

**ГОЛІНКО І.М.**

**ПРОЦЕС ВИПАЛЮВАННЯ КЕРАМІКИ ЯК  
ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

**КИЇВ АТЕП 2008**

**Голінко І.М. ПРОЦЕС ВИПАЛЮВАННЯ КЕРАМІКИ ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ //–К.: АТЕП, 2008. –41с.**

Розглянуто фізико-хімічні основи процесу випалювання керамічних виробів. Проведено аналіз технологічного обладнання для процесу випалювання керамічних виробів. Розглянута робота тунельних печей як об'єкта автоматизації. Представлено опис основних контурів керування для стабілізації технологічного режиму тунельних печей.

## **ЗМІСТ**

<b>ВСТУП</b>	4
<b>ПРОЦЕС ВИПАЛЮВАННЯ КЕРАМІКИ ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ</b>	6
1.1. Фізико-хімічні основи випалювання кераміки	6
1.2. Опис тунельної печі та технологія випалювання цегли	12
1.3. Стан автоматизації тунельних печей	19
1.4. Постановка завдання автоматизації	30
<b>ЛІТЕРАТУРА</b>	32

## ВСТУП

Розвиток людини на довгому історичному шляху нерозривно пов'язаний з появою і використанням кераміки. Сьогодні з керамічних мас виготовляють близько 60 тис. різних виробів. Керамічні матеріали знаходять широке застосування у різних галузях сучасної промисловості. Розроблені та використовуються матеріали для електротехніки, електроніки, машинобудування, космічної, атомної техніки і т.д.

Вдосконалюється технологія виробництва кераміки: досліджується ціла гамма нових композицій шихт, технологій їх спікання та модифікацій. Для випалювання кераміки на зміну печам з періодичним циклом дії прийшли високопродуктивні тунельні печі з неперервним циклом роботи.

Проте, якість керамічних виробів, особливо будівельної цегли, залишається низькою. Насамперед це обумовлено складною технологією виробництва. Будь-яка технологія отримання виробів із кераміки налічує такі основні стадії: приготування керамічної маси; формування, висушування та випалювання виробів. На якість керамічних виробів впливає багато чинників починаючи від стадії приготування керамічної маси та закінчуючи випалюванням виробів. Порушення технології на будь-якій стадії приводить до погіршення якості виробів. Стадія випалювання вносить завершальний вплив на якість виробів, під час її протікання формується кінцевий фазовий склад і мікроструктура матеріалу. Саме від фазового складу та мікроструктури матеріалу залежать фізико-хімічні, механічні, термічні та багато інших властивостей виробів.

На сьогоднішній день значний відсоток керамічних виробів випалюється в тунельних печах (близько 90 %). Тунельні печі отримали широке розповсюдження у виробництві будівельної кераміки, вогнетривів, порцеляни, фаянсу і т.д.

Актуальність. Тунельні печі відносяться до найбільш досконалих печей силікатної промисловості і дозволяють широко використовувати технічні засоби автоматизації та механізації. Проте, випалювання в тунельних печах проводиться без контролю стану виробів, контролюються та автоматично регулюються тільки параметри теплоносія печі, що пояснюється відсутністю вимірювачів для контролю стану виробів під час їх руху в печі. Температурний

режим тунельних печей на виробництві коригується, виходячи із кінцевого результату випалювання виробів без достатнього наукового обґрунтування. Це призводить до зниження якості виробів, перевитрати палива і як слідство збільшення собівартості продукції.

Температурний режим більшості тунельних печей підтримується локальними засобами автоматизації. З появою комп'ютерних систем керування (КСК) розширився клас задач, які можна вирішити на сучасній комп'ютерній базі. З'явилася можливість моделювання процесів, що протікають у керамічних виробках на різних стадіях випалювання. Це дозволяє отримати температурні характеристики виробів під час випалювання, які можуть бути закладені в основу визначення оптимального температурного режиму тунельної печі. Застосування комп'ютерної техніки дозволяє проводити адаптацію систем керування печами до хімічного складу сировини та інших факторів.

Таким чином, дослідження питань, пов'язаних з розробкою комп'ютерної системи керування тунельною піччю, в основі якої закладені параметри керамічних виробів є актуальною задачею. Це дозволить формувати оптимальний температурний режим тунельних печей, що покращить якість продукції та зменшить собівартість виробів. Враховуючи широке застосування тунельних печей у будівельній промисловості, в роботі розглядається тунельна піч для випалювання будівельної цегли.

# ПРОЦЕС ВИПАЛЮВАННЯ КЕРАМІКИ ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ

## 1.1. Фізико-хімічні основи випалювання кераміки

В технології керамічних матеріалів випалювання вносить завершальний вплив на якість виробів, в процесі якого формується кінцевий фазовий склад і мікроструктура матеріалу. Сам процес випалювання, під час якого формуються фізико-механічні властивості виробів, ускладнений фазовими перетвореннями та хімічними реакціями. На протязі останнього століття процеси тепло- та масообміну при нагріванні глин детально досліджені українськими та закордонними вченими.

В якості сировини для випалювання керамічних виробів використовують глинисті мінерали, які являють собою гідросилікати алюмінію. Крім гідросилікатів алюмінію, до складу глин входять кварц, кальцит, слюди, пірит та інші мінерали. В табл.1.1 наведений приблизний хімічний склад глин для виробництва будівельної цегли.

Таблиця 1.1. Хімічний склад сировини для виробництва будівельної цегли.

Оксид	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O+ +Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Інші сполуки
Вміст, %	45 - 80	7 - 23	2 - 15	0,5 - 25	0 - 4	0,3 - 5	0 - 3	3 - 16

Характер змін, які протікають у глинах при нагріванні, визначається наявністю в матеріалі тих або інших глинистих мінералів та домішок. На сьогоднішній час такі процеси досліджуються головним чином методами термодинаміки незворотних процесів [1-7]. Такий підхід став можливий завдяки фундаментальним роботам О.В.Ликова [8-12]. Він сформулював основні термодинамічні поняття, які відносяться до законів переносу речовини в капілярно-пористому тілі (потенціал, масовміст, масоємкість і т.д.); отримав та розв'язав систему диференціальних рівнянь переносу, яка є теоретичною основою для виконання багатьох експериментальних досліджень, пов'язаних з

переносом тепла та речовини і визначенням термічних характеристик. Спираючись на закономірності термодинаміки незворотних процесів О.В.Ралко вперше провів експериментальні дослідження тепло- та масообміну для випалювання каолінів і глин, результати яких показали можливість розповсюдження загальних рішень за фазових перетворень, присутніх ендо- і екзотермічних ефектів [7,13-15].

Використовуючи метод термодинаміки незворотних процесів, встановлені ймовірні інтервали температур реакцій дегідратації, дисоціації карбонатів та сульфатів в процесі випалювання кераміки. Згідно співставлення результатів термографічних розрахунків з експериментальними даними термічного аналізу, можна виділити наступні границі і характеристики процесів випалювання. [1-3,7,13].

В інтервалі температур 293 - 773 K відбувається виділення гігроскопічної води та окислення сульфідної сірки. На початковій стадії випалювання до температури 773 K у мінерально-фазовому складі глин нема різких змін, мікроструктура речовини в основному зберігається. Нагрівання керамічної маси до температури 383 K приводить до виділення фізично зв'язаної води, відбувається рівномірний прогрів маси. Підвищення температури до 573 K варто проводити повільно, щоб уникнути руйнування сирцю через інтенсивне виділення газів. Основна задача полягає у тому, щоб уникнути руйнування або ушкодження виробів у процесі нагрівання. небезпека руйнування виробів визначається в основному об'ємними змінами під час нагрівання та, в ряді випадків, інтенсивними процесами масообміну.

Як правило, швидкість збільшення температури на окремих інтервалах періоду нагрівання може лімітуватися різними процесами і факторами [16]. Під час нагрівання керамічних виробів до температури 383 K відбувається виділення фізико-механічно зв'язаної води та рівномірний прогрів маси. Підвищення температури до 473 K проводиться повільно, щоб уникнути руйнування сирцю через інтенсивне виділення газів. Виділення (випаровування) залишків води, які зберігалися у сирці після висушування, не пов'язане з об'ємними змінами, але при великій швидкості нагрівання воно призводить до підвищення тиску пари у внутрішніх областях випалюваного тіла. Якщо об'єм тіла, що нагрівається, великий, а його газопроникність відносно мала (в наслідок тонкошарової будови сирцю), то тиск може настільки

підвищитися, що призведе до миттєвого руйнування всього виробу на окремі шматки. В інших випадках можуть відколюватися окремі частини виробу. Небезпека цього явища може лімітувати швидкість підвищення температури в початковій стадії випалювання приблизно до 473 - 573 K.

Механічні напруги, що виникають в тілі в наслідок його термічного розширення, безпосередньо залежать від швидкості збільшення температури. Перепад температур обумовлює стиснутий стан зовнішніх та розтягнутий - внутрішніх шарів тіла. Максимально допустимий перепад, при перевищенні якого в тілі з'являються тріщини, залежить від коефіцієнта розширення та модуля пружності. В процесі нагрівання величина припустимого перепаду змінюється разом із змінами вказаних фізичних характеристик.

Інтервал температур 573 - 873 K характеризується вигоранням органічних домішок, якщо вони вводилися в шихту та інтенсифікацією процесів масопередачі з виділенням CO<sub>2</sub> та SO<sub>2</sub>. Цей процес закінчується при 723 K з повільним збільшенням температури та при 973 - 1073 K, якщо підвищення температури здійснювався швидко. Найбільш складні фазові перетворення відбуваються у матеріалі починаючи з температури 823 K, що пов'язано з аморфізацією глинистої речовини. При температурі 846 K β-кварц переходить у α-кварц, що супроводжується збільшенням об'єму виробів на 2 - 8 %, швидке підвищення температури може привести до утворення тріщин в цеглі. Починаючи з 723 K, відбувається виділення хімічно зв'язаної води, що входить до складу глинистої речовини та інших мінералів, продовжується горіння органічних домішок. Основна маса дегідратованої води виділяється в інтервалі температур 773 - 873 K, причому велика шпаристість матеріалу сприяє безперешкодному виділенню води.

В інтервалі температур 773 - 1073 K відбувається дисоціація сульфідів і сульфатів з виділенням SO<sub>2</sub> та сільдериту FeCO<sub>3</sub> з виділенням SO<sub>2</sub>, а також починається дисоціація CaCO<sub>3</sub> та MgCO<sub>3</sub>, що підвищує шпаристість виробів. Цей період характеризується інтенсивною масовіддачею, початком дисоціації карбонатів та продовження окислення сульфідної сірки.

