

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

DOI: 10.20535/1970.70(2).2025.348015

УДК 681.5

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТУНЕЛЬНИХ ВАФЕЛЬНИХ ПЕЧЕЙ*Столярський Я. В., Химко О. М.**Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна**E-mail: yaroslav.v.stoliarskyi@lpnu.ua*

У статті проведено огляд та аналіз останніх публікацій в галузі автоматизації промислових технологій випікання вафель. За результатами цього аналізу проведено узагальнення характеристик відомих систем автоматизації та визначено перспективні напрями їх досліджень. Особливу увагу приділено аналізу тунельної печі як об'єкта керування. Встановлено, що температура є основною вихідною величиною при регулюванні процесу випікання вафель у тунельній печі. Також виділено характерні особливості систем регулювання температури у печах, зокрема значна інерційність теплових процесів, а також промислових первинних вимірювальних перетворювачів температури.

В статті виконано аналіз відомих методів вимірювання температури у тунельних печах: контактного методу із застосуванням термопар, безконтактного методу з застосуванням інфрачервоних пірометрів, а також комбінованого методу, який поєднує названі методи. Розглянуто переваги та недоліки кожного методу, зокрема відзначено, що інфрачервоні пірометри забезпечують прийнятну для промисловості точність вимірювання температури на поверхні випікаючих плит, а додатковий сигнал про температуру в камері випікання від термопари є хорошою проміжною точкою, що додає системі стійкості та зменшує коливні процеси.

Основну увагу приділено розгляду різних систем регулювання температури в тунельній печі. Зокрема, проаналізовано такі технічні рішення, як багатопальникова газова система та електричний нагрів із матричним керуванням елементами. Встановлено, що система імпульсного регулювання потужності подум'я має переваги перед неперервною. Основними перевагами імпульсного регулювання є економічність застосовуваних елементів та спрощене технічне обслуговування такої системи. Серед методів електричного нагріву найбільш ефективним рішенням, яке не потребує істотних конструктивних змін тунельної печі, є застосування резистивних нагрівачів із безпосереднім монтажем на поверхні плити для випікання. Використання електричної енергії дає можливість зменшити кількість ресурсів для реалізації керування нагрівом індивідуальних сегментів печі.

Ключові слова: система автоматизації; тунельна піч; випікання вафель; об'єкт керування; вимірювання температури; імпульсне регулювання.

Вступ. Постановка проблеми

Харчова промисловість є однією з провідних галузей, що сприяють зростанню добробуту суспільства. Кондитерський сектор, зокрема виробництво вафель, вимагає постійного вдосконалення технологічних процесів та впровадження автоматизованих систем виготовлення продукції. Ключовими для розвитку та масштабування промислових процесів є відповідність сучасним технологіям, що дозволяє оптимізувати використання ресурсів, та мінімізувати вплив людського фактору на технологічний процес.

Прямим способом збільшення ефективності виробництва є підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів для виготовлення продукту. Побудова вафельних печей за своєю структурою націлена на виконання задачі виготовлення доволі різноманітного продукту та не має

тонких механізмів опрацювання збурень для виготовлення індивідуального продукту. Стабільність виготовлення кінцевого продукту завжди вимагає повної стаціонарності системи, однак реальний перебіг технологічного процесу завжди супроводжується відхиленнями від номінальних значень. Найвищий сьогодні ступінь автоматизації вафельних печей не забезпечує постійного рівня якості продукту, тому потребує поглибленого вивчення деталей процесу випікання вафель та систем, що це реалізують. Структуризація наявних знань та досліджень у цій галузі націлена на виявлення малодосліджених аспектів з метою формування завдань для їх подальших досліджень.

Глобальне потепління та потреба декарбонізації довкілля формують запит на перехід промисловості до екологічно чистих енергоносіїв, а також на відповідне зменшення використання викопних

джерел енергії, таких як нафта, газ, вугілля [1, 2, 3]. Одним з основних джерел вуглекислого газу є спалювання природного газу у виробничих потребах [4], в тому числі у виробництві кондитерських виробів. Аналіз готових рішень від виробників вафельних печей (Buhler, Hebenstreit, Bismak) демонструє майже повну відсутність печей, які використовують для нагріву електроенергію.

