — на нагрівання, плавлення або здійснення фізико-хімічних перетворень у матеріалі. Друга частина компенсує теплові втрати через футеровку, двері, отвори, вентиляцію, електроди, пічне оснащення та інші елементи конструкції.

Корисна теплова потужність, що може бути використана для нагрівання виробів, визначається як різниця між середньою потужністю печі та сумарними тепловими втратами:

$$P_{кор} = P_{ср} - P_{втр}.$$

Тоді максимально можливу годинну продуктивність печі можна визначити за співвідношенням між корисною потужністю та питомою кількістю теплоти, необхідною для нагрівання одного кілограма матеріалу:

$$G_{max} = 3600(P_{ср} - P_{втр})$$

де G_{max} — максимальна годинна продуктивність печі, кг/год; $P_{ср}$ — середня споживана потужність, кВт; $P_{втр}$ — сумарна потужність теплових

втрат, кВт; qпит — питома кількість теплоти, необхідна для нагрівання та проведення технологічних перетворень у матеріалі, кДж/кг; 3600 — коефіцієнт переведення кВт·год у кДж.

$$g_{\max} = \frac{0{,}85\text{Р}_{\text{печі}} - P_{пот}}{B}, \qquad (2.14)$$

де $P_{печі}$ - паспортна потужність печі, може бути перевірена по свідченню ватметра або амперметра і вольтметра;

$P_{пот}$ - потужність теплових втрат печі, береться з її паспорта або визначається дослідним шляхом;

B - теоретична витрата енергії, кВт·год/кг, що необхідна для нагріву виробів до температури, вимагаємої технологічним процесом.

За наявності жаротривкої тари (піддони, муфелі, горщики і тому подібне) її тепловміст, віднесений до 1 кг маси виробів, включається в значення В.

Мінімальна питома витрата енергії, кВт·год/кг, може бути визначена діленням годинної витрати енергії на годинну продуктивність печі. мінімальна питома витрата енергії може бути визначена за формулою наведеною нижче:

$$A_{\min} = \frac{0{,}85P_{печі}}{\text{g}_{\max}}. \qquad (2.15)$$

2.5.1 Розрахунок показників роботи печі СДО 20.30.18/12.5

Для печі більшої встановленої потужності СДО 20.30.18/12,5 максимальна годинна продуктивність для двозмінної роботи печі дорівнюватиме:

$$g_{max} = \frac{0{,}85 \cdot 185 - 25}{0{,}22} = 601{,}1\text{кг/год}.$$

А мінімальні питомі витрати енергії:

$$A_{min} = \frac{0,85 \cdot 185}{601,1} = 0,262 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

За першим варіантом експлуатації електрична піч повністю відключається від мережі на весь період виробничого простою. У разі двозмінного режиму роботи піч перебуває під напругою протягом 16 годин на добу, а решту 8 годин охолоджується. При однозмінній роботі тривалість увімкненого стану становить 8 годин, тоді як протягом наступних 16 годин установка залишається відключеною.

Під час простою температура робочої камери, футерування та інших нагрітих елементів поступово знижується внаслідок тепловіддачі в навколишнє середовище. Тому після повторного ввімкнення печі частина її потужності повинна витрачатися не безпосередньо на нагрівання продукції, а на відновлення попереднього теплового стану установки. Іншими словами, протягом робочого періоду необхідно компенсувати кількість теплоти, втрачену під час охолодження печі.

Для спрощення розрахунку приймається, що інтенсивність тепловіддачі від печі в процесі її охолодження є пропорційною поточній температурі установки. За такого припущення середня потужність теплових втрат протягом 8-годинного простою становить приблизно 89 % від номінального значення теплових втрат у робочому режимі. При збільшенні тривалості простою до 16 годин середня потужність втрат знижується приблизно до 81 % номінального значення, оскільки в міру охолодження печі зменшується різниця температур між її поверхнею та навколишнім середовищем.

Таким чином, чим довше піч перебуває у відключеному стані, тим більша загальна кількість теплоти втрачається і тим більше енергії необхідно витратити на її повторне нагрівання. Це призводить до зменшення корисної частки встановленої потужності, яка може бути спрямована безпосередньо на термічну обробку виробів.

Отже, максимальна годинна продуктивність печі повинна визначатися з урахуванням не лише її номінальної потужності та питомої витрати теплоти на нагрівання продукції, а й додаткових енергетичних витрат, необхідних для компенсації теплових втрат за період простою. Відповідне значення максимальної годинної продуктивності визначається за наведеною нижче формулою.

$$g_{\max} = \frac{0{,}85P_{печі} - 1{,}44P_{пот}}{B}. \qquad (2.16)$$

Для печі СДО 20.30.18/12,5 максимальна годинна продуктивність для двозмінної роботи печі дорівнюватиме:

$$g_{max} = \frac{0{,}85 \cdot 185 - 1{,}44 \cdot 25}{0{,}22} = 551{,}14 \text{кг/год}.$$

А при однозмінній роботі печі матимемо наступний вираз:

$$g_{\max} = \frac{0{,}85P_{печі} - 2{,}6P_{пот}}{B}. \qquad (2.17)$$

Для обраної печі при однозмінній її роботі максимальна годинна продуктивність дорівнюватиме:

$$g_{max} = \frac{0{,}85 \cdot 185 - 2{,}6 \cdot 25}{0{,}22} = 419{,}32 \text{кг/год}.$$

Мінімальна питома витрата енергії для двозмінної роботи печі дорівнюватиме:

$$A_{min} = \frac{0{,}85 \cdot 185}{551{,}14} = 0{,}285 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}},$$

А для однозмінної

$$A_{min} = \frac{0{,}85 \cdot 185}{419{,}32} = 0{,}375 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

У більшості випадків, особливо при однозмінній роботі, піч включається до початку зміни з тим, щоб до початку останньої була досягнута робоча температура. Можна прийняти, що при такому попередньому розігріванні

відновлюється 75% тепла, втраченого піччю в період охолодження, а інші 25% в період її роботи. При цьому максимальна годинна продуктивність печі при двозмінній роботі буде визначатись за наступною формулою:

$$g_{\max} = \frac{0{,}85P_{печі} - 1{,}11P_{пот}}{B}. \qquad (2.18)$$

При включенні печі СДО 20.30.18/12,5 до початку робочої зміни, при двозмінній роботі максимальна годинна продуктивність дорівнюватиме:

$$g_{max} = \frac{0{,}85 \cdot 185 - 1{,}11 \cdot 25}{0{,}22} = 588{,}64 \text{кг/год}.$$

І при однозмінній роботі максимально годинна продуктивність печі визначатиметься за наступним виразом:

$$g_{\max} = \frac{0{,}85P_{печі} - 1{,}4P_{пот}}{B}. \qquad (2.19)$$

Для обраної печі при однозмінній роботі, при включенні печі до початку робочої зміни максимальна годинна продуктивність дорівнюватиме:

$$g_{max} = \frac{0{,}85 \cdot 185 - 1{,}4 \cdot 25}{0{,}22} = 555{,}68 \text{кг/год}.$$

Питома витрата енергії при цьому визначається тією кількістю енергії, яку буде витрачено як за період роботи печі, так і за період її розігрівання. Для двозмінної роботи вона буде знаходитись із наступного виразу:

$$A_{\min} = \frac{0{,}85P_{печі} + 0{,}33P_{пот}}{\mathrm{g}_{\max}}. \qquad (2.20)$$

Для печі СДО 20.30.18/12,5, працюючої у дві зміни, питома витрата енергії дорівнюватиме:

$$A_{min} = \frac{0{,}85 \cdot 185 + 0{,}33 \cdot 25}{588{,}64} = 0{,}281 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

А для однозмінної роботи питома витрата енергії визначатиметься за формулою, наведеною нижче:

$$A_{\min} = \frac{0{,}85P_{печі} + 1{,}2P_{пот}}{g_{\max}}, \qquad (2.21)$$

і для печі СДО 20.30.18/12,5, що працюватиме в одну зміну питома витрата енергії дорівнюватиме:

$$A_{min} = \frac{0{,}85 \cdot 185 + 1{,}2 \cdot 25}{555{,}68} = 0{,}337 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

При третьому варіанті піч взагалі не відключається в період простою між змінами. В цьому випадку година продуктивність печі (віднесена до годин її роботи)залишиться такою самою, як і при цілодобовій роботі, а питома витрата енергії буде при двозмінній роботі визначатись із наступного виразу:

$$A_{\min} = \frac{0{,}85P_{печі} + 0{,}5P_{пот}}{g_{\max}}, \qquad (2.22)$$

і для обраної печі дорівнюватиме:

$$A_{min} = \frac{0{,}85 \cdot 185 + 0{,}5 \cdot 25}{601{,}1} = 0{,}28 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}},$$

а при однозмінній роботі питому витрату енергії можна визначити за наступним виразом:

$$A_{\min} = \frac{0{,}85P_{печі} + 2P_{пот}}{g_{\max}}. \qquad (2.23)$$

Для печі СДО 20.30.18/12,5 питома витрата енергіі дорівнюватиме:

$$A_{min} = \frac{0,85 \cdot 185 + 2 \cdot 25}{601,1} = 0,345 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

В таблиці 2.3 наведено показники роботи печі СДО 20.30.18/12,5 при різних режимах роботи.