Виділення хімічно зв'язаної води та інших летючих продуктів, розкладання сировинних компонентів при відповідних температурах може викликати ті ж явища, що й швидке нагрівання недосушеного сирцю. Проте, дегідратація та інші аналогічні процеси, на відміну від процесу випаровування



механічно зв'язаної води, розтягнуті у великому температурному інтервалі, що не викликає небезпеки “вибухового” руйнування. Якщо ж при швидкому нагріванні процеси видалення фізично та хімічно зв'язаної води, а також вигорання залишків органічної речовини, не встигають закінчитися до того, як наступить інтенсивне спікання матеріалу, то виділення газоподібних речовин в системі закритих шпар призводить до його вспучування. Таким чином, хімічні процеси, пов'язані з газоутворенням, лімітують швидкість нагрівання в інтервалі температур безпосередньо перед інтенсивним спіканням кераміки.

Інтервал температур 1173 - 1273 K характеризується як період ізотермічної витримки. До його початку процес дегідратації глини практично завершується, проходить інтенсивне горіння органічних домішок, яке трохи зменшується в кінці, що пов'язано з дифузією кисню в активну зону. В цей період також йде дисоціація карбонатів і сульфатів та їх взаємодія з іншими компонентами шихти. Склоподібна фаза починає з'являтися при температурі 1143 K.

Випалена навіть при 1273 K глина має добрі поляризаційні властивості та первинну мікроскопічну будову. Тільки іноді зустрічаються окремі ділянки ізотропного скла; оксид заліза взаємодіє з глиноземом та кремнеземом з утворенням нових сполук, що надають випаленій масі бурий або червоний колір [1]. Подальше нагрівання матеріалу приводить до реакцій в твердих фазах. Підвищення температури збільшує швидкість реакції. Термодинамічні розрахунки та експериментальні дослідження показали, що при температурах вищих за 1073 K в продуктах випалювання будівельної кераміки можливо утворення двокальцієвого силікату, моноалюмінату кальцію та інших сполук [16].

При температурі 1273 K відбувається спікання матеріалу та надання йому потрібних фізико-хімічних властивостей. Процеси, які проходять при спікання керамічних мас характеризується невеликою масовіддачею за рахунок продовження процесів дисоціації, взаємодії карбонатів та сульфатів з компонентами шихти та детально розглянуті в роботах О.І.Августинника, О.С.Бережного, П.П.Буднікова, Я.Є.Гегузяна, А.М.Гінстлінга, В.Н.Єромекко, У.Д.Кенгелі, Г.В.Куколева та ін. [17-22].

На сучасному етапі науки процес спікання розуміють як перенос речовини, який спричинений зменшенням вільної поверхневої енергії частинок,

у результаті якого проходить ущільнення матеріалу, що випалюється. Розрізняють твердофазове та рідинне спікання. Для керамічних мас характерно спікання з участю рідкої фази.

Суть спікання керамічних матеріалів з присутністю рідкої фази полягає в утворенні евтектичного розплаву, кількість якого росте із збільшенням температури. Розплав розподіляється в матеріалі у вигляді плівки навколо тугоплавких компонентів. Утворення рідкої фази спричиняє розчин в ній деякої кількості твердої фази і кристалізацію новоутворень. Найбільш глибокі зміни проходять після утворення рідкої фази [23].

Для нормального спікання рідка фаза повинна утворюватися при високій температурі. Її передчасна поява затягує дефекти решітки зерна кристалічної фази, тим самим погіршує здатність рекристалізації і гальмує процес спікання [17, 24].

Спікання глин регулюється шляхом зміни температури випалювання та складу шихти з використанням глин різного мінерального складу [25]. Важливою характеристикою для мас, що спікаються, є інтервал часу спікання. Для забезпечення широкого інтервалу спікання та запобігання деформації виробів при високих температурах необхідно, щоб в матеріалі була мінімальна кількість залишкового скла (після кристалізації), яке характеризується великим інтервалом охолодження.

При спіканні всі механічні та теплофізичні характеристики матеріалу значно змінюються в залежності від температури та часу впливу. Практичний досвід вказує на необхідність сповільнення або навіть припинення збільшення температури перед початком спікання з тим, щоб заздалегідь вирівняти розподіл температур в тілі виробу та попередити різночасовий початок процесу усадки на його окремих ділянках.

Щоб уникнути виникнення тріщин та деформації (короблення) виробів, що спікаються, в процесі усадки застосовують, крім сповільненого підвищення температури, особливі типи садки виробів.

Завершальним етапом у процесі виробництва керамічних виробів є охолодження. Тривалість охолодження менша, ніж нагрівання. Керамічні вироби до температури 1073 - 973 K знаходяться в піропластичному стані і переходять у твердий стан, температуру знижують повільно. Подальше зниження температури до 823 - 923 K супроводжується перетворенням кварцу з

$\alpha$  у  $\beta$  стан, що супроводжується зменшенням об'єму виробів. Тому в цьому інтервалі температур охолодження необхідно уповільнити, щоб уникнути появи внутрішніх напруг і тріщин. Після 823 K швидкість охолодження може бути високою, оскільки ніяких фазових перетворень у матеріалі більше не відбувається.

Таким чином, весь цикл випалювання керамічних виробів складається з періодів нагрівання, витримування в області максимальних температур та охолодження.

У деяких випадках можна сильно варіювати співвідношенням температури та часу витримування при спіканні, отримуючи аналогічний результат. Через те, що для завершення спікання температура є більш дієвим фактором, ніж час витримування, зниження температури випалювання в припустимих межах вимагає значного подовження витримування, наприклад з 0,25 - 0,5 до 5 - 8 годин та більше. З техніко-економічної точки зору (витрата палива, продуктивність печей) більш доцільне коротке випалювання при високих температурах.

## 1.2. Опис тунельної печі та технологія випалювання цегли

Тунельні печі отримали широке розповсюдження в різних галузях промисловості. Головна перевага тунельних печей - неперервна робота, висока продуктивність, мала питома витрата палива на одиницю продукції, велика довговічність (тунельні печі працюють декілька років без капітального ремонту), можливість застосування технічних засобів механізації та автоматизації. Тунельні печі швидко витіснили маломеханізовані камерні, кільцеві та газокамерні печі.

Перші тунельні печі з'явилися в сорокових роках XIX століття, але практичного успіху не мали. У них був один загальний недолік - нижня частина перших пічних вагонів піддавалася впливу високих температур і руйнувалася [26]. Тривала та надійна робота тунельних печей почалася з будівництвом французької фірми Fougeron печей з пісочним затвором та топками, які розташовувалися в бокових стінах [27, 28].

Тунельна піч представляє собою неперервно діючий тепловий агрегат, де вироби переміщуються по довгому каналу назустріч димовим газам. Канал печі представляє собою прямий канал, у середині якого прокладена залізнична колія. Вагонетки з попередньо висушеними керамічними виробами поштовхуються одна за одною в піч по залізничній колії через певні проміжки часу. Штовхачі вагонеток бувають гідравлічними та механічними, а за принципом роботи - неперервно діючі (подавальники) та періодичної дії (штовхачі). Неперервне штовхання збільшує строк експлуатації вагонеток, поліпшує рівномірність режиму випалювання та якість виробів, зменшує витрату палива. Кожна вагонетка, пройшовши всю довжину тунелю, видається з іншого кінця печі при кожному поштовхуванні. Принципова схема роботи перших тунельних печей показана на рис. 1.1.

В тунельних печах протікають різноманітні технологічні процеси, тому всю довжину печі в залежності від режиму можна поділити на окремі зони: підігріву, випалювання та охолодження. Кожна зона має певну довжину, свої конструктивні особливості, свій технологічний режим.

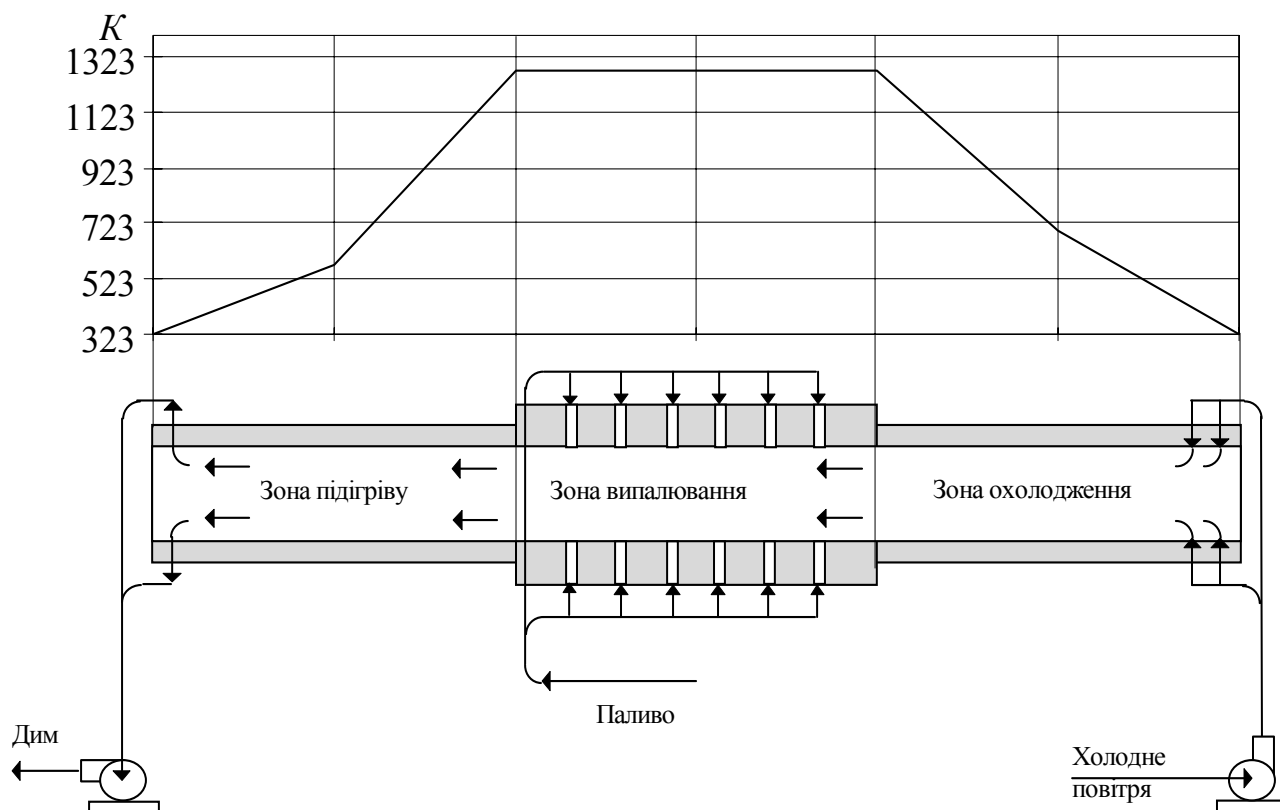


Рис.1.1. Принципова схема перших тунельних печей.