Сучасні вафельні печі тунельного типу – це складні багатокомпонентні технічні системи, де автоматизація відіграє ключову роль. Серед усіх етапів виготовлення вафель саме процес випікання листів є найбільш енергомістким, тому його автоматизація та оптимізація є важливими завданнями. Автоматизація випікання вафель передбачає контроль багатьох параметрів, зокрема температури, часу експозиції, швидкості руху конвеєра, стану нагрівних елементів. Важливо зазначити, що точне відтворення температурних режимів під час випікання листів є необхідною умовою досягнення потрібних якісних характеристик вафель, а саме формування пористої структури та хрусткої текстури, кольору листів, відсутністю пригоріlostей та тріщин. Надійна система автоматизації дозволяє забезпечити стабільність цих показників.

Метою статті є виокремлення та аналіз факторів, що визначають якість перебігу процесу випікання вафель, аналіз тунельної печі для випікання вафель як об'єкта керування, аналіз існуючих систем автоматизації цього об'єкта та перспектив підвищення їх ефективності. Особливу увагу надано системам забезпечення різнозонного температурного режиму в печі при застосуванні газового палива.

Аналіз останніх досліджень

Технологія виготовлення вафель є відомою та широко застосовуваною у кондитерській промисловості. Однак для забезпечення високої якості виготовлення цього продукту необхідно врахувати велику кількість факторів, дослідження впливу яких тривають до сьогодні. Сегменти вафельної печі мають індивідуальний характер сприйняття та передавання теплової енергії, тому, використання моноконтрольованих пальників призводить до виникнення різниці температури між різними сегментами. Результати досліджень, представлені в роботі [5], підтверджують цю гіпотезу, зокрема тут досліджено ефект впливу випікаючих плит на розподіл температури, товщину та колірний градієнт вафельних листів. У [5] проаналізовано кореляційні зв'язки основних показників якості продукту (товщина, вологість, рівномірність кольору) з відповідністю технологічному процесу. Шляхом проведення експерименту з використання двох типів випікаючих плит, виготовлених з модифікацій чавуну GG-25 та GJV-350, продемонстровано відмінності перебігу технологічного процесу для досягнення необхідної якості продукту. Дослі-

дження продемонструвало суттєву різницю в перебігу теплових процесів залежно від типу матеріалу. Виявлено, що марка чавуну GJV-350 забезпечує значно рівномірніший розподіл теплової енергії, що сприяє стабілізації температурного режиму в печі. Завдяки цьому кінцевий продукт характеризується більш однорідним кольором і сталою товщиною вафельних листів. Протягом одного циклу випікання виявлено відмінність температури плит з чавуну GG-25 близько 21.5 °C, в той час як температура плит з іншої марки чавуну відрізнялася не більше ніж на 5 °C. Завдяки рівномірнішому розподілу тепла на поверхні плити, вдається суттєво підвищити однотипність продукту і таким чином знизити втрати сировини.

Патент № US4438685A [6] є інформативним джерелом, що описує основні принципи побудови тунельної вафельної печі для забезпечення в ній високої ступені автоматизації виробництва. В патенті описано принципи роботи основних механізмів, а саме: конструкцію механізму випікання продукту, кулачковий механізм ідентифікації відкритої/закритої плити, система приводів та кінематичних механізмів безперешкодного переміщення плит всередині печі, система статичних нагрівачів газових або електричних. Ключовими моментами, яких слід дотримуватись, є використання автоматичних дозаторів/відділювачів продукту від форм випікання, завдяки чому досягається безперервна робота та висока продуктивність обладнання. Цей документ відображає структуру побудови промислової вафельної печі, яку можна назвати класичною. Недоліком цієї структури є використання статичного нагрівника, через що не вдається досягати значних показників економічної ефективності використання електричного нагріву.

У джерелі [7] представлено загальні показники ефективності застосування різних методів нагріву в побутовому секторі. Дослідження демонструють ефективність використання енергії від спалювання природного газу на рівні 32 %, зовнішніх резистивних нагрівачів – 61 %, індукційного нагріву – 74 %. Встановлено також, що отримання необхідної для даного експерименту кількості теплової енергії призводить до вивільнення в атмосферу 0,526 кг вуглекислого газу. Значними перевагами використання електричного нагріву можна вважати швидкодію та безпечність. Недоліком для резистивних нагрівачів є передавання тепла через провідність матеріалів, тобто є потреба контакту нагрівача та поверхні нагріву.