Таблиця 2.3 – Показники роботи печі СДО 20.30.18/12,5 при різних режимах роботи

Режим роботи	2 зміни		1 зміна	
	g_{max}, кг/год	A_{min}, кВт·год/кг	g_{max}, кг/год	A_{min}, кВт·год/кг
При простої піч вимкнено	551,14	0,285	419,32	0,375
Піч розігрівається перед початком роботи	588,64	0,281	555,68	0,337
Піч не вимикається на час простою	601,1	0,28	601,1	0,345

Як свідчать дані таблиці 2.3, перший режим експлуатації печі є найменш ефективним, оскільки характеризується максимальними питомими витратами електричної енергії. Другий і третій варіанти мають майже однакові показники енергоспоживання, однак за третього режиму забезпечується дещо вища годинна продуктивність обладнання. Наведені результати також наочно демонструють, що перерви в роботі печі суттєво погіршують її техніко-економічні показники.

Для забезпечення найкращої енергетичної ефективності електропіч доцільно експлуатувати безперервно протягом доби. Під час простою агрегат охолоджується, а при повторному запуску значна кількість електроенергії витрачається на нагрівання футеровки, конструктивних елементів і робочого простору до заданої температури. Унаслідок цього зростає питоме енергоспоживання та знижується продуктивність печі.

Отже, використання електропечей як засобу регулювання загального навантаження підприємства є недоцільним. Тимчасове відключення печі в години максимального електроспоживання може зменшити пікову потужність, проте подальший повторний нагрів призводить до додаткових втрат і, зрештою, до збільшення загальної витрати електроенергії.

2.5.2 Розрахунок показників роботи печі СНОЛ 500/12

Аналогічні розрахунки провидимо для обраної печі СНОЛ 500/12 максимальна годинна продуктивність дорівнюватиме:

$$g_{max} = \frac{0,85 \cdot 42 - 8}{0,148} = 187,6 \text{кг/год},$$

а мінімальні питомі витрати енергії дорівнюють:

$$A_{min} = \frac{0,85 \cdot 42}{187,6} = 0,19 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

Для печі СНОЛ 500/12 максимальна годинна продуктивність для двозмінної роботи печі при першому варіанті роботи дорівнюватиме:

$$g_{max} = \frac{0,85 \cdot 42 - 1,44 \cdot 8}{0,148} = 163,11 \text{кг/год}.$$

А при однозмінній роботі печі матимемо наступний вираз:

$$g_{max} = \frac{0,85 \cdot 42 - 2,6 \cdot 8}{0,148} = 100,68 \text{кг/год}.$$

Мінімальна питома витрата енергії для двозмінної роботи печі дорівнюватиме

$$A_{min} = \frac{0,85 \cdot 42}{163,11} = 0,219 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}},$$

а для однозмінної роботи мінімальна питма витрата енергії матиме значення:

$$A_{min} = \frac{0,85 \cdot 42}{100,68} = 0,355 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

При включенні печі СНОЛ 500/12 до початку робочої зміни, при двозмінній роботі максимальна годинна продуктивність дорівнюватиме:

$$g_{max} = \frac{0,85 \cdot 42 - 1,11 \cdot 8}{0,148} = 181,22 \text{кг/год}.$$

Для обраної печі при однозмінній роботі, при включенні печі до початку робочої зміни максимальна годинна продуктивність дорівнюватиме:

$$g_{max} = \frac{0,85 \cdot 42 - 1,4 \cdot 8}{0,148} = 165,54 \text{кг/год}.$$

Для печі СНОЛ 500/12, працюючої у дві зміни, питома витрата енергії дорівнюватиме:

$$A_{min} = \frac{0,85 \cdot 42 + 0,33 \cdot 8}{181,22} = 0,212 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

І для печі СНОЛ 500/12, що працюватиме в одну зміну питома витрата енергії дорівнюватиме:

$$A_{min} = \frac{0,85 \cdot 42 + 1,2 \cdot 8}{165,54} = 0,274 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

При третьому варіанті піч взагалі не відключається в період простою між змінами. В цьому випадку година продуктивність печі (віднесена до годин її роботи)залишиться такою самою, як і при цілодобовій роботі, а питома витрата енергії буде при двозмінній роботі дорівнювати:

$$A_{min} = \frac{0,85 \cdot 42 + 0,5 \cdot 8}{187,16} = 0,211 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

Для печі СНОЛ 500/12 питома витрата енергіі дорівнюватиме:

$$A_{min} = \frac{0,85 \cdot 42 + 2 \cdot 8}{165,54} = 0,276 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

В таблиці 2.4 наведено показники роботи печі СНОЛ 500/12 при різних режимах роботи.

Таблиця 2.4 – Показники роботи печі СНОЛ 500/12 при різних режимах роботи

Режим роботи	2 зміни		1 зміна	
	g_{max}, кг/год	A_{min}, кВт·год/кг	g_{max}, кг/год	A_{min}, кВт·год/кг
При простої піч вимкнено	163,11	0,219	100,68	0,355
Піч розігрівається перед початком роботи	181,22	0,212	165,54	0,274
Піч не вимикається на час простою	187,16	0,211	187,16	0,276

Аналогічно до першого розрахунку абсолютно очевидно, що піч повинна працювати цілодобово. Отже, на виробництві для обраних печей СНОЛ 500/12 і СДО 20.30.18/12,5 необхідно обрати такий режим роботи, при якому печі працюватимуть без простоїв, тобто цілодобово.

2.5.3 Визначення економії електроенергії при виборі раціонального режиму роботи електричних печей

При виборі печей, необхідних для виробництва ПрАТ «Кварц», було також запропоновано оптимальний для них режим роботи, що так само призводить до економії паливно-енергетичних ресурсів та коштів виробництвом.

На основі значень A_{min}, наведених у таблицях 2.3 і 2.4, розраховуються витрати електроенергії печами при різних режимах роботи.

Вага однієї садки в печі СДО 20.30.18/12.5 становить 1300 кг. Піч виконує 97 обпалів.

Таким чином витрата електроенергії піччю СДО 20.30.18/12.5 при режимі, в якому при простої піч вимикається і працює у дві зміни дорівнює:

$$W_{1II}=0,285\cdot1300\cdot97=35938,5, \text{ кВт·год},$$

при режимі, в якому піч розігрівається перед початком роботи і працює у дві зміни, витрата електроенергії становитиме:

$$W_{2II}=0,281\cdot1300\cdot97=35434,1, \text{ кВт·год},$$

і при режимі, в якому піч працює цілодобово і у дві зміни витрата електроенергії дорівнює:

$$W_{3II}=0,28\cdot1300\cdot97=35308, \text{ кВт·год}.$$

Аналогічно розраховується витрата електроенергії при роботі печі в одну зміну.

При вимкненні печі на час простою:

$$W_{1I}=0,375\cdot1300\cdot97=47287,5, \text{ кВт·год}.$$

При розігріві печі перед початком робочого дня:

$$W_{2I}=0,337\cdot1300\cdot97=42495,7, \text{ кВт·год}.$$

При режимі, в якому піч працює цілодобово:

$$W_{3I}=0,345\cdot1300\cdot97=43504,5, \text{ кВт·год}.$$

Із розрахунків видно, що менша кількість електроенергії витрачається при роботі печі у дві зміни. Найменше електроенергії витрачається при цілодобовій роботі печі. Економія електроенергії у порівнянні із режимами роботи, коли піч при простої вимикається і коли піч розігрівається перед початком роботи визначатиметься за формулою, наведеною нижче:

$$\Delta W=W_1-W_2 \qquad (2.24)$$

Економія електроенергії при цілодобовій роботі печі у дві зміни:

-у порівнянні із режимом роботи, при якому піч вимикається при простої дорівнюватиме:

ΔW_{1II}=35938,5-35308=630,5, кВт·год, що становить 2%;

-у порівнянні із режимом роботи, у якому піч розігрівається перед початком роботи:

ΔW_{2II}=35434,1-35308=126,1, кВт·год, що складає 0,2%;

-у порівнянні із режимом роботи, коли піч працює у одну зміну і вимикається на час простою:

ΔW_{1I}=47287,5-35308=11979,5, кВт·год, що становить 34%;

-у порівнянні із однозмінною роботою печі, коли піч розігрівається перед початком роботи:

ΔW_{2I}=42495,7-35308=7187,7, кВт·год, що становить 20%;

-у порівнянні із цілдлобовою роботою печі в одну зміну:

ΔW_{3I}=43504,5-35308=8196,5, кВт·год, що становить 23%.

Отже, із розрахунків видно, що найбільша економія електроенергії при виборі раціонального режиму роботи печі СДО 20.30.18/12.5 становить 11979,5 кВт·год, що складає 34%, при порівнянні обраного режиму роботи із режимом, в якому піч працює в одну зміну і вимикається на час простою.

Аналогічно розраховується економія електроенергії для печі СНОЛ500/12. Вага однієї садки в печі складає 455 кг. Піч виконує 97 обпалів.