В печах, що працюють по схемі рис.1.1, все повітря подається в кінець тунелю (в зону охолодження). Рухаючись вздовж робочого каналу печі в зону підігріву повітря нагрівається за рахунок тепла виробів та надходить у зону випалювання, де його використовують для спалювання палива. Вироби переміщуються на вагонетках, прогріваються продуктами горіння палива в зоні підігріву, далі проходять через зону випалювання та надходять у зону охолодження. Таким чином, створюється безперервне переміщення вагонеток у печі, поступовий прогрів, випалювання та охолодження виробів.

Оскільки все повітря рухається із зони охолодження, проходить зону випалювання і надходить у зону підігріву, а для спалювання палива в зоні випалювання необхідно в декілька разів менше повітря ніж надходить, великий об'єм гарячого повітря викидається в атмосферу через димар печі. Щоб утилізувати теплоту гарячого повітря у сучасних тунельних печах частина повітря відбирається із печі на границі зон випалювання та охолодження для потреб виробництва, також застосовується рециркуляція димових газів у печі. [29, 30].

У даному підрозділі неможливо розглянути всі основні конструкції тунельних печей, оскільки тунельні печі застосовуються в різних галузях промисловості і для кожного конкретного випадку відповідними інститутами проектуються типові проекти печей із своїми конструктивними особливостями [31-37]. Зате технологічні потоки сучасних печей практично співпадають. Тому розглянемо технологію випалювання будівельної цегли в тунельній печі конструкції інституту Украгропроектстройіндустрія, де проводилася експериментальна частина дослідження даної роботи і перевірялася адекватність отриманих моделей. Принципова схема печі представлена на рис.1.2.

Продуктивність печі становить 13,5 млн. шт. умовної цегли на рік. Робочий канал печі в перерізі  $2,1 \times 2,4$  м довжиною 105,7 м вміщає 36 вагонеток. Умовно піч розділена на позиції (36 позицій). Зона підігріву з шлюзовою камерою довжиною 38,1 м вміщає 12 вагонеток (12 позицій). Довжини зон випалювання 33,6 м та охолодження 34 м (відповідно по 12 позицій). Для випалювання в печі використовуються вагонетки довжиною 2,8 м і шириною 2,5 м, які переміщуються за допомогою штовхача.

В залежності від форми та розмірів цегли, що випалюється, застосовують різні схеми завантаження вагонеток. Садка цегли-сирцю подається в зону підігріву по залізничній колії із сушарки на вагонетках. Довжина зони підігріву визначається графіком випалювання і умовно продовжується до перших пальників. Основне призначення зони підігріву - рівномірний прогрів садки виробів до температур відповідних графіку випалювання.

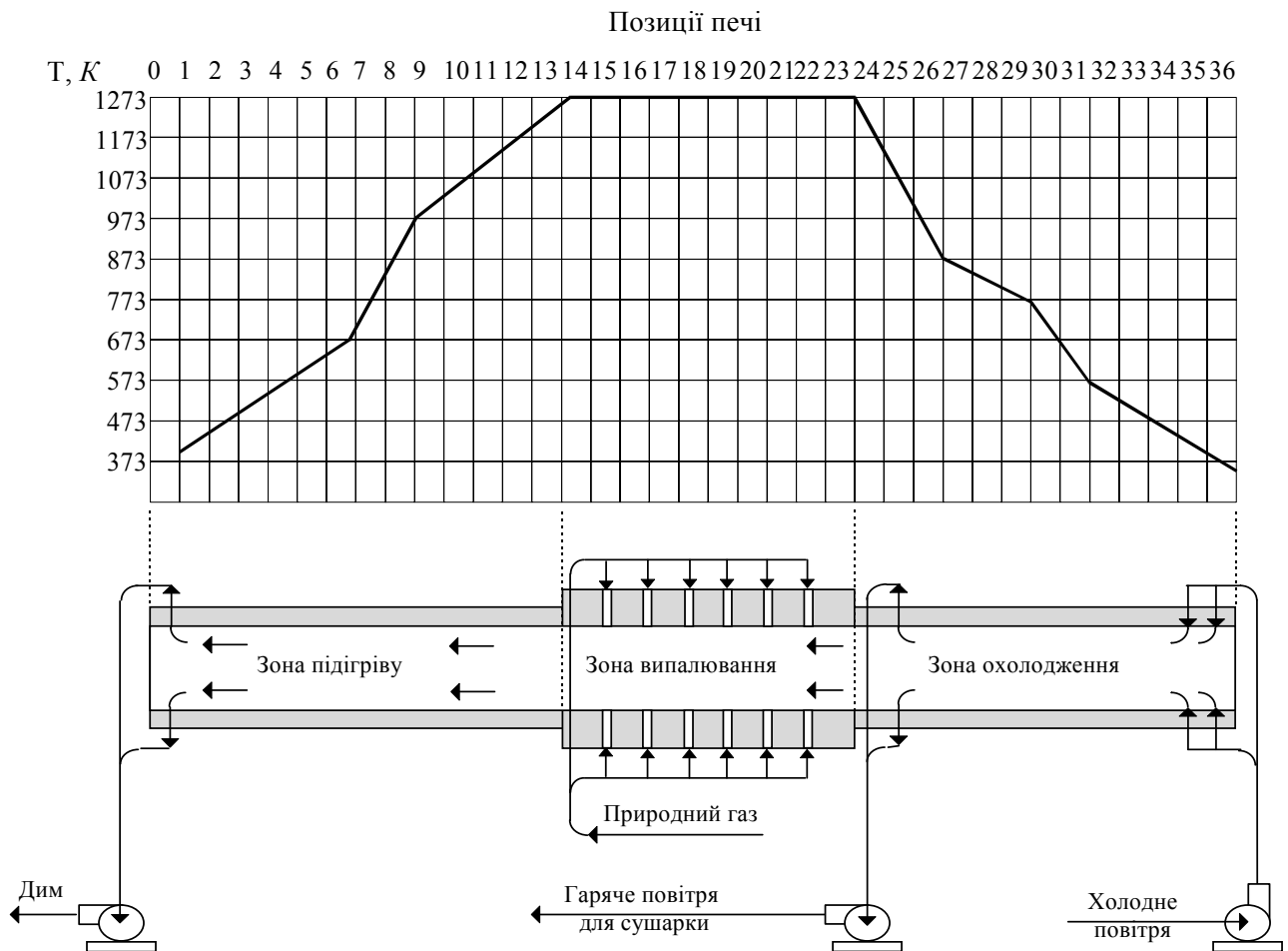


Рис.1.2. Принципова схема тунельної печі конструкції інституту Украгро-проектстройіндустрія.

При сушці сирцю волога, що міститься в ньому, практично ніколи цілком не видаляється, тому температуру на початку випалювання треба піднімати досить повільно і рівномірно ( $50 - 80 \text{ K/час}$ ), щоб забезпечити рівномірний відхід решток механічно зв'язаної вологи. Приблизно з  $723 - 773 \text{ K}$  починається дегідратація глини, тобто виділення із неї хімічно зв'язаної води, а потім вигорання органічних домішок і розклад карбонатів. Ці процеси супроводжуються значним виділенням газоподібних продуктів, проте швидкість підвищення температури може бути значною, шпаристість матеріалу сприяє безперешкодному виділенню вологи та  $\text{CO}_2$ .

У зону випалювання цегла надходить при температурі  $1173 \text{ K}$ , де нагрівається до  $1273 \text{ K}$ . Стадія випалювання вносить вирішальний вплив на якість цегли. У цій стадії утворюється рідка фаза як наслідок взаємодії легкоплавких домішок з основними компонентами глини. Рідка фаза заповнює

пори і стягує частинки основного матеріалу, викликаючи вогневу усадку виробів. В зоні випалювання завершуються неповоротні процеси перетворення глинистої речовини. Усі властивості цегли головним чином залежать від того, наскільки правильно проведено цей період випалювання.

У зоні випалювання підтримуються максимальні температури за допомогою спалювання природного газу на пальниках. Газ надходить на 6 пар пальників, які розташовані по всій довжині зони випалювання. Зона випалювання умовно поділяється на підзони. У кожній підзоні випалювання міститься пара пальників. Газ частково згорає в тунелі пальника, а частково в робочому каналі підзони випалювання. Для окислення палива використовують повітря, що надходить від двох джерел. Перше - холодне повітря, подають до пальників вентилятором. Друге - гаряче повітря, надходить в зону випалювання по робочому каналу печі із зони охолодження. В спалюванні палива приймає участь частина гарячого повітря, що відбирається із зони охолодження для сушарки і подається через отвори в склепінні зони випалювання. Димові гази із зони випалювання надходять в зону підігріву, звідки через вікна в стелі та стінах виводяться у загальний боров і викидаються в атмосферу.

Зона охолодження служить для охолодження цегли до 333 - 353 K перед видачою вагонеток з печі. У початкових позиціях зони охолодження зниження температури проводять поступово, щоб не виникали внутрішні напруги та тріщини в цеглі при переході виробів з пірокристалічного в твердий стан (1073 - 973 K) та при переході кварцу з  $\alpha$  в  $\beta$  стан (923 - 823 K). На кінцевих позиціях цеглу можна охолоджувати швидко. Повітря для охолодження виробів подають вентиляторами в кінцеву частину печі з верха і боків через декілька каналів. Надлишкове гаряче повітря відбирається на границі зон випалювання і охолодження печі та використовується для висушування виробів у сушарках.

Простір під вагонетками (підподовий простір) ізольований від робочого каналу печі пісчаними затворами. Для поповнення затворів піском використовують спеціальні отвори в кладці печі. Щілини між вагонетками ущільнюють глиняним шнуром. Для охолодження вагонеток, що знаходяться в зоні випалювання, і спостереження за ними у печі передбачений оглядовий канал (контрольний коридор) шириною 1,25 м, висотою 1,8 м і довжиною 19 м.



Коротка технічна характеристика тунельної печі конструкції інституту Укראгропроектстройіндустрія наведена в табл.1.2

З розвитком пічної теплотехніки вдосконалюються теплообмінні процеси, що протікають в тунельних печах. Існують конструкції тунельних печей, в яких паливо у робочій частині печі спалюється на довгофакельних швидкісних пальниках, які розташовані тангенціально відносно садки та здійснюють закрутку газоповітряного потоку за рахунок високої кінетичної енергії реактивного струменя, що покращує теплообмін між виробами та теплоносієм. Ефект високих швидкостей обтікання у вихровому потоці всередині садки підтримується відбором продуктів спалювання з-під пічних вагонеток [38].