Представлені в джерелі [8] дослідження стосуються проектування нагрівальної сторони плоских форм для випікання вафель у газових печах, з метою досягнення меншого енергоспоживання, меншого часу випікання та кращого контролю якості. Ключовою особливістю, що досліджується, є теплова взаємодія між газовим полум'ям та формами для випікання. В джерелі описано взаємо-

зв'язки між формою та кількістю зубців та їх впливом на основні показники процесу випікання. Серед показників виокремлено: середня температура випікання, відхилення температури на поверхні плити, максимальна деформація, маса. За допомогою комп'ютерного моделювання виконано порівняння плити з оптимальною конструкцією з плитою, що вже використовується. Показано, що для плити з оптимізованою конструкцією середня температура випікання зросла на 11 °C, відхилення температури на поверхні становить 2,26 °C, що на 1,61 °C нижче ніж в попередньої моделі, також на 17 % зменшилась маса плити, при цьому максимальна деформація плит не змінилась. Завдяки зростанню температури вдалось досягти збільшення ККД обладнання приблизно на 7 %, однак подальший ріст ефективності газового обладнання є малоімовірним внаслідок недоліків процесів передавання тепла під час згоряння газу.

Джерело [9] відображає результати досліджень теплових втрат у діючих вафельних печах. Згідно цих досліджень, найбільшу частку тепла втрачають внаслідок викидання вихідних газів в атмосферу. Температура вихідних газів становить близько 150 °C. Під час досліджень було проведено експеримент з використанням неklasичної системи рекуперації тепла, а саме, використання теплової енергії для нагрівання первинного повітря, яке подають до пальників. Використання попередньо підігрітого до температури 105 °C повітря дозволяє економити близько 4 % спожитої енергії, а також приблизно на стільки ж зменшує викиди вуглецю в атмосферу.

В статті [10] подано огляд та дослідження способів збільшення ефективності вафельних печей. Одним із предметів дослідження тут є зменшення кількості вторинного повітря, яке подають для охолодження підшипникових механізмів та стінок печі загалом. За результатами досліджень встановлено, що зменшення витрати вторинного повітря на 30-35 % дозволяє заощаджувати близько 8.5 % палива. Подальше зниження витрати вторинного повітря дало можливість знизити витрату палива на -15 % від початкового показника, однак з'явилося сильне нагрівання бічних стінок печі. Подальші експерименти вимагають зміни теплоізоляційних матеріалів печі.

У статті [11] наведено результати дослідження та оптимізації промислової печі загального призначення. Збільшення ефективності роботи в цій статті демонструється як результат детального аналізу взаємозв'язків між якістю продукту та удосконаленням процесу. Ключовою думкою даної роботи є: виробники не йдуть на збільшення ефективності роботи обладнання, якщо це спричиняє погіршення якісних параметрів продукту. Розуміння продукту дозволяє визначити цільові параметри, завдяки яким відбувається технологічний процес. В даному випадку це може бути максима-

льне значення температури, ступінь її рівномірного підтримання, повітряні потоки, що відповідають за висушування вологи. Газові печі включають такі елементи, що впливають на ефективність процесу випікання продукту та температуру: газовий пальник, засоби руху повітря (заслінки, вентилятори), теплова ізоляція з навколишнім середовищем, шлях руху продукту. Оскільки останній елемент вимагає конструктивних змін печей, та потребує ретельних підготовчих робіт, в цій роботі зосередились на інших елементах. Зокрема, завдяки обладнанню внутрішніх стінок теплоізоляційним матеріалом, вдалось знизити час підготовки та зупинки печі на 87.5 %. Регулювання повітряних потоків у тунельній вафельній печі безпосередньо пов'язане з підтриманням оптимального розрідження всередині камери випікання. Підвищене розрідження призводить до втрат тепла через димхід, що знижує ефективність використання енергії. Натомість недостатнє розрідження спричиняє витік продуктів неповного згоряння та шкідливих речовин через щілини в стінках печі, що негативно впливає на екологічні показники виробництва та безпеку праці.