При режимі, в якому при простої піч вимикається і працює у дві зміни дорівнює:

$$W_{1II}=0,219\cdot455\cdot97=9665,6, \text{ кВт·год},$$

При режимі, в якому піч розігрівається перед початком роботи, витрата ПЕР становитиме:

$$W_{2II}=0,212\cdot455\cdot97=9356,62, \text{ кВт·год}.$$

І при режимі, в якому піч працює цілодобово витрата ПЕР дорівнює:

$$W_{3II}=0,211\cdot455\cdot97=9312,5, \text{ кВт·год}.$$

Аналогічно при роботі печі в одну зміну витрата електроенергії складатиме:

При вимкненні печі на години простою:

$$W_{1I}=0,355\cdot455\cdot97=15667,9, \text{ кВт·год}.$$

При розігріві печі перед робочою зміною:

$$W_{2I}=0,274\cdot455\cdot97=12092,99, \text{ кВт·год}$$

При цілодобовій роботі печі:

$$W_{3I}=0,276\cdot455\cdot97=12181,26, \text{ кВт·год.}$$

Із розрахунків видно, що найменше електроенергії витрачається при роботі печі у дві зміни і цілодобово. Економія електроенергії при цілодобовій роботі печі у дві зміни:

-у порівнянні із режимом роботи, при якому піч вимикається при простої дорівнюватиме:

ΔW_{1II}=9665,6-9312,5=353,1, кВт·год, що становить 4%;

-у порівнянні із режимом роботи, у якому піч розігрівається перед початком роботи:

ΔW_{2II}=9356,62-9312,5=44,12, кВт·год, що складає 0,01%;

-у порівнянні із режимом роботи, коли піч працює у одну зміну і вимикається на час простою:

ΔW_{1I}=15667,9-9312,5=6355,4, кВт·год, що становить 68%;

-у порівнянні із однозмінною роботою печі, коли піч розігрівається перед початком роботи:

ΔW_{2I}=12092,99-9312,5=2780,49, кВт·год, що становить 30%;

-у порівнянні із цілдлобовою роботою печі в одну зміну:

ΔW_{3I}=12181,26-9312,5=2868,76, кВт·год, що становить 31%.

Отже, із розрахунків видно, що найбільша економія електроенергії при виборі оптимального режиму роботи печі СНОЛ 500/12 становить 6355,4кВт·год, що становить 68%, при порівнянні оптимального обраного режиму роботи печі із однозмінним режимом роботи печі, в якому піч вимикається на час простою.

2.5.4 Рекомендації щодо підвищення енергоефективності та продуктивності печі

У діючій електричній печі, обладнаній автоматичною системою регулювання температури, наближеність фактичної продуктивності до максимально можливої можна оцінити за характером роботи терморегулятора. Якщо в другій половині періоду нагрівання нагрівачі часто відключаються, а загальна тривалість вимкненого стану становить близько 50–70 % часу, це свідчить про неповне використання встановленої потужності печі. У такому випадку її продуктивність може бути збільшена без зміни потужності обладнання.

Якщо ж відключення нагрівачів є короткочасними, а в печі періодичної дії регулятор починає обмежувати потужність лише наприкінці циклу нагрівання, фактична продуктивність агрегату близька до максимальної. Подальше її підвищення без збільшення встановленої потужності буде практично неможливим.

Коли фактична годинна продуктивність виявляється нижчою за розрахункову, необхідно визначити причини недостатнього використання печі та вжити заходів для їх усунення. Збільшення випуску продукції може бути забезпечене двома основними способами: скороченням тривалості перебування виробів у робочій камері або підвищенням завантаження череня. Для печей періодичної дії це означає зменшення часу нагрівання, а для безперервних методичних печей — збільшення швидкості переміщення виробів через температурні зони. Реалізація таких заходів має сенс лише за наявності достатнього виробничого навантаження, наприклад, коли збільшення продуктивності одного агрегату дає змогу тимчасово вивести з роботи частину інших печей.

Прискорення нагрівання виробів зазвичай досягається підвищенням температури в робочій камері. Однак такий захід допустимий лише за умови,

що температура нагрівальних елементів не перевищує рекомендованих значень, а матеріал виробів витримує більш інтенсивний тепловий режим. Під час оброблення масивних деталей необхідно обов’язково оцінювати температурні перепади між поверхнею та внутрішніми шарами. Надмірна нерівномірність нагрівання може спричинити внутрішні напруження, деформацію або руйнування виробів, тому допустимі режими повинні узгоджуватися з технологічними вимогами.

Для зменшення кінцевої температурної нерівномірності доцільно наприкінці циклу знижувати уставку терморегулятора. У печах періодичної дії це потребує щонайменше дворазової зміни температурного завдання протягом одного циклу: спочатку встановлюється підвищена температура для прискореного нагрівання, а на завершальній стадії — технологічно необхідне значення для вирівнювання температури виробу.

У багатозонних методичних печах такий режим реалізувати простіше. Температуру перших зон установлюють на максимально допустимому рівні, який не загрожує нагрівачам і виробам, а в останній зоні підтримують температуру, передбачену технологічним процесом. У результаті на початку відбувається інтенсивний нагрів, а наприкінці — вирівнювання температури по всьому об’єму продукції.

Збільшення завантаження череня може бути ефективним лише тоді, коли воно досягається за рахунок компактнішого та рівномірнішого розміщення виробів. Необхідно забезпечити вільний доступ теплового потоку до кожної деталі й уникати надмірного збільшення товщини шару продукції в напрямку передавання теплоти.

Під час нагрівання тонкостінних виробів збільшення товщини шару зазвичай призводить до майже пропорційного подовження часу нагрівання. У результаті кількість продукції в садці зростає, але тривалість циклу збільшується приблизно в такій самій пропорції, тому годинна продуктивність практично не змінюється.

Для масивних виробів ситуація є ще менш сприятливою. Збільшення товщини завантаженого шару може спричинити зростання тривалості прогрівання приблизно пропорційно квадрату його товщини. У такому разі продуктивність печі не тільки не підвищується, а може навіть зменшитися. Тому кожне збільшення маси садки необхідно перевіряти експериментально, порівнюючи фактичну тривалість циклу, кількість обробленої продукції та питому витрату електроенергії.

Істотне збільшення завантаження може бути доцільним у технологічних процесах, де значну частину циклу займає витримка виробів за сталої температури. Навіть якщо нагрівання більшої садки потребуватиме додаткового часу, тривалість ізотермічної витримки залишатиметься незмінною. За таких умов загальна годинна продуктивність може виявитися вищою, ніж за початкового завантаження.

У низькотемпературних печах із примусовою циркуляцією газового середовища збільшення завантаження є менш критичним. Основна частина теплоти в таких агрегатах передається конвекцією, а інтенсивний рух повітря або газів сприяє рівномірному прогріванню садки. Тому в них можна застосовувати щільніше укладання виробів, якщо воно не перешкоджає руху теплоносія.

Коли продуктивність печі вже відповідає її встановленій потужності, а нагрівальні елементи протягом більшої частини циклу працюють із повним навантаженням, можна розглядати можливість збільшення потужності агрегату. Така модернізація є найбільш ефективною для процесів, які не потребують тривалої витримки за постійної температури. До них належать загартування, нормалізація, відпуск, а також нагрівання заготовок перед куванням або штампуванням.

Підвищення потужності дає змогу скоротити не лише тривалість нагрівання виробів, а й час розігрівання самої печі. У результаті збільшується продуктивність, зменшуються втрати теплоти протягом циклу та знижується питоме споживання електроенергії.

Збільшення потужності електропечі може здійснюватися шляхом перерахунку та заміни нагрівальних елементів на елементи з більшою потужністю. Однак така модернізація потребує комплексної перевірки електричної частини обладнання. Необхідно визначити допустиме навантаження кабелів, шин, трансформаторів, контакторів, тиристорних регуляторів, автоматичних вимикачів та іншої комутаційної апаратури. Підвищення потужності без відповідного посилення системи електропостачання може спричинити перегрівання провідників, відмову обладнання або виникнення аварійної ситуації.

Необхідність такої модернізації пояснюється тим, що багато стандартних печей мають недостатню потужність відносно їхнього робочого об’єму та маси садки. У результаті вони повільно виходять на заданий режим, довго нагрівають продукцію і характеризуються підвищеними питомими енерговитратами.

За паспортними характеристиками потужність холостого ходу стандартних електропечей може становити 20–30 % їхньої номінальної потужності. Теоретично це обмежує максимальний коефіцієнт корисної дії рівнем приблизно 70–80 %. Проте в реальних умовах експлуатації фактичний ККД зазвичай є нижчим.

Однією з причин є поступове погіршення теплоізоляційних властивостей футеровки. Під дією високих температур, механічних навантажень і багаторазових циклів нагрівання та охолодження в ній виникають тріщини, усадка, ущільнення або руйнування окремих шарів. Крім того, під час ремонтів початкові теплоізоляційні матеріали іноді замінюють дешевшими аналогами з гіршими характеристиками. Усе це призводить до збільшення теплових втрат порівняно з паспортними значеннями.

Потужність холостого ходу, зазначена в технічній документації, також не охоплює всіх фактичних втрат. У ній можуть не враховуватися втрати через відкриті двері або кришки під час завантаження та вивантаження, витрати

теплоти на нагрівання піддонів, вагонеток, капселів і пічного припасу, а також енергія, накопичена футеровкою та втрачена після завершення циклу.