Є досвід впровадження розбірної конструкції тунельної печі [39]. Піч збирається з окремо виготовлених блоків, але на відміну від традиційних печей, не має “намертво” скріплених швів між блоками, тобто при переході на виготовлення інших видів виробів, можна за порівняно короткий термін (монтаж печі займає в середньому 1,5 - 2 доби) змінювати кількість блоків в конструкції. Для зручності ці блоки встановлені на колеса. Така конструкція, порівняно з традиційною “цільною” є більш економічною і може гнучко змінювати номенклатуру своїх виробів.

Таблиця 1.2. Коротка технічна характеристика тунельної печі конструкції інституту Укראгропроектстройіндустрія.

№	Найменування	Розмірність	Величина
1	Продуктивність	млн.шт./рік	~13,5
2	Розміри робочого каналу		
	довжина	м	105,7
	ширина	м	2,4
3	Розміри вагонетки		
	довжина	м	2,8
	ширина	м	2,5
4	Середня вага виробів на одні вагонетці	т	10,2 - 11,2
5	Кількість вагонеток	шт.	36
6	Час перебування вагонетки в печі	год.	36

7	Витрата природного газу	м <sup>3</sup> /год	~750
8	Температура випалювання	<i>K</i>	1273
9	Температура димових газів, які викидаються в атмосферу	<i>K</i>	453
10	Температура повітря, яке нагрівається в зоні охолодження	<i>K</i>	1073
11	Розрідження на початку зони підігріву	Па	380 - 450
12	Тиск вкінці зони охолодження	Па	100 - 150

### 1.3. Стан автоматизації тунельних печей

На Україні та за її межами накопичений великий досвід в області автоматизації тунельних печей. В роботах з автоматизації тунельних печей використовуються контури керування, які запозичені із систем керування інших галузей промисловості. Проте, процес випалювання в тунельних печей має свої особливості, що враховується в системах керування.

Теплову обробку керамічних виробів в тунельних печей проводять за заданим технологічним режимом (крива випалювання, рис.1.2), порушення якого призводить до браку виробів. Для попередження відхилень від встановлених режимів тунельних печей необхідний постійний контроль параметрів за допомогою технічних засобів автоматизації.

Одна із основних умов нормального випалювання керамічних матеріалів та виробів - підтримка встановлених температур у тунельній печі. Ця умова загальна для різних конструкцій печей [40]. На підставі практичної роботи тунельних печей встановлені технологічні режими, до яких існують чіткі вимоги. Так наприклад, в зоні випалювання температура теплоносія повинна підтримуватися з точністю  $\pm 10\text{ K}$ .

Отже, температура - найбільш важливий параметр печі, що контролюється. Для тунельних печей в найбільш відповідальних точках робочого простору підтримуються постійні температури. Температура в печі змінюється з ряду причин, наприклад, в результаті зміни режиму навантаження печі, зміни витрати палива та умов його горіння, аеродинамічного режиму печі і т.д. Всі збурення призводять до порушення режиму випалювання і, як наслідок, виходу продукції низької якості або браку. Підтримка температур по довжині печі нерозривно пов'язана з регулюванням інших параметрів печі.

Для безперервно діючих тунельних печей завантаження та розвантаження вагонеток з керамічними виробами автоматизоване. Для цього використовуються автомати-укладальники, наприклад автомат-укладальник М200 [41]. Впровадження цього автомату дозволяє автоматизувати завантаження і розвантаження на пічні вагонетки та вивільнити від тяжкої ручної праці вісім робітників, що покращує умови праці. Завантаження та розвантаження виробів безпосередньо пов'язане з швидкістю руху вагонеток в тунелі печі. Порушення цього параметру призводить до різкої зміни роботи

всієї печі [42]. Необхідно стабілізувати встановлену швидкість руху вагонеток, тобто підтримувати оптимальну продуктивність печі.

Для більшості конструкцій тунельних печей садка виробів на вагонетках переміщується періодично, через визначені інтервали часу за допомогою механічного (гвинтового, тросового) або гідравлічного штовхача. Звідси впливає необхідність контролю часу проштовхування та інтервалів між проштовхуваннями. Це питання вирішене за допомогою чутливих елементів на вході та виході печі [43], які безпосередньо зв'язані з блоком сигналізації неполадок. Деякі заводи здійснили програмне керування режимом штовхання, де керують приводом маслonaсосу і золотника гідравлічного штовхача [44]. Ця система дозволяє здійснити більш стабільний тепловий режим, нормує час випалювання та економить паливо.

Були також намагання зв'язати рівень теплової обробки виробів у печі з терміном проштовхування вагонеток. Запропонований спосіб автоматичного проштовхування [45] полягає в зміні часу між штовханням вагонеток у залежності від температури в декількох точках зони випалювання. Для того, щоб температура теплоносія характеризувала зону випалювання, термопари на трьох позиціях з'єднуються послідовно. Сумарний сигнал від термопар передається на спеціальний перетворювач часу, який регулює час перебування вагонеток у печі за визначеної температури. Тобто схема передбачає автоматичне проштовхування вагонеток в залежності від добутку температури у зоні випалювання та терміну знаходження виробів у цій зоні. Таке керування дозволяє економити паливо для випалювання і підвищує продуктивність тунельної печі. До недоліків цього способу регулювання відноситься можливість його використання тільки за умови постійної кількості виробів, що подаються до печі.

Рух вагонеток з виробами в тунельній печі передбачає автоматизацію шлюзових камер подавання та вивантаження виробів, а саме стабілізацію тиску в камерах для покращення аеродинамічного режиму печі. Система керування тунельною піччю з компенсацією коливання тиску в шлюзових камерах представлена на рис.1.3 [46].

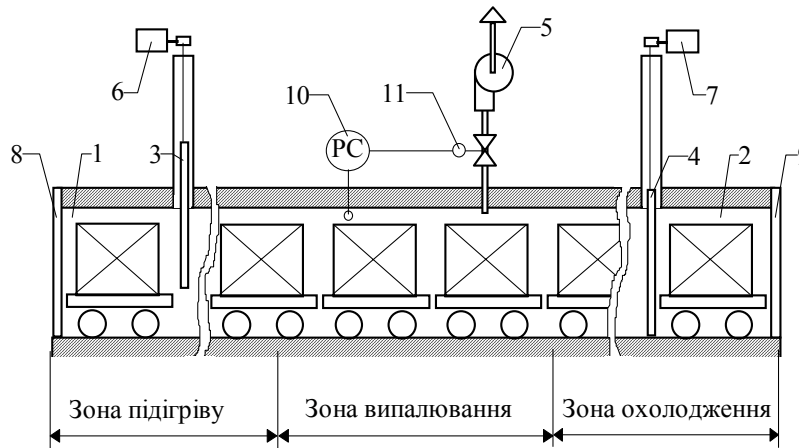


Рис.1.3. Система керування компенсацією тиску в шлюзових камерах

печі. На кінцях печі сформовані шлюзові камери 1, 2, з внутрішніми 3, 4 та зовнішніми 8, 9 дверцятами. Піч з'єднана з вентилятором 5 для регулювання тиску в печі. Дверцята 3, 4 з'єднані з регулюючим приводом 6, 7. Якщо зовнішні дверцята 8, 9 закриті, відбувається регулювання ступеня відкриття дверцят 3, 4 з стабілізацією рівності тисків в шлюзових камерах 1, 2. Тиск в тунелі печі регулюється контуром 10 - 11. Регулювання тиску в шлюзових камерах дозволяє підтримувати стабільний аеродинамічний режим печі, зменшити підсос холодного повітря через входні та вихідні дверцята печі.

Контроль та регулювання температур у печі нерозривно пов'язаний з контролем витрати палива. Тепловий режим роботи тунельних печей визначається витратою повітря та природного газу на пальниках. Для збільшення температури в печі потрібно збільшити витрату палива на пальниках і навпаки для зменшення температури - зменшити витрату палива зміною положення регулюючого органу (РО) на газопроводі.

Частіше за все, на заводах намагаються здійснювати регулювання максимальної температури [47] в зоні випалювання, враховуючи розташування пальників рис.1.4.

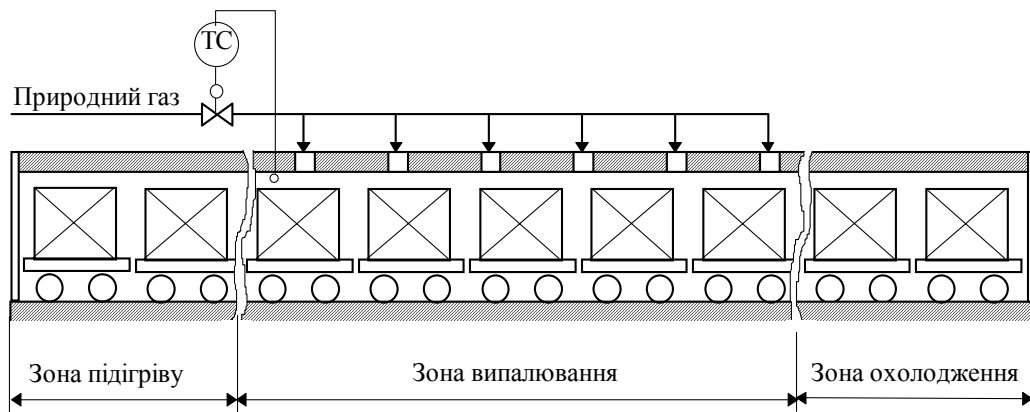


Рис.1.4. Система керування температурою в зоні випалювання.

Проте, проектування системи регулювання температурного режиму за одною точкою контролю температури із впливом на загальну витрату палива для випалювання не забезпечує стабілізації заданого режиму в печі. Для підтримки температурної кривої печі необхідно регулювати витрату палива на кожному пальнику окремо або, як мінімум, на групі пальників.