Стаття [12] присвячена оптимальному проектуванню випікаючих плит для печей з індукційним нагріванням у виробництві вафель. Використання індукційного нагріву має специфічні особливості, зокрема обмежену відстань передавання енергії та локалізацію тепла, що може призводити до неоднорідності температурного поля на поверхні плити і, як наслідок, до дефектів готового продукту. Основною проблемою, що розглядається в даній статті є пошук компромісу між геометричною формою плити, щоб забезпечити її міцність, рівномірність розподілу тепла, а також швидкість накопичення та відновлення теплової енергії. Шляхом комп'ютерного моделювання визначено рекомендований діапазон товщини плити 10-50 мм. Більша товщина плити також дозволяє знизити середнє відхилення температури на поверхні плити до 0,6 °C. Графік залежності часу початкового нагріву плити від товщини є майже лінійним: час нагріву становить 9 хв при товщині плити 10 мм, та 45 хв при товщині 50 мм.

У джерелі [13] відображено ідеї та результати розроблення математичної моделі матричного вигляду, яка дає можливість обчислювати індивідуальну зміну температури кожної групи випікаючих плит. Розроблена модель є частковим випадком дискретного перетворення Флоке, що стосується перетворення лінійних періодичних систем у стаціонарні часові системи. Структура системи має вигляд згрупованих за один період переміщення ланцюга, вхідних та вихідних параметрів з певним інтервалом дискретизації. Температурний стан одиничного групування містить два виміри температури з нижньої та верхньої плит відповідно, а також ефективну температуру камери випі-

кання. Ефективна температура камери розраховується для середньостатистичної плити, що дозволяє значно зменшити складність моделі та знімає необхідність моделювати поверхню кожної плити окремо, оскільки враховуються основні теплові потоки: радіаційний та конвекційний. Валідація отриманої авторами математичної моделі показує добру відповідність експериментальним даним, та має перспективи для подальшого підвищення точності; модель дозволяє визначити оптимальні місця встановлення індукційних нагрівачів, що також підтверджується експериментально. В продовження тематики цієї статті автори опублікували роботу, де вже описано додатковий функціонал у ролі спостерігача. Проблема, яку вирішують автори, полягає в тому, щоб врахувати невизначеність при вимірюванні температури плит, спричинену різною ємністю плит. Протягом нормальної експлуатації обладнання поверхні плит можуть змінювати колірність внаслідок розжарювання та забруднення, в поєднанні з приведенням реального об'єкту до вигляду дискретної стаціонарної системи таке спотворення викликає додаткові збурення в системі регулювання. На спостерігача покладено функцію корекції стану системи для точнішого наближення до реальних значень.

Аналіз сучасного стану та перспектив підвищення ефективності систем автоматизації тунельних печей

Як впливає з аналізу джерел, температура є основною вихідною величиною при регулюванні різноманітних теплових процесів в теплообмінниках, реакторах, печах, ректифікаційних колонах, тощо. Динамічні характеристики об'єктів в системах регулювання температури залежать від фізико-хімічних параметрів процесу і конструкції апарата [14]. Характерними особливостями систем регулювання температури є значна інерційність теплових процесів, а також промислових первинних вимірювальних перетворювачів температури [15].

Процес випікання вафельних листів – це випікання рідкого тіста, затиснутого між двома металевими пластинами, під час якого тісто отримує тепло від металевих пластин (плит) внаслідок їх великої теплопровідності. Тепло перетворює тісто на готовий продукт (вафельний лист). При аналізі цього процесу як об'єкта автоматизації необхідно враховувати наявність трьох теплових ємностей:

- плита;
- тісто;
- тепле повітря.

Наявність теплових опорів між ними приводить до виникнення інерційності та запізнення, що значно погіршує перехідний процес регулювання температури та формує проблему керування цим процесом, оскільки саме стабільне підтримання температури металевих плит є ключовим фактором, який визначає якість вафельних листів.

Аналіз температурного поля всередині тунельної печі з газовим нагрівом, наданий виробником печей [16], представлено на рисунку 1. На цьому рисунку представлено межі температурних зон усередині камери, а також видно, що велика кількість тепла виходить з печі з димовими газами. Температура газів, що проходять крізь димохід, становить 150 °С.