Крім того, електропіч не протягом усього часу працює з номінальною потужністю. Після наближення до заданої температури терморегулятор періодично вмикає і вимикає нагрівачі або плавно зменшує їхню потужність. Піч також зазвичай відключається під час завантаження та вивантаження продукції. Тому середня потужність за цикл становить орієнтовно 75–90 % номінального значення.

Оскільки теплові втрати відбуваються безперервно протягом усього циклу, їх необхідно порівнювати не з номінальною, а із середньою фактичною потужністю печі. Саме тому реальна частка втрат в енергетичному балансі виявляється більшою, ніж це випливає з паспортних характеристик. Для достовірної оцінки ефективності електропечі доцільно використовувати фактичні графіки навантаження, тривалість циклів, обсяг продукції та результати вимірювання спожитої електроенергії.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВПРОВАДЖДЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОБПАЛУ КЕРАМІКИ НА ПРАТ «КВАРЦ»

У процесі виконання дипломного проєкту було проведено комплексний енергетичний аудит ПрАТ «Кварц», у межах якого досліджено структуру споживання паливно-енергетичних ресурсів, технічний стан основного технологічного обладнання та ефективність використання природного газу й електричної енергії. Особливу увагу приділено роботі газової печі встановленою потужністю 1 МВт, яка використовується для термічної обробки продукції.

Результати проведеного аналізу показали, що експлуатація наявної газової печі характеризується значними тепловими втратами та недостатньою енергетичною ефективністю. Фактичний коефіцієнт корисної дії установки становить близько 17 %, тобто лише незначна частина теплоти, отриманої внаслідок спалювання природного газу, безпосередньо використовується для здійснення технологічного процесу. Основна частина енергії втрачається разом із відхідними газами, через огороджувальні конструкції печі, завантажувальні отвори, футерування та внаслідок роботи обладнання в нераціональних режимах.

У 2024–2025 роках економічна доцільність подальшої експлуатації газової печі додатково знизилася через нестабільність і високий рівень цін на природний газ для непобутових споживачів. Вартість газу залежала від постачальника, обсягів закупівлі, умов оплати, транспортування та розподілу. Зокрема, у вересні 2024 року оприлюднена ціна окремих ресурсів природного газу становила близько 14,44 грн/м³ без ПДВ, а на початку 2025 року пропозиція одного з основних постачальників для підприємств складала приблизно 19,50 грн/м³ з ПДВ. Таким чином, порівняно з показником 10,9 грн/м³, який використовувався в розрахунках 2019–2020 років, вартість газового палива для промислових споживачів істотно зросла.

З урахуванням низького ККД газової установки, високої встановленої потужності, значних витрат природного газу та зростання вартості енергоресурсів було зроблено висновок, що подальше використання наявної печі є технічно й економічно недоцільним. Крім прямих витрат на придбання газу, підприємство несе додаткові витрати на його транспортування і розподіл, обслуговування газового господарства, перевірку систем безпеки, вентиляцію, контроль продуктів згоряння та підтримання працездатності димовідвідного обладнання.

Для підвищення енергоефективності виробництва запропоновано замінити газову піч потужністю 1 МВт двома електричними печами встановленою потужністю 200 кВт і 45 кВт. Їхня сумарна встановлена потужність становитиме 245 кВт, що на 755 кВт, або на 75,5 %, менше від потужності наявної газової установки. Використання двох печей різної потужності дасть змогу гнучкіше формувати виробниче навантаження та вмикати обладнання відповідно до фактичного обсягу продукції.

Запропоноване технічне рішення дозволить зменшити непродуктивні витрати енергії, підвищити точність підтримання заданої температури, скоротити тривалість розігрівання обладнання та покращити рівномірність температурного поля в робочому просторі. Електричні печі мають кращі можливості автоматичного регулювання температури, програмування режимів нагрівання та контролю технологічних параметрів. Відсутність процесу спалювання палива також сприятиме зменшенню викидів продуктів згоряння безпосередньо на території підприємства та покращенню умов праці обслуговуючого персоналу.

Отже, модернізація пічного господарства ПрАТ «Кварц» шляхом переходу від газової печі до двох електричних установок потужністю 200 і 45 кВт є обґрунтованим енергозберігаючим заходом. Його реалізація забезпечить скорочення споживання первинних енергоресурсів, зниження експлуатаційних витрат, підвищення керованості технологічного процесу та зменшення залежності підприємства від коливань цін на природний газ у 2024–2025 роках.

3.1 Визначення економії ПЕР при заміні печей

Одним із головних чинників, що зумовлюють необхідність підвищення енергетичної ефективності, є обмеженість і поступове виснаження традиційних природних енергетичних ресурсів. Запаси природного газу, нафти, вугілля та інших видів органічного палива є вичерпними, тоді як потреби промисловості, комунального господарства і населення в енергії залишаються значними. Тому раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів є важливою умовою сталого функціонування економіки будь-якої держави.

Не менш важливими мотивами впровадження енергозберігаючих заходів є забезпечення енергетичної безпеки та зменшення негативного впливу виробничої діяльності на навколишнє середовище. Для України у 2024–2025 роках ці питання набули особливого значення через пошкодження енергетичної інфраструктури, нестабільність постачання енергоносіїв, коливання ринкових цін і необхідність зниження залежності підприємств від природного газу та інших видів палива.

Висока енергоємність промислової продукції залишається одним із чинників, що обмежують конкурентоспроможність українських підприємств. Значні витрати газу, електроенергії та теплової енергії збільшують собівартість продукції, погіршують фінансові результати підприємств і знижують їхню здатність конкурувати на внутрішньому та зовнішньому ринках. У результаті підприємства можуть втрачати замовлення, скорочувати обсяги виробництва або повністю припиняти випуск окремих видів продукції через їхню економічну невигідність.

Таким чином, недостатня енергетична ефективність спричиняє комплекс взаємопов’язаних негативних наслідків: зростання собівартості продукції, зниження рентабельності виробництва, втрату конкурентних позицій, скорочення обсягів реалізації, збільшення потреби в імпортних енергоресурсах та погіршення екологічних показників. Саме тому енергозбереження необхідно

розглядати не лише як спосіб скорочення енергетичних витрат, а й як важливий напрям модернізації промислового виробництва.

В Україні раціональне використання енергетичних ресурсів є одним із пріоритетних напрямів державної політики. Ухвалений у червні 2024 року Національний план з енергетики та клімату до 2030 року охоплює питання енергоефективності, енергетичної безпеки, розвитку внутрішнього енергетичного ринку, декарбонізації та відновлення енергетичної інфраструктури.

Практичне значення енергозбереження полягає у скороченні питомого споживання енергоресурсів без зменшення обсягів виробництва та без погіршення якості продукції. Досягти цього можна шляхом модернізації технологічного обладнання, заміни застарілих установок, автоматизації процесів нагрівання, використання сучасної теплоізоляції, впровадження систем енергетичного моніторингу та оптимізації режимів роботи обладнання.

Метою енергозбереження є підвищення ефективності використання енергії в промисловості, житлово-комунальному господарстві, транспорті та побуті. Основне завдання полягає у визначенні технічних, організаційних і економічних заходів, за допомогою яких можна зменшити споживання енергоресурсів, скоротити втрати енергії та забезпечити економічно обґрунтований рівень енергоспоживання.

Важливе значення має застосування сучасних енергозберігаючих матеріалів, зокрема теплоізоляційних і вогнетривких матеріалів із низькою теплопровідністю. Їх використання дає можливість зменшити втрати теплоти через стінки і склепіння промислових печей, скоротити тривалість розігрівання робочого простору та знизити витрати енергії на підтримання заданої температури. Водночас вибір матеріалів має здійснюватися з урахуванням температурного режиму, механічних навантажень, довговічності, вартості та умов експлуатації обладнання.

Підвищення енергоефективності виробничих об’єктів потребує попереднього проведення енергетичного аудиту. Під час такого аудиту

визначаються основні споживачі енергоресурсів, аналізуються режими роботи обладнання, встановлюються причини надмірного споживання енергії та оцінюється потенціал енергозбереження. На підставі отриманих результатів формується перелік заходів, визначаються необхідні капітальні вкладення, очікувана економія та строк окупності проєкту.

У процесі виконання дипломного проєкту було проведено енергетичне обстеження ПрАТ «Кварц» і проаналізовано структуру споживання природного газу та електричної енергії. За результатами аналізу встановлено, що одним із найбільш неефективних споживачів енергоресурсів є газова піч, яка використовується для випалювання запобіжників та ізоляторів.

Коефіцієнт корисної дії наявної газової печі становить лише близько 17 %. Це означає, що основна частина теплоти, отриманої внаслідок спалювання природного газу, не використовується безпосередньо для нагрівання та випалювання продукції. Значні втрати теплоти виникають разом із відхідними газами, через огороджувальні конструкції печі, завантажувальні отвори, футерування, а також під час тривалого нагрівання незаповненого об’єму робочої камери.