Такий спосіб керування температурним режимом зони випалювання розглянутий у [47]. Завдання даної системи керування - зниження енергозатрат та покращення якості виробів. Для досягнення даної мети змінюють витрату палива на окремих групах пальників в залежності від розподілення температури в зоні випалювання. Описана система регулювання дозволяє точно підтримувати температурний режим зони випалювання печі. Її вдосконалення запропоновано у [48] рис.1.5. Система містить вимірювачі 1 - 3; клапани 4 - 6; регулятори витрати палива 7-9; блок уставок регуляторів 10; блок керування штовхачем 11; поширювач імпульсів 12; блок порівняння 13; блок завдання часу штовхання 14. Як і попередня система керування, дана

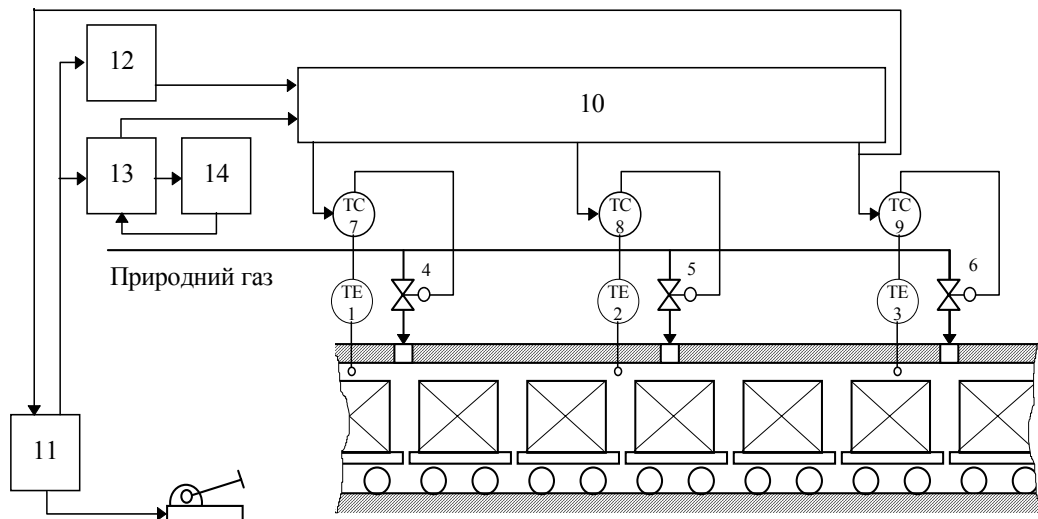


Рис.1.5. Система керування температурою в зоні випалювання.

система дозволяє точно підтримувати температурний режим зони випалювання за допомогою розподіленої подачі палива. До переваг розглянутої системи керування слід віднести залежність теплової обробки виробів від інтервалу штовхання вагонеток.

Слід відмітити, що одною із основних причин зниження показників роботи тунельних печей є наявність великих температурних перепадів по висоті печі (до 250 K) [49]. За умови відсутності температурних перепадів в печах по висоті садки, час випалювання виробів можна зменшити. Одним із ефективних способів зменшення температурних перепадів по висоті робочого каналу в зоні випалювання печі є організація нижнього прогріву садки з виробами на рівні вагонеточних платформ з використанням довгофакельних швидкісних пальників, які розташовані тангенціально відносно садки та здійснюють закрутку газоповітряного потоку за рахунок високої кінетичної енергії реактивного струменя [50]. Така система керування дозволяє досить точно підтримувати температурний режим не тільки вздовж зони випалювання, але й по її висоті.

Для вимірювання температури в зоні випалювання частіше за все використовують платина-платинородієві термометри. Методи та пристрої вимірювання температури теплоносія в тунелі печі мають вирішальне значення для контролю кривої випалювання, їм присвячено багато публікацій, зокрема [51-53].

Розроблені методи і схеми контролю температури, які дають можливість контролювати температуру у точках печі із наявністю розривів у лініях контролю. На рис.1.6 представлена така схема контролю температури теплоносія.

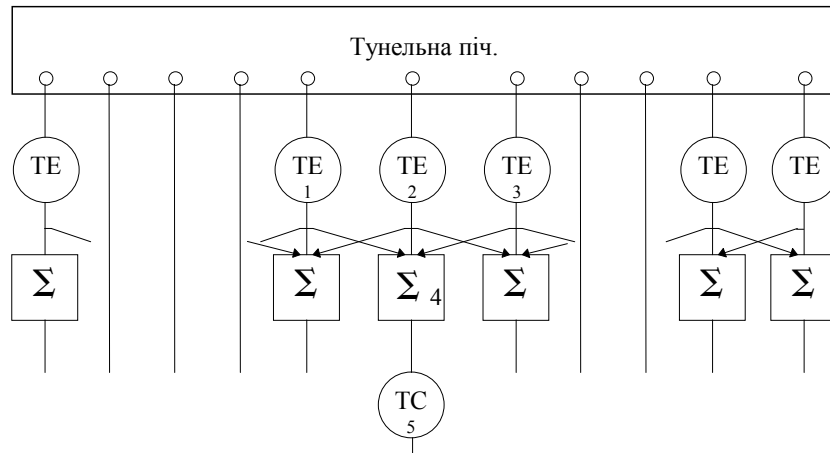


Рис.1.6. Схема контролю температури теплоносія тунельної печі.

За рахунок додаткового контролю сигналів термопар 1, 3, якщо розірвана лінія контролю термодари 2 на регулятор витрати палива 5 подається сигнал з компенсуючого суматора 4, який зменшує витрату палива до наперед безпечного рівня, попереджуючи вихід пальника з ладу із-за перегрівання.

Тепловий режим тунельних печей визначається витратою палива і повітря на пальниках та інтенсивністю перемішування природного газу з повітрям на виході сопла пальника. Тому, потрібно проводити контроль та регулювання витрати палива та повітря на кожному пальникові печі. Витрату природного газу, що йде на спалювання доцільно контролювати при сталому тиску газу в трубопроводі, оскільки при одному і тому положенні РО на газопроводі витрата газу буде змінюватися із зміною тиску. Щоб усунути небажану зміну витрати газу до печі за рахунок зміни тиску в газопроводі, його стабілізують.

Співвідношення між витратами палива і повітря для спалювання важливий параметр, що характеризує повноту згорання палива. Кількість повітря залежить від витрати палива. Для повного спалювання палива і одержання необхідної температури горіння слід підтримувати постійний надлишок повітря, вибір якого обумовлюється ефективністю спалювання палива в конкретній тунельній печі. В тунельних печах для контролю витрати палива і повітря для спалювання широке розповсюдження отримало встановлення на трубопроводах вимірювальних діафрагм [54-56]. Системи



керування для регулювання співвідношення витрат паливо - повітря для спалювання розглядаються в [57, 58] і забезпечують підтримку необхідної витрати повітря для повного спалювання палива. Проте таке регулювання витрати повітря не забезпечує постійних умов спалювання палива, тому що коефіцієнт надлишку повітря змінюється в залежності від складу та теплотдатності палива.

Отже, для ефективного спалювання палива бажано здійснювати допоміжний контроль димових газів, наприклад за аналізом  $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$  та  $\text{O}_2$ . У публікаціях [59-61] розглядаються системи автоматичного регулювання співвідношення повітря - природний газ на пальниках за складом продуктів спалювання з врахуванням температури первинного та вторинного повітря, а також умов їх перемішування. Регулювати процес горіння палива на пальниках за складом продуктів спалювання можливо за наявності швидкодіючих та надійних газоаналізаторів [62].

Автоматизація процесу спалювання палива в тунельній печі передбачає програмне керування відсіканням газу [63] під час аварійного режиму, блокування дверей та штовхача печі.

Регулювання температури в тунельній печі шляхом зміни витрати природного газу пов'язано із зміною об'єму димових газів, що викликає зміну аеродинамічного опору в тунелі печі при русі димових газів. Тобто, необхідно регулювати розрідження або зменшувати пропускну здатність димоходів. Це досягається підтримкою постійного тиску в робочій частині печі зміною положення регулюючого шиберу перед димососом або димовою трубою.

Отже, аеродинамічний режим - наступна характеристика печі, яка повинна стабілізуватися. Розрідження тиску в зоні нагрівання контролюється за допомогою колокольного дифманометра, сигнал з якого подається на регулятор, який керує поворотною заслонкою, що розташована на трубопроводі видалення димових газів [64]. Аналогічна схема регулювання перепаду тиску в зоні охолодження. Виконуючий механізм, в цьому випадку, діє на поворотну заслонку трубопроводу видалення гарячого повітря, який розташований на стику зон випалювання та охолодження. Недоліком цієї системи регулювання є неможливість коригування витяжної сили димових газів в залежності від витрати природного газу. На рис.1.7 представлена система керування тиску в зоні підігріву, яка дозволяє враховувати витрату

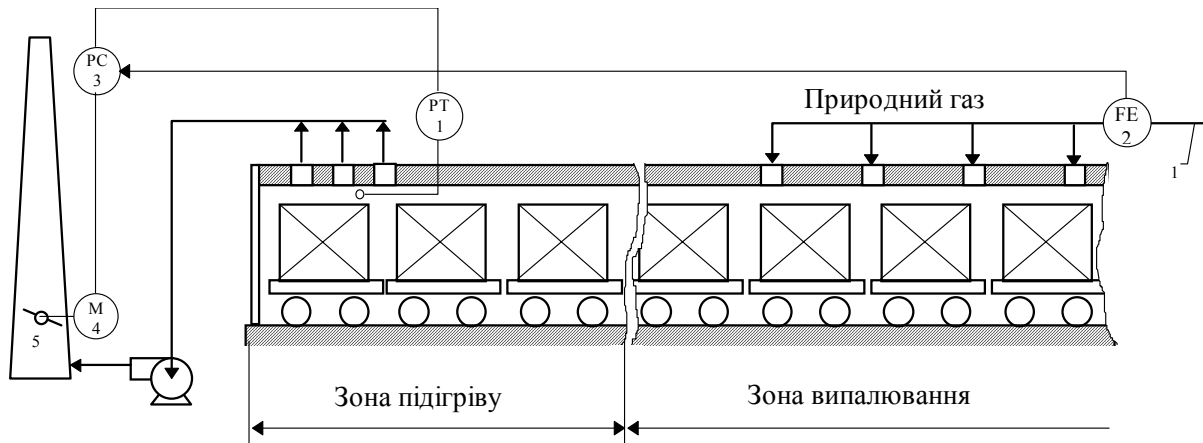


Рис.1.7. Система стабілізації аеродинамічного режиму печі.

палива [65]. На трубопроводі природного газу 1 встановлена діафрагма 2 для контролю витрати палива. За витратою природного газу визначається кількість  $Q$  продуктів спалювання та розраховується значення завдання тиску для регулятора 3 за формулою:

$$P = P_0 \left( \frac{Q}{Q_0} \right),$$

де  $Q_0$  - номінальна витрата природного газу,

$P_0$  - номінальний тиск (визначається за  $Q_0$ ).