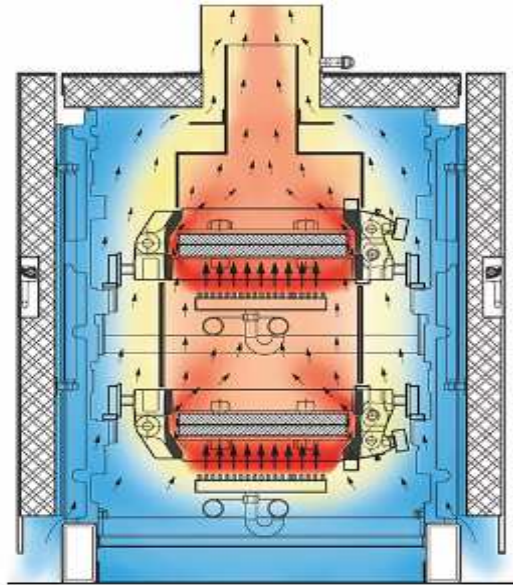


Рис. 1. Розподіл теплової енергії всередині тунельної печі з газовим нагрівом [16]

Основні складові теплових втрат у цих газах включають: конвекційну теплоту, яка не була поглинута випікаючою плитою, та конвекційну теплоту, що відводиться від гарячої поверхні плити. Другу складову з перелічених втрат тепла усунути неможливо, однак існує декілька класичних методів мінімізації втрат тепла, яке не поглинуте плити під час їх конвективного нагрівання. Встановлення системи рекуперації газів є популярним рішенням, яке дозволяє відібрати велику кількість тепла, однак температуру у димовій трубі не можна знизити нижче 100°C, оскільки це призведе до ймовірної конденсації волги у димовій трубі. Компанія Buhler розробила газову піч “Franz Naas SWAKT-Eco”, яка є на 30 % енергоефективнішою [17] від класичних печей. З результатів цього аналізу видно, що навіть сучасні газові печі характеризуються значними тепловими втратами, що знижує загальну ефективність їх використання. Аналіз теплових потоків в тунельній печі [16] дає можливість зробити такі висновки:

1) сегмент печі нижнього яруса отримує енергію від нижнього пальника шляхом конвекції та випромінювання; основне теплове навантаження сегменту припадає на плити, що знаходяться в безпосередньому контакті з полум'ям, тобто в нижньому сегменті кільця;

2) сегмент печі верхнього яруса нагрівається завдяки тепловій енергії від верхнього пальника, а

також завдяки конвекційному використанню теплової енергії від нижнього пальника; умови для якісного випікання на верхньому ярусі формують за допомогою зниження потужності верхнього пальника.

Класична будова тунельної печі передбачає постійний кільцевий рух плит вздовж камери випікання. Крайня позиція в печі є поворотом транспортера переміщення плит та переходом вафельної плити від верхнього положення до нижнього. Під час цього переміщення відбувається переворот плити і нижня плита займає позицію зверху.

Протягом циклу випікання відбувається активне поглинання тепла від форми до тіста. Враховуючи той факт, що першу половину шляху плита знаходиться в нижньому ярусі, а другу половину – у верхньому, може виникати нерівномірність пропівання по площі листа внаслідок чого може виникати деяке його викривлення.

На основі останніх досліджень та публікацій в галузі промислового виготовлення вафель можна чітко відслідкувати тенденцію розвитку напрямку використання електроенергії як основного джерела отримання тепла.

Класична структура тунельних печей вимагає підтримання стабільної температури в камері випікання, для цього можна використовувати будь які засоби нагрівання: газові пальники, резистивні нагрівачі, індукційний нагрів.

У тунельних печах застосовують такі способи нагріву металевих плит:

- спалювання природного газу – викорис-

тання двоохрядної системи газових пальників, розташованих під шляхопроводами візків переміщення плит;

- резистивні нагрівачі – безпосередньо вмонтовані в об'єм випікаючих плит матеріали що розігріваються під дією електричного струму (ТЕНи, ніхромові дроти, нагрівні кабелі тощо); складності використання такого механізму полягають в структурі побудови печі, а саме потребі постійного переміщення плит вздовж кільця в камері випікання; використання такого роду джерела тепла потребує присутності ковзних контактних інструментів передавання електроенергії; висока потужність споживання електроенергії в парі з постійним ковзанням спричиняє доволі значну кількість іскріння, що перевантажує мережі підприємства, а також спричиняє нерівномірний час нагрівання;

- індукційний нагрів – використання спеціально намотаних височастотних котушок дроту, що за допомогою електромагнітної передачі енергії спричиняють нагрів випікаючих плит.

Інфрачервоні випромінювачі – не є ефективними засобами нагріву для даного процесу оскільки є повільними в передаванні тепла завдяки переважно радіаційному способу його передавання. Недоліком також є те, що велика кількість теплової енергії при такому способі її передавання втрачається. Особливості реалізації промислових вафельних печей з різними способами отримання тепла представлено у таблиці 1.