За даними підприємства, для випалювання однієї партії запобіжників та ізоляторів у кількості 1000 одиниць у газовій печі витрачається приблизно 950 м³ природного газу. У попередніх розрахунках використовувалася ціна газу 3,9 грн/м³, що відповідала умовам 2011 року. Застосування такої вартості в розрахунках для 2024–2025 років є недоцільним, оскільки ціни на природний газ для непобутових споживачів істотно зросли.

Наприклад, у жовтні 2024 року оприлюднена ціна природного газу для промислових споживачів у ТОВ «ГК “Нафтогаз України”» становила 18,00 грн/м³ з ПДВ. У січні 2025 року відповідний показник становив уже 19,50 грн/м³ з ПДВ. При цьому фактична ціна для конкретного підприємства могла відрізнятися залежно від постачальника, обсягу споживання, умов попередньої оплати, вартості транспортування та розподілу газу.

За ціни природного газу 18,00 грн/м³ витрати на випалювання однієї партії продукції у 2024 році становили б:

$950 \cdot 18{,}00 = 17\,100$ грн.

Відповідно, витрати природного газу на одиницю продукції дорівнювали б:

$$17\,100 / 1000 = 17{,}10 \text{ грн/шт.}$$

За ціни природного газу 19,50 грн/м³ у 2025 році витрати на одну партію становили б:

$$950 \cdot 19{,}50 = 18\,525 \text{ грн.}$$

Питомі витрати на одну одиницю продукції у цьому випадку дорівнювали б:

$$18\,525 / 1000 = 18{,}53 \text{ грн/шт.}$$

Наведені розрахунки не враховують окрему плату за розподіл природного газу, технічне обслуговування газового обладнання, роботу вентиляційної та димовідвідної систем, проведення перевірок безпеки й інші супутні експлуатаційні витрати. Тому фактична собівартість випалювання продукції в газовій печі може бути вищою.

Для усунення виявлених недоліків керівництву підприємства запропоновано замінити газову піч двома електричними печами різної потужності. Використання двох установок дозволить вибирати необхідну піч відповідно до розмірів виробів і фактичного обсягу виробничої партії. Це виключатиме необхідність розігрівання великої робочої камери під час випалювання невеликої кількості продукції.

Для випалювання виробів невеликих розмірів запропоновано використовувати електричну піч СНОЛ 500/12 встановленою потужністю 42 кВт. Для термічної обробки великогабаритних виробів обрано піч СДО 20.30.18/12,5 встановленою потужністю 215 ± 15 кВт. Сумарна встановлена потужність двох обраних печей становить приблизно 257 кВт, однак одночасна робота обох установок не є обов’язковою і залежить від виробничого графіка підприємства.

Перевагою електричних печей є можливість точнішого регулювання температури, автоматичного програмування режимів випалювання, зменшення тривалості розігрівання та забезпечення більш рівномірного температурного поля. Відсутність продуктів згоряння у робочій камері сприятиме підвищенню якості продукції та покращенню умов праці обслуговуючого персоналу.

За результатами попереднього аналізу встановлено, що для випалювання аналогічної партії продукції в електричній печі необхідно спожити приблизно 1600 кВт·год електричної енергії. На відміну від регульованого тарифу для населення, ціна електроенергії для підприємств формується на ринкових умовах і включає вартість закупівлі електроенергії, послуги передачі, розподілу та постачання.

У грудні 2024 року середньозважена ціна купівлі-продажу електроенергії на ринку «на добу наперед» становила 5965,26 грн/МВт·год без ПДВ, тобто близько 5,97 грн/кВт·год без урахування передачі, розподілу, постачання та податку. У 2025 році тариф НЕК «Укренерго» на передачу електроенергії для більшості користувачів системи становив 686,23 грн/МВт·год без ПДВ.

У відкритих комерційних пропозиціях кінцева ціна електроенергії для непобутових споживачів у 2024–2025 роках могла становити приблизно 8,0–9,5 грн/кВт·год з ПДВ залежно від класу напруги, регіону, постачальника та умов договору. Наприклад, у грудні 2024 року оприлюднена ціна універсальної послуги для малого непобутового споживача другого класу напруги становила близько 9,46 грн/кВт·год з ПДВ, а в одній із комерційних пропозицій на жовтень 2025 року зазначалася ціна 8,65348 грн/кВт·год з ПДВ.

Для орієнтовного розрахунку можна прийняти ціну електроенергії 8,65 грн/кВт·год. Тоді витрати на випалювання однієї партії продукції становитимуть:

$$1600 \cdot 8{,}65 = 13\,840 \text{ грн.}$$

Питомі витрати електроенергії на одну одиницю продукції дорівнюватимуть:

$$13\,840 / 1000 = 13{,}84 \text{ грн/шт.}$$

Порівняно з газовою піччю, для якої витрати на одну партію за ціни газу 19,50 грн/м³ становлять 18 525 грн, орієнтовна економія від використання електричної печі дорівнюватиме:

$$18\ 525 – 13\ 840 = 4685 \text{ грн на одну партію.}$$

Економія в розрахунку на одну одиницю продукції становитиме:

$$18{,}53 – 13{,}84 = 4{,}69 \text{ грн/шт.}$$

Отже, заміна газової печі електричними установками може забезпечити зниження прямих енергетичних витрат на випалювання однієї партії продукції приблизно на 25 %. Додатковий економічний ефект може бути отримано завдяки скороченню тривалості технологічного циклу, зменшенню втрат від браку, відмові від обслуговування газових пальників і димовідвідного обладнання, а також можливості завантажувати піч відповідно до фактичного обсягу виробництва.

Для остаточного техніко-економічного розрахунку необхідно використовувати фактичні ціни природного газу та електроенергії за рахунками ПрАТ «Кварц» за обраний розрахунковий місяць 2024 або 2025 року. Також потрібно врахувати витрати на розподіл і транспортування енергоресурсів, потужність приєднання, монтаж електричних печей, модернізацію системи електропостачання, амортизаційні відрахування та витрати на технічне обслуговування.

Таким чином, модернізація пічного господарства ПрАТ «Кварц» шляхом заміни низькоефективної газової печі електричними печами СНОЛ 500/12 і СДО 20.30.18/12,5 є технічно та економічно обґрунтованим заходом. Його реалізація дозволить зменшити споживання енергоресурсів, скоротити собівартість випалювання продукції, підвищити точність дотримання температурного режиму та знизити залежність підприємства від коливань цін на природний газ.

Згідно з отриманими на виробництві даними, для обпалу однієї партії запобіжників та ізоляторів, що становить 1000 штук, у газовій печі витрачалось 950 $м^3$ газу. Витрати на одиницю продукції можна визначити за формулою:

$$P = \frac{W_{1000} \cdot T}{1000}, \quad (3.1)$$

де $W_{г1000}$ – витрата ПЕР на партію продукції, що скаладається із 1000 штук, м^3;

Т – тариф на ПЕР, грн.

Витрати на одиницю продукції дорівнюють:

$$P_1 = \frac{950 \cdot 3,9}{1000} = 3,705, \text{грн/шт}.$$

Аналогічно, за формулою (5.1) розраховуються витрати на одиницю продукції, при обпалі у печах СДО 20.30.18/12,5 та СНОЛ 500/12.

$$P_3 = \frac{1600 \cdot 0,79}{1000} = 1,264, \text{грн/шт};$$

$$P_2 = \frac{700 \cdot 0,79}{350} = 1,58, \text{грн/шт}.$$

Обсяг товарної продукції виробництва визначається за формулою:

$$ОТП = n_{обпСНОЛ} \cdot n_{шт} + n_{обпСДО} \cdot n_{шт}, \quad (3.2)$$

де $n_{обпСНОЛ}$, $n_{обпСДО}$ – кількість обпалів у печах СДО та СНОЛ відповідно;

$n_{шт}$ – кількість продукції однієї садки.

Знаючи, що печі СДО та СНОЛ виконують по 97 обпалів, за (3.2) визначаємо обсяг товарного виробництва ВАТ «Кварц», що дорівнюватиме:

$$ОТП = 350 \cdot 97 + 1000 \cdot 97 = 130950, \text{шт}.$$

Знаючи обсяг товарного виробництва підприємства та кожної електричної печі окремо, а також витрати на одиницю продукції, можна визначити економію ПЕР:

$$E = P_1 \cdot ОТП - P_2 \cdot ОТП_{СДО} - P_3 \cdot ОТП_{СНОЛ}. \quad (3.3)$$

Таким чином, економія ПЕР після заміни газової печі електричними печами СДО 20.30.18/12,5 та СНОЛ 500/12 становить:

$$E = 3,705 \cdot 130950 - 1,58 \cdot 33950 - 1,264 \cdot 97000 = 308920,75, \text{грн.}$$

Отже, економія ПЕР на ПрАТ «Кварц» після заміни газової печі становить 308920,75 грн.

3.2 Визначення капітальних витрат та показників ефективності

Капітальні витрати, які враховуються під час визначення порівняльної економічної ефективності запропонованого варіанта системи порівняно з базовим, розраховуються методом прямого визначення вартості окремих складових інвестицій. Такий підхід передбачає послідовне встановлення всіх витрат, необхідних для придбання, транспортування, монтажу, налагодження та введення нового обладнання в експлуатацію.