Регулятор 3 керує поворотною заслінкою 5 за допомогою електромашинного виконуючого механізму 4, стабілізуючи тиск в зоні нагрівання.

Однією з причин виникнення температурних перепадів по висоті тунелю печі є підсос холодного повітря з нещільностей стиків вагонеток та пісочного затвору, в результаті чого знижується температура теплоносія та збільшується опір на шляху його руху. Для зменшення підсосів повітря з навколишнього середовища та збільшення температури в тунелі печі, необхідно зменшити перепад тиску між пічним каналом та підвагонеточним простором. Тобто, разом з регулюванням тиску в пічному каналі печі, необхідно регулювати тиск в підвагонеточному просторі таким чином, щоб перепад тиску між тунелем і підвагонеточним простором були близькі до нуля. Перепад тиску вимірюється колокольним дифманометром. Регулятор впливає на подавання повітря в підвагонеточний простір або на видалення повітря з пічного каналу.

У [66] запропонований оригінальний спосіб регулювання тиску підвагонеточного простору тунельної печі, яка має вхідний шлюз і обладнана щільними вхідними дверцятами рис.1.8. Спосіб відрізняється тим, що для

вирівнювання тиску між тунелем і підпічним коридором використовуються внутрішні дверцята 1, які можна опускати до верхньої платформи вагонеток із створенням зазору для надходження повітря. Величина зазору змінюється електричним приводом 3 за сигналом регулятора 3. Перепад тиску між підпічним та тунельним коридором контролюється манометрами 4, 5. Тиск у підпічному коридорі збільшується шляхом підймання дверцят 1 та, навпаки, зменшується, якщо зменшувати зазор між дверцятами та платформою вагонетки.

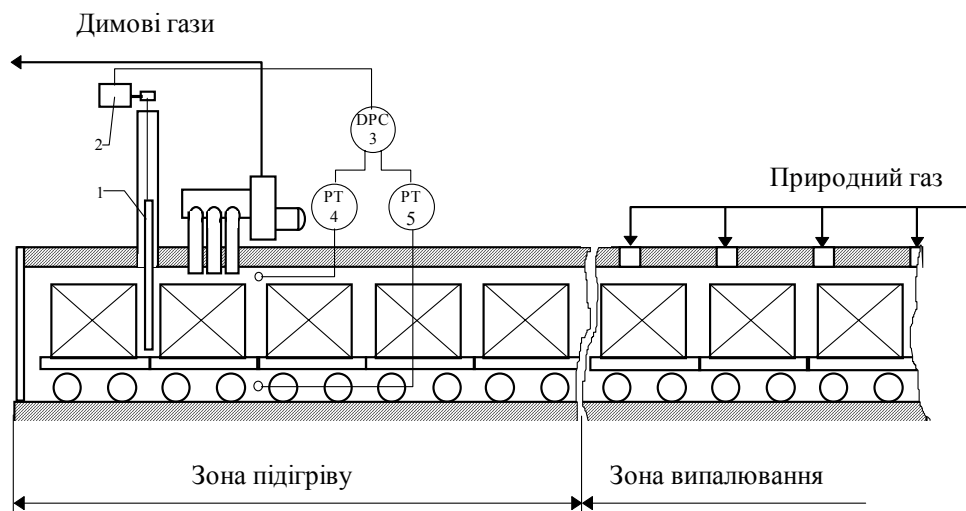


Рис.1.8. Система регулювання тиску в підпічному коридорі.

Таким чином, контроль та регулювання температури теплоносія в тунельній печі нерозривно пов'язаний з контролем і регулюванням багатьох інших параметрів, що характеризують тепловий режим печі в цілому. В сучасних тунельних печах заданий режим випалювання забезпечується мікропроцесорними контролерами, що дозволило виключити вплив людського фактору на процес випалювання [67], точно слідкувати за температурним режимом печі. У [68] розглянута КСК тепловим режимом випалювання на базі мікропроцесорних контролерів. Мікропроцесорна система складається з термопарних перетворювачів, що перетворюють термоЕРС в стандартний струмовий сигнал 4-20 мА з лінійною залежністю та забезпеченням гальванічної розв'язки, мікропроцесорного контролера, який збирає інформацію про температуру з термопарних перетворювачів, проводить її обробку і керує клапанами витрати палива, та операторської ЕОМ типу АТ-286, що відображає в зручній для оператора формі інформацію про стан печі.

Система збирає інформацію про температуру в 48 точках, відображає на екрані мнемосхему печі з індикацією значень температури в контрольних точках, причому залежність температури від завдання виділяється кольором, що дозволяє оператору швидко оцінювати стан та приймати рішення. Крім того, інформація про температуру може бути виведена в табличній формі та у вигляді графіків.

Система періодично записує інформацію про тепловий режим на диск операторської ЕОМ, за якою можна проаналізувати режими печі за певний проміжок часу та порівняти їх. Формат запису технологічних параметрів дає можливість легко передавати їх в будь-який пакет обробки інформації.

Проведений аналіз систем керування підтверджує, що в них передбачено багато методів контролю та регулювання режиму випалювання.

Не дивлячись на можливість використання великої кількості регулюючих впливів, тунельна піч не дозволяє в повній мірі використовувати переваги автоматики. В огляді стану автоматизації показано, що у кращому випадку системи автоматичного керування можуть забезпечити підтримку заданого режиму температур та розрідження по довжині печі. Ці системи не можуть компенсувати збурення, пов'язані з порушенням схеми садки, відхиленнями у приготуванні шихти для виробів та іншими факторами, що вимагають перенастроювання режиму випалювання.

Отже, випалювання в тунельних печах проводиться без контролю стану виробів під час їх руху в печі. Правда, існують спроби контролювати температуру поверхні керамічних виробів за допомогою термопари-щупа [69]. Але температура виробів контролюється з помилкою із-за зазору між гарячим спаєм термопари та садкою виробів. Зазор виникає внаслідок неоднорідного формування садок. Також використовують радіаційні пірометри з візуванням на садку виробів, в яких відсутній попередній недолік, але монтування автоматичних пірометрів на кожній позиції тунельної печі дорого коштує і не забезпечує достатньої точності в автоматичному режимі. До недоліків розглянутих методів контролю слід віднести неможливість визначати температурне розподілення всієї садки.

Таким чином, тунельна піч, з точки зору керування, є досить складним об'єктом. Взагалі, не важко здійснити контроль та керування температурою газового простору вздовж тунелю, витратою палива та повітря, стабілізувати

аеродинамічний режим теплоносія печі, але неможливо проводити пряме вимірювання властивостей виробів в процесі випалювання, враховуючи їх переміщення та високотемперний теплообмін у зоні випалювання. З точки зору контролю якості продукції, також неможливо компенсувати збурення, що пов'язані з порушеннями форми садки.

Процес випалювання керамічних виробів в тунельній печі являє собою технологічний процес великої потужності зі складним комплексом матеріальних та енергетичних потоків та з жорсткими вимогами до якості готової продукції, до безпеки персоналу, до зберігання обладнання та до впливу на навколишнє середовище.

Найважливішою ціллю керування є отримання якісної продукції за мінімальної витрати палива [70, 71]. Ця проблема особливо актуальна в наш час, коли не всі підприємства можуть вчасно розрахуватися за електро- та теплоносії, а досить велика конкуренція на ринку керамічних будівельних матеріалів змушує підвищувати якість продукції, збільшувати асортимент та переглядати існуючі технології, системи контролю та керування.

Однією із особливостей тунельної печі є її велика інерційність, тобто при зміні температури газового середовища температура цегли зміниться через досить великий проміжок часу. З огляду на це доцільно розробляти систему керування, яка за вибраними контрольними параметрами формувала температурний режим для тунельної печі і змінювала уставки регуляторам. Узагальненим параметром, що характеризує термомеханічні характеристики керамічних виробів на певному етапі випалювання є температура виробів, що випалюються [7, 70, 72, 73]. Саме цей параметр повинен бути закладений в основу системи керування процесом випалювання в тунельній печі.

## 1.4 Постановка завдання автоматизації

В результаті розгляду особливостей процесу випалювання кераміки у тунельних печах, вивчення сучасного рівня їх автоматизації, можна зробити такі висновки:

- технологічні процеси, що протікають в тунельній печі, є складними та енергоємними, а система керування піччю багатопараметричною;
- тунельні печі застосовують близько ста років, і питання їх автоматизації не раз ставали перед спеціалістами, але найпоширенішими досі є системи керування компенсації відхилення того чи іншого параметра від заданого технологією без врахування змін властивостей вхідних матеріальних потоків;
- системи керування процесом випалювання кераміки не використовують температуру виробів, що призводить до звужування класу задач, що можна вирішити на сучасній комп'ютерній базі;
- якісні показники готового продукту, в тому числі межі міцності при стисканні та вигині, визначаються у виробничих умовах лабораторним способом; це визначення проводиться в кожній партії готових виробів, але результати аналізів практично не використовують для керування в реальному часі.

Фактично, тунельна піч є конструктивним об'єднанням в один агрегат декількох технологічних об'єктів, в кожному із яких протікають різні процеси. Одночасне протікання в печі різних процесів (спалювання палива, транспортування керамічних виробів вздовж печі, фізико-хімічні зміни в матеріалі за рахунок тепломасообміну між газовим середовищем і матеріалом) потребують забезпечення кожному з них відповідних умов для їх нормального протікання в часі і просторі. Будь-яка зміна одного з цих процесів (подача палива; швидкість руху, кількість виробів, що випалюється і т.д.), що направлена на усунення порушення на певній ділянці печі, викликає порушення на інших ділянках. Необхідно створити таку систему керування, яка підтримувала задані температурні параметри виробів в зоні, яка найбільше впливає на кінцеву якість виробів і в той же час вносить незначні збурення для інших зон.

З точки зору керування великий інтерес представляє зона випалювання тунельної печі, в технологічний режим якої можна оперативно втручатися за допомогою зміни витрати пального. Саме у цій зоні формується кінцева мікроструктура керамічного матеріалу. Дефекти, що виникають у виробі під час випалювання, неможливо виправити після випалювання.