Таблиця 1. Особливості промислових вафельних печей з різними способами отримання тепла

	Газовий	Електричний	
		Резистивний	Індукційний
Поточна економічна ефективність, %	50	65	85
Відповідність екологічним тенденціям	ні	так	так
Рівень забезпечення однотипності продукту	достатній	достатній	високий
Можливість підвищення ефективності	є, обмежена	є, помірна	є, значна
Складність обслуговування	висока	середня	низька
Необхідність додаткових заходів безпеки	так	ні	ні
Ступінь автоматизації	багатозонний температурний режим	індивідуальний нагрів	індивідуальний нагрів
Вартість впровадження системи автоматизації	висока	низька	середня
Залежність стабільності температури від конструкції плити	Висока	висока	середня

Серед особливостей САР температури у тунельній вафельній печі потрібно також виділити значну інерційність давачів температури. Тому одна із основних задач при проєктуванні таких систем – зменшення інерційності давачів та вибір кращих координат вимірювання [14].

Одним з ключових рішень, які значно підвищили рівень контролю за перебігом процесу випікання вафель, стало використання безконтактних засобів вимірювання температури. З допомогою цих засобів зараз відбувається вимірювання температури на поверхні плити випікання. Вимірювання температури плити іншими методами вносить додаткову похибку. Вимірювання температури поверхні кожної плити вимагає встановлення великої кількості давачів, тому часто вимірюють температуру лише окремих плит. Оскільки під час тривалої експлуатації плит викликає різний ступінь їх зношення і, відповідно, змінюється їх теплопровідність, то доцільно вимірювати температуру кожної плити, для чого потрібно використовувати рухомі контакти.

Використання безконтактних інфрачервоних давачів температури дозволило значно зменшити запізнювання у вимірюванні температури плит порівняно з класичними контактними методами вимірювання температури всередині печі.

Збільшення потужності полум'я через певний час викликає зміну температури всередині печі, яку реєструє контактний перетворювач температури, наприклад термопара. Проте динаміка зміни температури поверхні плити випікання є іншою, тому виникає розузгодження фази вимірювання температури в печі та температури плит випікання вафель. Це розузгодження спричиняє тривалий процес регулювання температури для досягнення умов, необхідних для якісного випікання вафель.

У разі, якщо вимірювання температури поверхні плити відбувається безконтактним методом, оптичний пірометр встановлюють таким чином, що він вимірює значення температури поверхні усієї плити. Складна геометрична форма дна плити діє як радіатор, розсіюючи відповідно різну кількість теплоти. Внаслідок цього, а також внаслідок зміни відстані до плити виникає певна додаткова складова похибки [18].

Вирішення цієї проблеми було досягнуто завдяки включенню в систему вимірювання сигналу положення плит від енкодера приводу переміщення плит. Відповідно, за дійсне значення температури плити, при якому проводять технологічний процес випікання вафель, приймають значення температури, яку виміряв пірометр у визначений момент циклу руху плит, що відповідає однаковій координаті вимірювання для усіх форм. Температуру випікання визначають як середнє арифметичне температур усіх 96 форм. Використання однієї точки вимірювання температури призводить до появи ланки транспортного запізнення в системі регулювання температури. Зменшення впливу інерційності даної системи можливе шляхом збі-

льшення кількості точок вимірювання або побудови САР температури із застосуванням предиктивних регуляторів. Збільшення кількості точок вимірювання є дороговартісним рішенням, оскільки потребує встановлення додаткових пірометрів для одночасного вимірювання температури декількох плит. Впровадження таких рішень потребує детального техніко-економічного аналізу.

Отже за результатами виконаного аналізу можна виділити такі переваги та недоліки застосування різних методів вимірювання температури випікання вафель.

1) Інфрачервоні (ІЧ) пірометри – забезпечують прийнятну для промисловості точність вимірювання температури на поверхні випікаючих плит. Вимірювання відбуваються на тильній стороні плити, тобто на ребристій поверхні, тому при застосуванні неправильної методики вимірювань може виникати достатньо значне спотворення результату вимірювання температури. Незначне відхилення позиції вимірювання, забруднення поверхні тістом, зміна кута вимірювання спричиняє розбіжність вимірюваних показників з реальним значенням, звідки і виникають додаткові похибки регулювання температури.