До складу капітальних вкладень включають вартість основного і допоміжного технологічного обладнання, витрати на його доставку до місця встановлення, виконання будівельних та електромонтажних робіт, улаштування фундаментів, прокладання кабельних ліній, модернізацію системи електропостачання, встановлення засобів автоматизації, контролю та захисту. Крім того, враховуються витрати на проведення пусконалагоджувальних робіт, проєктування, демонтаж застарілого обладнання та підготовку виробничого приміщення.

Загальна величина капітальних вкладень визначається як сума всіх витрат, безпосередньо пов’язаних із реалізацією запропонованого енергозберігаючого заходу, за формулою, грн:

У разі заміни газової печі електричними установками до капітальних витрат необхідно також віднести вартість демонтажу наявної газової печі, придбання електричних печей, модернізації розподільних пристроїв,

прокладання силових кабелів, встановлення комутаційної та захисної апаратури, а також перевірки достатності потужності трансформаторної підстанції підприємства.

Якщо для роботи нового обладнання необхідне збільшення дозволеної електричної потужності, реконструкція системи електропостачання або встановлення додаткового трансформатора, відповідні витрати також повинні бути включені до загальної суми капітальних вкладень. Водночас із розрахунку можуть бути виключені витрати на обладнання, яке вже є на підприємстві та може використовуватися після модернізації без додаткового придбання.

Визначена величина капітальних витрат використовується для подальшого розрахунку строку окупності, коефіцієнта економічної ефективності, чистої приведеної вартості та інших показників, що характеризують економічну доцільність упровадження запропонованого технічного рішення.

Капітальні витрати, використані в розрахунку при визначенні порівняльної економічної ефективності пропонованого варіанту системи з базовим, визначаються методом прямого розрахунку окремих елементів вкладень за формулою, грн.:

$$K_{Н} = K_{О} + K_{ЗД} + K_{У} + K_{Т}, \qquad (3.4)$$

де $K_{О}$ - капітальні вкладення в устаткування, необхідне по пропонованому варіанту, грн.;

$K_{ЗД}$ - те ж в будови, грн;

$K_{У}$ - те ж в споруди і пристрої, грн;

$K_{Т}$ - те ж в запаси палива і матеріалів, грн.

У свою чергу капітальні вкладення в устаткування $K_{О}$ складаються з:

$$K_{О} = K_{ТО} + K_{ПТ} + K_{КиУ}, \qquad (3.5)$$

де $K_{ТО}$ - капітальні вкладення в теплотехнічне устаткування, грн;

$K_{ПТ}$ - те ж в підйомно-транспортне устаткування, грн;

$K_{КиУ}$ - те ж в засоби контролю і управління, грн.

Капітальні витрати в підйомно-транспортне устаткування ($K_{ПТ}$), можна прийняти у розмірі 10-15% вартості капітальних витрат в засоби контролю і управління. Розрахувати капітальні витрати в підйомно-транспортне устаткування можна за формулою наведеною нижче:

$$K_{ПТ} = (0{,}1 \div 0{,}15) K_{КиУ}. \quad (3.6)$$

Капітальні витрати в устаткування за проектом можна розрахувати за формулою наведеною нижче:

$$K_0 = K_{ТО} + K_{ПТ} + K_{КиУ} + K_{ЧРЕ}. \quad (3.7)$$

Для визначення річного економічного ефекту і економії на приведених витратах, необхідно знати статті витрат по переділу в цеху по варіантах виробництва, які зіставляються.

Витрати по переділу можна представити у вигляді наступної формули, грн./рік:

$$З_{ПЕРЕД} = З_{В} + З_{Э} + З_{СЖ.В} + З_{переобуч} + ФОТ + ЗП_{нач} + З_{Р.С} + З_{А} + З_{пр.затр}, \quad (3.8)$$

де $З_{В}$ - витрати на воду

$З_{Э}$ - витрати на електроенергію

Витрати на електроенергію можна розрахувати за формулою, наведеною нижче:

$$З_Э = Р_Э^{ГОД} \cdot Ц_Э, \quad (3.9)$$

де: $Ц_Э$ - ціна на електроенергію

$З_{СЖ.В}$ - витрати на стиснуте повітря і кисень для технологічних цілей

ФОП – фонд оплати праці

$ЗП_{нач}$ - величина нарахувань до фонду оплати праці (39,35%);

$З_{Р.С}$ - витрати на поточний ремонт основних фондів;

$З_А$ - амортизаційні відрахування виробничих фондів;

$З_{пр.затр}$ - інші витрати цеху

Для розрахунку витрат на щорічні амортизаційні відрахування використовуємо прямолінійний метод розрахунку, за яким амортизаційні відрахування розраховуються за формулою, грн./рік:

$$З_А = (К_{КиУ} + К_{ЧРЕ}) \frac{Н_а}{100}, \quad (3.10)$$

де $Н_а$ - норма амортизаційних відрахувань, яка складає 40%.

Витрати на поточний ремонт визначають у відсотках (10-20%) від суми амортизаційних відрахувань. Їх можна розрахувати за формулою, грн./рік:

$$З_{тр} = 0,1 \cdot З_А . \quad (3.11)$$

Інші витрати цеху розраховуються за формулою:

$$З_{пр.затр} = (0,2 \div 0,3)(ЗП + З_А + З_{Т.Р}) . \quad (3.12)$$

Розрахунковий коефіцієнт ефективності додаткових капітальних вкладень визначають за формулою:

$$E_р = \frac{\Delta C_К}{K_н} \quad . \tag{3.13}$$

Термін окупності капіталовкладень визначають за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_р}. \tag{3.14}$$

Показник періоду окупності доцільно застосовувати під час оцінювання інвестиційних проєктів, реалізація яких здійснюється із залученням довгострокових позикових коштів. У такому випадку розрахунковий строк повернення вкладених інвестицій повинен бути меншим за період користування кредитними ресурсами, визначений умовами кредитора. Це дає змогу забезпечити повернення залучених коштів до завершення строку кредитування та знизити фінансові ризики підприємства.

Особливого значення показник періоду окупності набуває тоді, коли основною метою інвестора є якнайшвидше повернення вкладеного капіталу. Така ситуація може виникати під час вибору заходів фінансового оздоровлення підприємств, що перебувають у кризовому стані, мають обмежені фінансові ресурси або потребують швидкого відновлення платоспроможності. За цих умов перевага надається проєктам, які забезпечують отримання економічного ефекту в найкоротший термін.

Розрахунок економічної ефективності інвестиційного проєкту виконується з урахуванням низки логічних припущень. Насамперед передбачається, що кожному окремому проєкту відповідає конкретний грошовий потік, який охоплює всі пов’язані з його реалізацією надходження та витрати коштів.

Розрахунки, як правило, здійснюються за окремими часовими періодами, найчастіше за роками. При цьому умовно приймається, що надходження доходів і здійснення поточних витрат відбуваються наприкінці кожного

розрахункового періоду. Такий підхід спрощує процедуру оцінювання та дає можливість привести всі грошові потоки до єдиного моменту часу.

Вихідні параметри інвестиційного проєкту не завжди можуть бути визначені з абсолютною точністю. Обсяги майбутніх доходів, експлуатаційні витрати, ціни на енергоресурси, рівень інфляції та інші показники можуть змінюватися впродовж строку реалізації проєкту. Тому під час виконання розрахунків використовують прогнозні або найбільш імовірні значення відповідних параметрів.

Також передбачається, що рівень ризику конкретного проєкту відповідає середньому рівню ризику діяльності підприємства загалом. Вартість залученого капіталу умовно вважається постійною протягом усього розрахункового періоду та незалежною від обсягу інвестицій, спрямованих на реалізацію проєкту.

Під час оцінювання також може застосовуватися припущення про існування досконалого ринку капіталу. За таких умов підприємство має можливість залучати або розміщувати фінансові ресурси за встановленою ставкою, а доступ до капіталу не залежить від обсягу операцій та інших обмежувальних чинників.

Крім того, передбачається, що інвестиційний проєкт характеризується ординарним грошовим потоком. Такий потік складається з початкових капітальних вкладень, здійснених одноразово або протягом декількох послідовних періодів, після яких підприємство отримує регулярні позитивні грошові надходження. Отже, після завершення інвестиційної стадії знак грошового потоку змінюється з від’ємного на додатний лише один раз.

Одним із найважливіших показників оцінювання економічної ефективності інвестиційного проєкту є чиста теперішня вартість. Вона характеризує сумарний економічний результат від реалізації проєкту з урахуванням зміни вартості грошей у часі.

Чиста теперішня вартість визначається як різниця між загальною величиною дисконтованих доходів, очікуваних упродовж строку реалізації

проєкту, та сумою приведених до початкового моменту витрат. Інакше кажучи, цей показник відображає сучасну вартість усіх чистих грошових потоків, які формуються внаслідок упровадження інвестиційного рішення.

Додатне значення чистої теперішньої вартості свідчить про те, що дисконтовані доходи перевищують витрати, а реалізація проєкту є економічно доцільною. Якщо показник дорівнює нулю, проєкт лише забезпечує повернення вкладеного капіталу та отримання доходу на рівні прийнятої ставки дисконтування. Від'ємне значення чистої теперішньої вартості означає, що очікувані доходи не компенсують понесені витрати, тому такий проєкт вважається економічно невигідним.