Тому, враховуючи сучасний стан питань в області керування процесом випалювання кераміки, рівень технічної бази автоматизації тунельних печей, для підвищення якості будівельної цегли та зменшення собівартості продукції задачу роботи можна сформулювати таким чином: розробити комп'ютерну систему керування процесом випалювання будівельної цегли в тунельній печі, яка формує оптимальний температурний режим теплоносія в зоні випалювання печі за температурним станом цегли, що випалюється. Досягнення поставленої задачі передбачає її декомпозицію та вирішення наступних підзадач:

- розробити алгоритм, який дозволяє визначати температурні параметри виробів за параметрами тунельної печі, що контролюються;
- розробити математичну модель процесу випалювання у тунельній печі та дослідити вплив основних факторів на процес випалювання;
- розробити систему керування температурним режимом зони випалювання, що формує оптимальний температурний режим теплоносія за температурним станом цегляних виробів, та алгоритмічне забезпечення для КСК.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Ралко А.В., Крупа А.А., Племянников Н.Н., Алексеенко Н.В.* Тепловые процессы в технологии силикатов. -К.: Вища шк., 1986. -232с.
2. *Крупа А.А.* Химическая технология керамических материалов. -К.: Вища шк., 1990. -399с.
3. *Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П.* Термодинамика силикатов. -М.: Госстройиздат, 1972. 266с.
4. *Полонский Ф.М.* Применение теории Онзагера к исследованию переноса тепла и вещества в пористых телах // Инж.-физ. журнал. -1958. № 4. с 87-89.
5. *Хаазе В.* Термодинамика необратимых процессов. - М.: Мир, 1967. -544с.
6. *Никитенко Н.И.* Теория тепломассопереноса. - К.: Наукова думка, 1983. - 350с.
7. *Ралко А.В., Городов В.С., Зинько Ю.Д., Кравцов И.А.* Термодинамические и термографические исследования процессов обжига керамики. -К.: Вища шк., 1980. -184с.
8. *Лыков А.В.* Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. -472с.
9. *Лыков А.В.* Явления переноса в капиллярно-пористых телах. -М.: Гостехиздат, 1954. -296с.
10. *Лыков А.В.* Тепло- и массообмен в процессе сушки. - М.: Гостехиздат, 1954. -464с.
11. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. - М.: Вища шк., 1967. -599с.
12. *Лыков А.В., Михайлов Ю.А.* Теория тепло- и массопереноса. -М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. -535с.
13. *Ралко А.В.* Экспериментальные и аналитические методы исследования кинетики обжига глин. Автореферат диссертации доктора технических наук -Киев: 1961. -32с.
14. *Ралко А.В.* Экспериментальное исследование нестационарного тепло- и массообмена при фазовых и химических превращениях // Тепло - и массообмен в процессах испарения. -М.: Изд-во АН СССР, 1958. с.57-86.
15. *Ралко А.В.* Исследование тепло- и массообмена глин в процессе их обжига // Современные методы исследования силикатов и строительных материалов. - М.: 1960, с.197-209.
16. *Будников П.П. и др.* Химическая технология керамики и огнеупоров. -М.: Стройиздат, 1972. -551с.



17. *Куколев Г.В.* Химия керамики и физическая химия силикатов. -М.: Вища шк., 1966. -463с.
18. *Августинник А.И.* Керамика. -Л.: Стройиздат, 1975. -591с.
19. *Кингерл У.Д.* Введение в керамику. -М.: Стройиздат, 1967. -499с.
20. *Гегузин Я.Е.* Физика спекания. -М.: Наука, 1984. -312с.
21. *Балкевич В.А.* Техническая керамика. -М.: Стройиздат, 1968. -200с.
22. *Будников П.П., Балкевич В.А., Бережной А.С., Булавн И.А., Куколев Г.В. и др.* Химическая технология керамики и огнеупоров. -М.: Стройиздат, 1972. -552с.
23. *Будников П.П., Блютен Л.М.* К вопросу о физико-химической природе спекания керамических материалов // Стройматериалы, 1949. -сб.2. с.73-86с.
24. *Куколев Г.В., Долгина Н.З* Процессы спекания и пути улучшения качества металлургического доломита // Огнеупоры, 1950. с.536-544.
25. *Павлов В.Ф.* Влияние щелочных и щелочноземельных окислов и их смесей на изменение вязкости керамических масс при обжиге // В тр. НИИ стройкерамики. Изд. литературы по строительству, М.: 1962. -Вып.І. с.20-22.
26. *Линищ Л.Л.* Туннельные печи для обжига огнеупорных изделий, фарфора и динаса. -М.: Макиз, 1926. -320с.
27. *Булавин И.А.* Теплотехника в тонкой керамике. -М.: Госстройиздат, 1938. -223с.
28. *Полубояринов Д.Н., Балкевич В.Л. и др.* Справочник по производству строительной керамики. -М.: Гизместпром, 1961. т.ІІ. -640с.
29. *Перегудов В.В., Роговой М.И.* Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей. -М.: Стройиздат, 1983. -260с.
30. *Попов Л.Н.* Общая технология строительных материалов. -М.: Висща шк., 1989. -204с.
31. *Гизбург Д. Б.* Печи и сушила силикатной промышленности. -М.: Промстройиздат, 1963. -305с.
32. *Гинзбург Д.Б., Баренбойм А.М., Галиева Т.М.* Тепловые расчеты печей и сушилок. -М.: Стройиздат, 1964. -496с.
33. *Мамыкин П.С., Левченко П.В., Стрелов К.К.* Печи и сушила огнеупорных заводов. Северодонецк: Металургиздат, 1963. -469с.

34. *Вознесенский А. А.* Тепловые установки в производстве строительных материалов и изделий. -М.: Госстройиздат, 1964. -230с.
35. *Бфренбойм А.М., Галиева Т.М.* Тепловые расчеты печей и сушилок силикатной промышленности. М.: Стройиздат, 1964. -496с.
36. *Линчевский В. П.* Нагревательные печи. -М.: Metallurgizdat, 1948. -302с.
37. *Гурвич Р.М., Наумов М.М.* Механизация производства кирпича. -М.: Стройиздат, 1970. -223с.
38. Автоматический контроль режима печи обжига на линии термически полированного стекла // *Стекло и керамика*, 1997. №7, с.3-4.
39. Chiang Yet Ming, Birnie Dunbar P., Kingery W. David. Physical Ceramics. Principles for Ceramic and Engineering. - UK: John Wiley & Sons, 1996.
40. *Лощинская А.В., Рысс С.М., Львович И.В.* Автоматическое регулирование процессов обжига и сушки в промышленности строительных материалов. - Л.: Стройиздат, 1969. -200с.
41. *Колонцов В.А., Черетисинев А.Д.* Садочный автомат-укладчик М200 // *Огнеупоры*. 1992. №11-12, с.32.
42. Сравнительный анализ удельных затрат топлива в туннельных печах для обжига алюмосиликатных и кремнеземистых материалов. // *Огнеупоры* 1993. № 10, с.22-25.
43. Патент ФРГ. Заявка 811228 // *Изобретения стран мира*. Выпуск 102. МКИ F27. 1989. № 10, с.8.
44. *Ефлеев О.А.* Автоматический регулятор времени толкания вагонеток в туннельную печь // *Стекло и керамика*. 1966. № 1, с30-33.
45. *Мороз И.И.* Автоматизация производства строительной керамики. -К.: Горстройиздат УССР, 1961. -98с.
46. Патент Японии. Заявка №2-3914 // *Изобретения стран мира*. Выпуск 102. МКИ F27. 1990. №9-12, с.18.
47. А.С.1000610 // *Изобретения стран мира*. Выпуск 78. МКИ F27. 1992. №3, с.12.
48. А.С.1471056 // *Изобретения стран мира*. Выпуск 102. МКИ F27. 1989. №7, с.17.
49. *Грунский В.П.* Улучшения показателей работы туннельных печей // *Стекло и керамика*. 1993 № 5, с.20-22.

50. Патент Англии. Заявка А1.2247939 // Изобретения стран мира. Выпуск 78. МКИ F27. 1993. №8, с.6.
51. *Линевверг Ф.* Измерение температур в технике. Справочник. Пер. с нем. -М.: Металлургия, 1980. -543с.
52. *Преображенский В.П.* Теплотехнические измерения и приборы. -М.: Энергия, 1978. -704с.
53. *Грофос П.* Измерения в промышленности. М.: Энергия, 1978. -704с.
54. *Шварцман М.З.* Способы сжигания природного газа с помощью горелочных устройств // Огнеупоры. 1972. №11, с.8-12.
55. *Шварцман М.З.* Модернизация горелочных устройств туннельных печей // Огнеупоры. 1988, №3. с.34-37.
56. *Левченко Ю.А. Шварцман М.З., Герцык Н.Б.* Горелочные устройства туннельных печей // Огнеупоры. 1986. №7, с.34-39.
57. А.С.1441149 // Изобретения стран мира. Выпуск 102. МКИ F27. 1989. №3, с.10.
58. Патент Франции. Заявка 2614093 // Изобретения стран мира. Выпуск 102. МКИ F27. 1989. № 5, с.10.
59. Патент Японии. Заявка 1-13032 // Изобретения стран мира. Выпуск 102. МКИ F27. 1990. № 3, с.18.
60. Патент Японии. Заявка 1-14514. // Изобретения стран мира. Выпуск 102. МКИ F27. 1990. № 8, с.7.
61. А.С.1520327. // Изобретения стран мира. Выпуск 102. МКИ F27. 1990. № 2, с.8.
62. *Малинков Ю.К.* Система контроля содержания кислорода в дымовых газах вращающейся печи. // Огнеупоры. 1992. № 6., с.22.
63. *Мороз И.И., Ленсон А.М.* Автоматизация процессов в производстве стеновой керамики. -К.: Будівельник, 1970. -116с.
64. *Семенюк И.М.* Туннельные печи для обжига обжига строительной керамики. -К.: Изд. Акад. архитектуры УССР, 1952. -55с.
65. Патент Японии. Заявка 2-13230 // Изобретения стран мира. Выпуск 78. МКИ F27. 1991. № 1, с.15.
66. Патент ФРГ. Заявка PS3722709 // Изобретения стран мира. Выпуск 102. МКИ F27. 1989. № 1, с.13.