2) Використання термопар всередині камери випікання дає можливість виміряти температуру середовища. Вимірювання такого типу мають хорошу точність та не є надто інерційними. Недоліком застосування даної схеми є відмінність температури газів в камері від реальної температури випікання вафель, яка визначається температурою плит.

3) Застосування в тунельній печі комбінованої методики вимірювання температури випікання дозволяє усунути окремі недоліки обох попередніх методів. Зокрема, додатковий сигнал про температуру в камері випікання є хорошою проміжною точкою, що додає системі стійкості та приглушує коливний процес.

Камера випікання забезпечує реалізацію процесу випікання, що в структурі автоматизованих процесів визначається як однозонний. Для даної структури характерне регулювання одного технологічного параметру. Структура автоматичної системи керування, що використовується в печах, містить: давач температури, регулятор та виконавчий пристрій, який змінює витрату газу до пальника. Однозонна схема печі означає підтримання температури випікання шляхом впливу на всю довжину пальника.

Аналіз однозонної системи регулювання температури

Основна енергія для випікання вафельних листів отримується внаслідок спалювання природного газу, що потребує використання особливих засобів автоматизації для нормальної експлуатації. До системи керування висувають такі вимоги: підтримання безпечних режимів, якісне спалювання палива та досягнення високого ККД обладнання.

Спрощену функціональну схему системи керування пальником тунельної печі, що реалізує однозонне регулювання температури, представлено на рис. 2. У цій системі керування застосовано пневматичні засоби регулювання співвідношення витрат палива та повітря. Таке рішення відповідає рекомендаціям, що розроблені в праці [19]. У цій праці виконано аналіз основних методів регулювання співвідношення газо-повітряної суміші: механічного, пневматичного, електронного; проведено

аналіз схем керування пальниками, виділено позитивні та негативні складові їхнього використання.

Згідно отриманих у [19] висновків, схема регулювання співвідношення витрат палива та повітря, побудована на пневматичних засобах, має вагомі переваги порівняно з іншими. Пневматичні засоби є простими у використанні, надійними, швидкими, і також можуть бути використані для побудови багатопальникових систем.

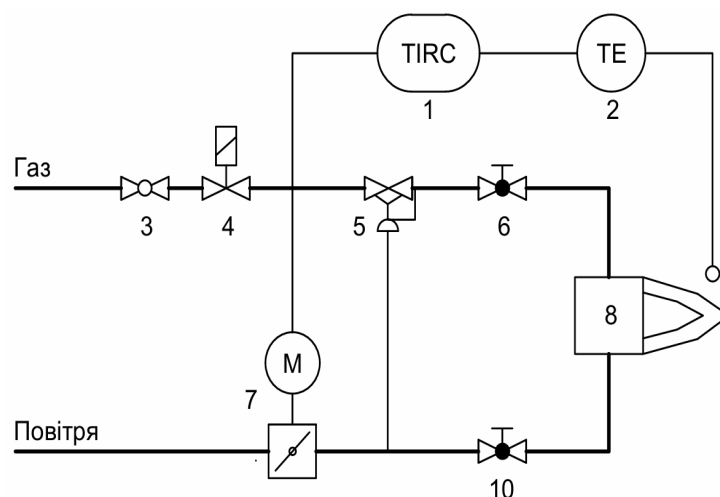


Рис. 2. Спрощена функціональна схема системи керування однозонним пальником тунельної печі, де: 1 – регулятор температури в камері печі; 2 – давач температури; 3 – кульовий кран; 4 – електромагнітний запірний клапан; 5 – регулятор тиску газу прямої дії; 6, 10 – вентилі регулювання витрат палива та повітря відповідно; 7 – заслінка регулювання витрати повітря; 8 – пальник

Вафельні печі побудовані за однозонною структурою мають певні переваги, в основному це зумовлено простотою конструкції виконавчого пристрою, оскільки використовується всього лише один пальник. Основна функція системи керування горінням полягає у зміні витрати газу та повітря до пальника відповідно до потреб процесу випікання вафель. Існують такі основні способи регулювання потужності пальника:

- неперервний – передбачає плавну зміну витрати палива для регулювання амплітуди полум'я і, відповідно, потужності пальника;
- імпульсний – використовує позиційні регулятори, для ступеневої зміни потужності полум'я;
- змішаний – використання комбінації двох попередніх способів.