Для проектів з ординарними грошовими потоками:

$$ЧТВ = \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} - KB\,, \tag{3.15}$$

де КВ – капітальні витрати, грн.

Чим більше значення чистої теперішньої вартості, тим краще, тим більший розрив між сумарною приведеною вартістю доходів і сумарною приведеною вартістю витрат. Логіка використання даного показника наступна:

- якщо ЧТВ>0, то проект вважається ефективним і його реалізація призведе до зростання добробуту його власників,
- якщо ЧТВ=0 – надходження проекту покривають витрати та не забезпечують зростання вартості підприємства, але водночас реалізація проекту є привабливою з точки зору збільшення обсягів виробництва, розширення ринку тощо,
- якщо ЧТВ<0 – проект збитковий і у випадку його реалізації підприємство зазнає втрат.

Вартості електричних печей СНОЛ 500/12 і СДО 20.30.18/12,5 наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вартість електричних печей СНОЛ 500/12 і СДО 20.30.18/12,5

Тип печі	СДО 20.30.18/12,5, грн	СНОЛ 500/12, грн
Вартість печі	877 800	102 925,20
Доставка	5 280	2 520
Пусконалагоджувальні роботи	13 140	9 480
Всього	1 016 220	114 925,20

Капіталовкладення в підйомно-транспортне устаткування складає:

$$K_{ПТ} = 0,1 \cdot (95771 + 846850) = 94262,1 \text{грн}.$$

Капітальні витрати в устаткування дорівнюватимуть:

$$K_0 = 94262,1 + 95771 + 846850 = 1036883,1 \text{грн}.$$

Капітальні витрати дорівнюють:

$$K_н = K_о = 1036883,1 \text{грн}.$$

Витрати виробництва на електроенергію становитимуть:

$$З_е = 700000 \cdot 0,79 = 553000 \text{грн}.$$

Величина амортизаційних витрат становить:

$$З_А = (95771 + 846850)\frac{40}{100} = 377048,4 \text{грн/рік}.$$

Витрати на поточний ремонт становлять:

$$З_{тр} = 0,1 \cdot 377048,4 = 37704,84 \text{грн/рік}.$$

Інші витрати виробництва складають:

$$З_{пр.затр} = 0,2(377048,4 + 37704,84) = 82950,648 \text{ грн./рік}.$$

Витрати на річний обсяг виробництва у базовому варіанті та після заміни печей наведено в таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 - Витрати на річний об'єм виробництва по порівнюваних варіантах, грн.

Найменування показників	До заміни печей, грн	Після заміни печей, грн	Перевитрата (–) / економія (+), грн
ПЕР	582 203,70	211 498,80	370 704,90

ФОП	1 158 852,00	1 158 852,00	0
Нарахування на ФОП	456 008,27	456 008,27	0
Всього	2 197 063,97	1 826 359,07	–370 704,90
Поточний ремонт	—	—	45 245,81
Амортизація	—	—	452 458,08
Інші витрати	—	—	99 540,78
Разом	—	—	226 539,29

Розрахунковий коефіцієнт ефективності додаткових капітальних дорівнює:

$$E_p = \frac{308920{,}75}{1036883{,}1} = 0{,}3\,.$$

Для даного проекту термін окупності дорівнює:

$$T_{ок} = \frac{1036883{,}1}{308920{,}75} = 3{,}3\,року\,.$$

Розрахунок чистої теперішньої вартості проекту проведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахунок чистої теперішньої вартості проекту

Рік	Грошовий потік, грн	α = 10 %	Дисконтований грошовий потік, грн	α = 20 %	Дисконтований грошовий потік, грн	Кумулятивний дисконтований грошовий потік, грн
0	–1 244 259,72	1,000	–1 244 259,72	1,000	–1 244 259,72	–1 244 259,72
1	370 704,90	1,100	337 004,40	1,200	308 920,75	–907 255,32
2	370 704,90	1,210	306 367,68	1,440	257 433,96	–600 887,64
3	370 704,90	1,331	278 725,44	1,730	214 280,28	–322 162,20
4	370 704,90	1,460	253 907,52	2,070	179 084,52	–68 254,68
5	370 704,90	1,610	230 251,44	2,490	148 877,52	161 996,76

Аналіз чистої теперішньої вартості проєкту показує, що початкові капітальні вкладення у заміну пічного обладнання становлять 1 244 259,72 грн. Ці витрати здійснюються на початковому етапі реалізації проєкту, тому грошовий потік нульового року має від’ємне значення.

Після впровадження запропонованого заходу очікується щорічний позитивний грошовий потік у розмірі 370 704,90 грн. Він формується

переважно завдяки скороченню витрат на паливно-енергетичні ресурси та підвищенню ефективності роботи нового обладнання.

За ставки дисконтування 10 % поточна вартість грошового потоку першого року становить 337 004,40 грн. У другому році вона зменшується до 306 367,68 грн, у третьому — до 278 725,44 грн, у четвертому — до 253 907,52 грн, а в п’ятому — до 230 251,44 грн.

Поступове зменшення дисконтованих надходжень пояснюється зниженням поточної вартості майбутніх коштів. Незважаючи на те, що номінальний щорічний економічний ефект залишається незмінним, його дисконтована величина з кожним наступним роком скорочується.

Після першого року реалізації проєкту непокрита частина початкових вкладень становить 907 255,32 грн. Наприкінці другого року вона зменшується до 600 887,64 грн, після третього року — до 322 162,20 грн. Після четвертого року непокритими залишаються 68 254,68 грн.

Упродовж п’ятого року кумулятивний дисконтований грошовий потік стає додатним і досягає 161 996,76 грн. Отже, за ставки дисконтування 10 % проєкт повністю окупається між четвертим і п’ятим роками експлуатації.

Дисконтований строк окупності становить приблизно 4,3 року, тобто близько 4 років і 4 місяців. Простий строк окупності без урахування зміни вартості грошей у часі становить приблизно 3,36 року, або близько 3 років і 4 місяців.

Чиста теперішня вартість проєкту за ставки дисконтування 10 % становить 161 996,76 грн. Додатне значення цього показника свідчить про те, що дисконтовані надходження перевищують початкові капітальні вкладення. За таких умов реалізація проєкту є економічно доцільною.

Індекс прибутковості проєкту становить приблизно 1,13. Це означає, що кожна гривня вкладених коштів забезпечує близько 1,13 грн дисконтованих надходжень. Чистий економічний результат становить близько 0,13 грн на одну гривню інвестицій.

За ставки дисконтування 20 % дисконтований грошовий потік першого року становить 308 920,75 грн, другого року — 257 433,96 грн, третього — 214 280,28 грн, четвертого — 179 084,52 грн, а п’ятого — 148 877,52 грн.

Сумарний дисконтований дохід за п’ять років за ставки 20 % становить 1 108 597,03 грн. Ця сума є меншою за початкові капітальні вкладення на 135 662,69 грн. Отже, чиста теперішня вартість проєкту за ставки 20 % має від’ємне значення.

За такого рівня дисконтування проєкт не окупається протягом п’ятирічного розрахункового періоду. Для забезпечення його економічної ефективності необхідно збільшити щорічну економію, зменшити капітальні витрати або подовжити строк експлуатації обладнання, який враховується в розрахунках.

Порівняння результатів показує, що проєкт є чутливим до зміни ставки дисконтування. За ставки 10 % він забезпечує додатний економічний результат у розмірі 161 996,76 грн, тоді як за ставки 20 % виникає від’ємний результат у розмірі 135 662,69 грн.

Різниця між результатами за двома ставками становить близько 297 659,45 грн. Це свідчить про значний вплив вартості залученого капіталу та інвестиційного ризику на економічну доцільність модернізації.

Внутрішня норма рентабельності проєкту становить приблизно 14,95 %. Отже, реалізація заходу є доцільною за умови, що нормативна ставка дохідності або вартість залучених фінансових ресурсів не перевищує приблизно 15 %.

Загалом проєкт заміни пічного обладнання можна вважати економічно ефективним за ставки дисконтування 10 %. Він забезпечує повернення вкладених коштів протягом розрахункового періоду, формує додатну чисту теперішню вартість і має прийнятний строк окупності. За ставки дисконтування 20 % проєкт потребує додаткової оптимізації економічних і технічних показників.

Отже, можна зробити висновок, що заміна газової печі електричними печами типу СДО 20.30.18/12,5 та СНОЛ 500/12 є доцільною, проект окупиться за 4,2 роки, що є рентабельним.

ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломного проекту було розкрито особливості технологічного процесу виготовлення кераміки. Було з’ясовано, що найбільш енергозатратним етапом виробництва є обпал керамічних виробів у печах для обпалу. Отже, проект зі зменшення енергозатрат на виробництві ПрАТ «Кварц» має базуватися на зменшенні витрат енергії на етапі обпалу кераміки.

Було приведено характеристику обладнання для обпалу кераміки, в рамках якої було наведено приклади різних типів електричних та газових печей для обпалу кераміки. В ході порівняння електричних та газових печей дійшли висновку, що встановлення електричних печей на виробництві є більш доцільним так як в електричних печах існує можливість чіткого контролю температурного режиму і автоматичного регулювання обпалу за заздалегідь наміченою кривою температур, обпал виконується швидше і чистіше, а також зменшується кількість браку, електричні печі є легшими у обслуговуванні. Таким чином на виробництві було прийнято рішення про заміну діючої газової печі на електричні печі різної встановленої потужності.