67. *Грунско́й В.П., Каши́н В.И.* Газовые печи нового поколения для обжига керамических изделий // *Стекло и керамика*. 1997. №9, с.26.
68. *Шевченко Б.Г., Лаптев В.И.* Автоматический контроль режима печи обжига на линии керамически полированного стекла // *Стекло и керамика*. 1997. №7, с.3-4.
69. Патент Японии. Заявка 1-43233 // *Изобретения стран мира*. Выпуск 102. МКИ F27. 1990. № 6, с.10.
70. *Карауш С.А.* Критерии управления тепловыми режимами при обжиге керамических изделий. // *Стекло и керамика*. 1998. №5, с.3-5.
71. *Кочетов В.М. и др.* Автоматизация производственных процессов и АСУП промышленности строительных материалов. - М.: Стройиздат, 1989. -360с.
72. *Лыков А.В., Стольский Б.М.* Тепло- и массоперенос. Т.4 Тепло- и массообмен при химических превращениях в технологии. Минск: Наука и техника, 1966. -334с.
73. *Лишанский Б.А., Блудов Б.Ф., Лазуренко А.В., Грушко И.М.* Оптимизация процесса обжига керамических изделий // *Изд. Вузов сер. "Строительство"* 1995. №3, с.73-77.
74. *Шак А.* Промышленная теплопередача. - М.: Металургиздат, 1961. -524с.
75. *Аббакумов В.Г.* Теплопередача на продольных и торцевых поверхностях садки изделий // *Огнеупоры* 1967. №1, с.10-12.
76. *Аббакумов В.Г., Ашкинадзе Г.Ш.* Конвективный теплообмен в туннельных печах // *Огнеупоры* 1972. №3, с.17-19.
77. *Левченко Ю.А., Лисиенко В.Г., Фетисов Б.А.* Поиск рациональных схем садок для механизированной укладки динасовых изделий на печные вагонетки с использованием математической модели теплообмена // *Огнеупоры*. 1990. №5, с.44-47.
78. *Карауш С.А., Боберь Е.Г., Чижик Ю.И.* Расчет температурных полей в обжигаемых изделиях. // *Стекло и керамика*. 1996. №6, с.12-15.
79. *Карауш С.А.* Граничные условия на поверхности облучаемой в печи садки керамических изделий // *Стекло и керамика*. 1995. №11, с.13-15
80. *Карауш С.А., Чижик Ю.И.* Экспериментальное исследование теплообмена в электропечи туннельного типа на моделирующей установке // *Изд. вузов сер. "Строительство"*. 1995. №1, с.130-133.

81. *Лисиенко В.Г., Фетисов Б.А., Маликов Ю.К.* Определение эффективной теплопроводности сложной садки // Огнеупоры. 1989. №1, с.45-49.
82. *Карауш С.А.* Формирование температурных полей и тепловых потоков при нагреве садки керамических изделий электропечах // Изд. вузов сер. "Строительство". 1995. №3, с.73-77.
83. *Блох С.А.* Теплотехнические процессы при скоростном обжиге керамики. К.: Наук. Думка, 1979. -160с.
84. *Карауш С.А., Чижик Ю.Ч., Боберь Е.Г.* Оптимизация садки керамических изделий в зависимости от их тепловосприятости от излучающих стен печи // Стекло и керамика. 1997. №6, с.25-27.
85. *Лисиенко В.Г., Волков В.В., Гончаров А.Л.* Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах. -К.: Наукова думка, 1984. -230с.
86. *Голінко І.М., Остапенко Ю.О.* Алгоритмічне визначення температурних параметрів кераміки // Наукові вісті НТУУ "КПІ". К.: 1999 . №2, с.138-142.
87. *Адрианов В.Н.* Основы радиационного и сложного теплообмена. -М.: Энергия, 1972. -170с.
88. *Сперроу Э.М., Сесе Р.Д.* Основы радиационного и сложного теплообмена. Л.: Госенергоиздат, 1971. -232с.
89. *Зигель Р., Хауэл Дж.* Теплообмен излучением. - М.: Мир, 1975. -93бс.
90. *Оцисик М.Н.* Сложный теплообмен. -М.: Мир, 1976. -61бс.
91. *Рубцов Н.А.* Некоторые вопросы комбинированного теплообмена. // В кн.: Теплообмен излучением. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1977. с.8-23.
92. *Маковский В.А.* Динамика металлургических объектов с распределенными параметрами. -М.: Металлургия, 1971. -384с.
93. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. -М.: Наука, 1977. -730с.
94. *Рихтмайер Р., Мортон К.* Разностные методы решения краевых задач. -М.: Мир, 1972. -418с.
95. *Максимей И.В.* Имитационное моделирование на ЭВМ. -М.: Радио и связь, 1988. -232с.
96. *Вирт Н.* Алгоритмы и структуры данных. Пер. с англ. -М.: Мир, 1989. -360с.
97. *Фаронов В.В.* Программирование на персональных ЭВМ в среде ТУРБО-ПАСКАЛЬ. -М.: Изд-во МГТУ, 1992. -448с.

98. Федоров А., Рогаткин Д. Borland Pascal в среде Windows. -К.: Диалектика, 1993. -656с.
99. Френк Энго. Как программировать на Delphi 3. -К.: ДиаСофт, 1997. -320с.
100. Берштейн П.И. Тепловой баланс вращающихся печей для обжига керамзита. // Строительные материалы. 1960. №2, с.25-27.
101. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. -М.: Энергия, 1967. -232с.
102. Воробьев Х.С., Мазуров Д.Я. Теплотехнические расчеты цементных печей и аппаратов. М.: Вища шк., 1962. -231с.
103. Левченко П.В. Расчёт печей и сушил силикатной промышленности. -М.: Вища шк., 1968. -366с.
104. Кулбеков М.К., Сайбулатов С.Ж., Сулейманов А.А. Исследования динамики обжига золокерамических материалов. // Стекло и керамика. 1990. №7, с.25-27.
105. Бесков С.Д. Технохимические расчеты. -М.: Вища шк., 1966. -520с.
106. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. -М.: Наука, 1980. -536с.
107. Ажогин В.В., Згуровский М.З. Автоматизированное проектирование математического обеспечения АСУ ТП. -К.: Вища шк., 1986. -335с.
108. Арсенин В.А. Методы математической физики и специальные функции. - М.: Наука, 1974. -432с.
109. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное пособие. -М.: Наука, 1971. -380с.
110. Грунский В.П., Кашин В.И. Газовые печи нового поколения для обжига керамических изделий. // Стекло и керамика. 1997. №9, с.26.
111. Майзель Ю.А. Автоматизация процессов сушки в химической промышленности. - М.: Химия, 1970. -230с.
112. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. - М.: Наука, 1979. -394с.
113. Каневец Г.Е. Обобщенные методы расчета теплообменников. - К.: Наукова думка, 1979. -354с.
114. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Петров В.А. Принципы математического моделирования химико-технологических систем. - М.: Химия, 1974. -344с.

115. *Кафаров В.В., Ветохин В.Н.* Основы построения операционных систем в химической технологии. - М.: Наука, 1980. - 430с.
116. *Френкс Р.* Математическое моделирование в химической технологии. Пер. с англ. М.: Химия 1971. -272с.
117. *Слинько М.Г.* Построения операционных систем // ТОХТ. 1976. №2, с.172-176.
118. *Cawet P.* // Revoe generale de the rmique. 1963. V.2. №24. p.1383-1403.
119. *Dumer P.* // Revoe generale de the rmique. 1966. V.5. №55. p.673-686.
120. *Карауш С.А.* Формирование температурных полей и тепловых потоков при нагреве садки керамических изделий электропечах // Изд. вузов сер. "Строительство". 1995. №3, с.73-77.
121. *Хатамов Утирзак.* Моделирование и оптимизация процесса обжига фарфоровых изделий. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н.. Ташкент: 1974, 22с.
122. *Дудников Е.Г.* Построение математических моделей химико-технологических объектов. -Л.: Химия, 1970. - 213с.
123. *Остапенко Ю.А., Кваско М.З., Ковалевский В.М.* Экспериментальные методы исследования объектов управления химических производств. Учебное пособие. -Киев: КПИ, 1981. -111с.
124. *Голінко І.М., Остапенко Ю.О.* Моделювання динамічного режиму підзони випалювання // АВП. Київський інститут автоматики. К.: 1999. №2, с.40-44.
125. *Кубрак А.И., Остапенко Ю.А.* Расчет переходных процессов в объектах с распределенными параметрами. -К.: КПИ, 1989. -56с.
126. *Девятков Б.Н.* Теория переходных процессов в технологических аппаратах с точки зрения задач управления. -Новосибирск: Редакционно-издательский отдел СОАН СССР, 1964. -256с.
127. *Бате К, Вилсон Е.* Численные методы анализа и метод конечных элементов. -М.: Стройиздат, 1982. -448с.
128. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. - М.: Наука, 1978. -512с.
129. *Мак-Кракен Д., Дорн. У.* Численные методы и программирование на Фортране. -М.: Мир, 1977. -582с.
130. *Кваско М.З.* Проектирование и расчет цифровых систем управления. -К.: УМК ВО, 1991. -220с.

131. *Романенко В.Д., Игнатенко Б.В.* Адаптивное управление технологическими процессами на базе микроЭВМ. -К.: Вища шк., 1900. - 334с.
132. *Роточ В.Я.* Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. -М.-Л.: Энергоиздат, 1985. -296с.
133. *Голінко І.М., Остапенко Ю.О.* Компенсація інерційності та статичної нелінійності виконуючих пристроїв // АВП. Київський інститут автоматики. К.: 1998. №1/2, с.27-31.
134. *Ротач В.Я.* Расчёт настройки промышленных систем регулирования. -М.: Энергия, 1973. -440с.
135. *Роточ В.Я.* Импульсные системы автоматического регулирования. -М.-Л.: Энергия, 1964. -224с.
136. *Емельянов А.И., Емельянов В.А.* Исполнительные устройства промышленных регуляторов. -М.: Машиностроение, 1975. -224с.
137. *Казинер Ю.Я., Слободкин М.С.* Пневматические исполнительные устройства в системах автоматического управления. -М.: Энергия, 1972. 71с.
138. *Первозванский А.А.* Курс теории автоматического управления. -М.: Наука, 1986. -616с.
139. *Красовский А.А.* Справочник по теории автоматизированного управления. - М.: Наука, 19987. -712с.
140. *Бутковский А.Г.* Методы управления системами с распределенными параметрами. -М.: Наука, 1975. -568с.
141. *Рей У.* Методы управления технологическими процессами. Пер. с англ. - М.: Мир, 1983. -386с.
142. *Егоров А.И.* Оптимальное управления тепловыми и диффузионными процессами. -М.: Наука, 1978. -464с.
143. *Ажогин В.В., Згуровский М.З., Корбич Ю.С.* Методы фильтрации и управления стохастическими процессами с распределенными параметрами. -К.: Вища шк., 1988 -448с.
144. *Ажогин В.В., Згуровский М.З.* Машинное проектирование оптимальных систем управления пространственно-распределенными динамическими объектами. -К.: Вища шк., 1985. -170с.
145. *Ray W.H., Szekely J.* Process Optimization, Wiley, New York, 1973.



146. *Courant R.* Variational Method for Solution of Problems of Equilibrium and vibrations. Bull. Amer. Math. Soc. -1943. -V.49 -p.1-23.
147. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. -М.: Наука, 1972. -321с.
148. *Остапенко Ю.О.*, Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування. -К.: Задруга, 1999. -424с.