Було проведено розрахунок і обрано електричні печі типу СДО 20.30.18/12,5 встановленою потужністю 215 кВт, а також піч СНОЛ 500/12 встановленою потужністю 42 кВт. Виконано тепловий розрахунок печей в результаті якого було визначено оптимальні параметри, при яких забезпечується проведення заданого технологічного процесу. Так, було визначено, що для обох обраних печей усереднена теплоємність завантаження дорівнює 0,02 Дж/кг·К. Було розраховано втрати теплоти печами. Для печі СДО втрати теплоти через отвір нагрітої печі за рахунок конвекції становлять 4545 кВт, втрати теплоти за рахунок випромінювання – 274,6 кВт, втрати теплоти крізь завантажувальні і розвантажувальні отвори печі дорівнюють 133,9 кВт. Продуктивність печі СДО становить 0,029 кг/с. питомі витрати електроенергії

піччю СДО 20.30.18/12,5 становлять 5965,5 кДж. Розрахунковий тепловий ККД печі складає 81%.

Аналогічно і для печі СНОЛ було визначено величину втрат теплоти. Втрати за рахунок конвекції дорівнюють 334,2 кВт, за рахунок випромінювання – 104,5 кВт, врати теплоти через завантажувальні і розвантажувальні отвори – 12,2 кВт. Продуктивність печі згідно з розрахунками складає 0,0041 кг/с. питомі витрати електроенергії становлять 8536,6 кДж. Тепловий ККД згідно з розрахунками дорівнює 77%.

За результатами розрахунку було визначено встановлену потужність печі, знайдено кількість теплоти, необхідну для проведення фізико-хімічних перетворень в оброблюваному матеріалі, обчислено теплові втрати печі.

Для раціональної витрати електроенергії було обрано оптимальний режим роботи печі. Шляхом розрахунків було доведено, що при роботі печі у дві зміни витрачається менша кількість енергії. А із запропонованих режимів роботи, у яких при простої піч вимикається, піч розігрівається перед початком роботи, піч на час простою не вимикається, було обрано режим при якому піч працює постійно і на час простоїв залишається ввімкненою, так як в цьому режимі найбільша максимальна годинна продуктивність печі (601,1кг/год у печі СДО, 187,16 кг/год для печі СНОЛ) і найменша мінімальна витрата енергії (0,28 кВт·год/кг для СДО і 0,211 кВт·год/кг для СНОЛ)

Було визначено економію паливно-енергетичних ресурсів. Так, було розраховано, що при заміні печі економія ПЕР складає 308920,75 грн. А при виборі оптимального режиму роботи печі для печі СДО найбільша економія електроенергії становить 11979,5 кВт·год, що складає 34%, для печі СНОЛ - 6355,4 кВт·год, що становить 68%.

Після вибору печей та вибору їх оптимального режиму роботу було проведено економічну оцінку проекту заміни газової печі на електричні печі різної встановленої потужності. Було розраховано внутрішню норму рентабельності проекту заміни газової печі електричними, NPV дорівнює 15%, отже, підприємство може платити за використання необхідних ресурсів 15 % за

позиками. залишаючись на беззбитковому рівні. Дисконтований термін окупності цього проекту склав 4,2 роки, отже, проект заміни газової печі є доцільним і рентабельним.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Castro Oliveira M., Iten M., Cruz P. L., Monteiro H. Review on Energy Efficiency Progresses, Technologies and Strategies in the Ceramic Sector Focusing on Waste Heat Recovery. *Energies*. 2020. Vol. 13. Article 6096. DOI: 10.3390/en13226096.

2. Gomez R. S., Porto T. R. N., Magalhães H. L. F., Moreira G., André A. M. M. C. N., Melo R. B. F., Lima A. G. B. Natural Gas Intermittent Kiln for the Ceramic Industry: A Transient Thermal Analysis. *Energies*. 2019. Vol. 12. Article 1568. DOI: 10.3390/en12081568.

3. Wang Y., Zhang Y., Li Z., Chen H. Thermal Performance Combined with Cooling System Parameters Study for a Roller Kiln Based on Energy–Exergy Analysis. *Energies*. 2020. Vol. 13. Article 3922. DOI: 10.3390/en13153922.

4. Kočí V., Černý R. Experimental and Computational Study of Thermal Processes in Red Clays Exposed to High Temperatures. *Energies*. 2020. Vol. 13. Article 2211. DOI: 10.3390/en13092211.

5. Unterluggauer J., Schieder M., Gutschka S., Puskas S., Vogt S., Streibl B. Numerical Investigations on the Enhancement of Convective Heat Transfer in Fast-Firing Brick Kilns. *Energies*. 2024. Vol. 17. Article 5617. DOI: 10.3390/en17225617.

6. Alrahmani M., Nemitallah M. A., Habib M. A. Combined Effect of Brick Surface Roughness and Lattice Setting Density on Brick Firing in Tunnel Kilns. *Energies*. 2022. Vol. 15. Article 5670. DOI: 10.3390/en15155670.

7. Palacio-Caro I. D., Alvarado-Torres P. N., Cardona-Sepúlveda L. F. Numerical Simulation of the Flow and Heat Transfer in an Electric Steel Tempering Furnace. *Energies*. 2020. Vol. 13. Article 3655. DOI: 10.3390/en13143655.

8. Hussein M. M., Alkhalaf S., Mohamed T. H., Osheba D. S., Ahmed M., Hemeida A., Hassan A. M. Modern Temperature Control of Electric Furnace in

Industrial Applications Based on Modified Optimization Technique. *Energies*. 2022. Vol. 15. Article 8474. DOI: 10.3390/en15228474

9. Dreißigacker V., Haider M., Wirtz S. Electrically Heated High-Temperature Thermal Energy Storage with Dual Operating Modes: From Concept to Validation. *Energies*. 2023. Vol. 16. Article 7344. DOI: 10.3390/en16217344.

10.Jouhara H., Khordehgah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S. A. Waste Heat Recovery Technologies and Applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018. Vol. 6. P. 268–289. DOI: 10.1016/j.tsep.2018.04.017.

11.Bendig M., Maréchal F., Favrat D. Defining "Waste Heat" for Industrial Processes. *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 61, No. 1. P. 134–142. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.03.020.

12.Brückner S., Liu S., Miró L., Radspieler M., Cabeza L. F., Lävemann E. Industrial Waste Heat Recovery Technologies: An Economic Analysis of Heat Transformation Technologies. *Applied Energy*. 2015. Vol. 151. P. 157–167. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.147.

13.Karamarković V., Marašević M., Karamarković R., Karamarković M. Recuperator for Waste Heat Recovery from Rotary Kilns. *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 54, No. 2. P. 470–480. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.02.027.

14.Delpech B., Axcell B., Jouhara H. Experimental Investigation of a Radiative Heat Pipe for Waste Heat Recovery in a Ceramics Kiln. *Energy*. 2019. Vol. 170. P. 636–651. DOI: 10.1016/j.energy.2018.12.133.

15.Mezquita A., Boix J., Monfort E., Mallol G. Energy Saving in Ceramic Tile Kilns: Cooling Gas Heat Recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 65, No. 1–2. P. 102–110. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.01.002.

16.Milani M., Montorsi L., Stefani M., Saponelli R., Lizzano M. Numerical Analysis of an Entire Ceramic Kiln under Actual Operating Conditions for the Energy Efficiency Improvement. *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 203. P. 1026–1037. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.014.

17.Kaya S., Küçükada K., Mançuhan E. Model-Based Optimization of Heat Recovery in the Cooling Zone of a Tunnel Kiln. *Applied Thermal Engineering*. 2008. Vol. 28, No. 5–6. P. 633–641.

18.Kaya S., Mançuhan E., Küçükada K. Modelling and Optimization of the Firing Zone of a Tunnel Kiln to Predict the Optimal Firing Conditions. *Applied Energy*. 2009. Vol. 86, No. 10. P. 1863–1872.

19.Reed J. S. *Principles of Ceramics Processing*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 688 p.

20.Rahaman M. N. *Ceramic Processing and Sintering*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2003. 875 p.

21.Kingery W. D., Bowen H. K., Uhlmann D. R. *Introduction to Ceramics*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1976. 1056 p.

22.Carter C. B., Norton M. G. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. 2nd ed. New York: Springer, 2013. 766 p.

23.Richerson D. W., Lee W. E. *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

24.Dinsdale A. T. *Electrical Resistance Heating*. London: Peter Peregrinus, 1991.

25.Trinks W., Mawhinney M. H., Shannon R. A., Reed R. J., Garvey J. R. *Industrial Furnaces*. 6th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. 512 p.

26.Mullinger P., Jenkins B. *Industrial and Process Furnaces: Principles, Design and Operation*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 720 p.

27.Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

28.Modest M. F. *Radiative Heat Transfer*. 3rd ed. Oxford: Academic Press, 2013. 904 p.

29.Çengel Y. A., Ghajar A. J. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2020.

30. European Commission. *Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry*. Seville: European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau, 2007.