Аналіз багатозонної системи регулювання температури в печі

Різні методи керування потужністю полум'я мають свої аспекти використання. Загальним напрямом розвитку автоматизації тунельних вафельних печей є розроблення схем керування нагрівом для організації різнотемпературних зон.

Побудова окремих зон з різними температурами плит потребує також і пошуку рішень щодо безконтактного вимірювання температури. Одним

з напрямів подальших досліджень є розроблення активних сканерів температури. Вихідним параметром такого інструменту є матриця температурних значень, а концепція є складним та комплексним рішенням, що виходить за межі класичного розуміння вимірювального приладу.

Інструментарій температурного сканера включає в собі: давач безконтактного вимірювання температури, одно- або двоосевий сервопривод, модель закономірності вимірювання та блок обчислень.

Складним для вирішення є питання використання давача температури, що може виконувати вимірювання на різній відстані та під різним кутом. Пошук рішення, що дозволяє виконувати швидкі переключення зміни площі вимірювання, є складним процесом, що потребує методологічного підходу та аналізу поточного стану досліджень подібних проблем. Опрацювання результатів чисельних вимірювань потребує нововведень в стандартному математичному апараті метрологічних досліджень. Залучення в роботу інтелектуальних систем виглядає хорошим рішенням, принаймні, на перший час становлення структури даних систем [20].

На рисунку 3 представлено технологічну схему багатопальникової системи нагріву тунельної печі з імпульсним регулюванням процесу горіння. У такій системі на кожному пальнику вико-

ристовується повітряний електромагнітний клапан 9, який замінює зональний регулюючий клапан. Коли є потреба збільшити температуру, повітряний клапан відкривається і тиск повітря після повітряного клапана збільшується. Це збільшення тиску передається по імпульсній лінії для відкриття регулятора співвідношення газ-повітря 5, тим

самим система переходить в режим горіння «високий». Регулятор співвідношення в даній схемі є незалежним приладом та призначений для ефектної роботи пальників. Байпасні вентиля 4 та 10 призначені для встановлення потужності полум'я в режимі «низького» горіння [21].

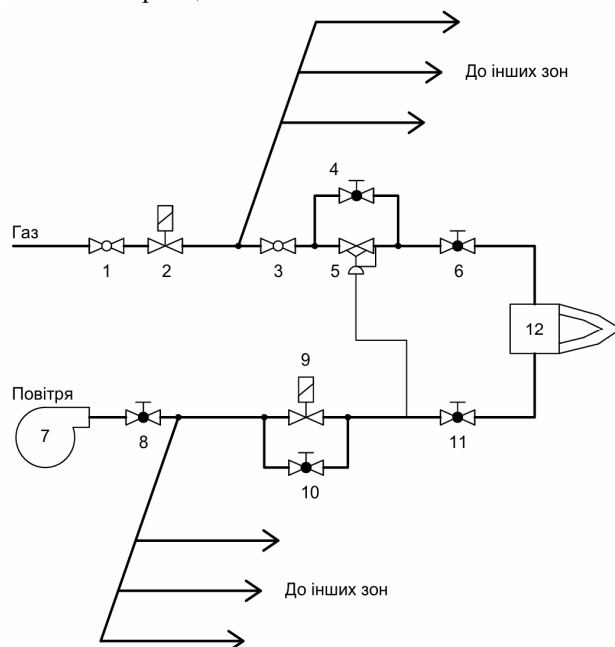


Рис. 3. Спрощена технологічна схема багатопальникової системи нагріву тунельної печі з імпульсним регулюванням: 1 – кульовий кран подачі газу; 2 – електромагнітний запірний клапан; 3 – газовий кран локальної зони; 4, 10 – байпасні вентиля регулювання низького режиму горіння; 5 – регулятор нульового тиску; 6, 11 – вентиля регулювання витрати палива та повітря відповідно; 7 – повітродувка; 8 – клапан регулювання витрати повітря; 9 – клапан роботи високого горіння; 12 – пальник

Використання лише імпульсного регулювання потужності полум'я для вафельних печей є проблематичним з точки зору стабільності температури. Схема з повним вимкненням пальників має проблему у вигляді зменшеної надійності. Практика експлуатації газового обладнання з частим та повним вимкненням полум'я супроводжується частими проблемами в надійності контролю розпалу, а відповідно спричиняє небажані зупинки виробничих потужностей. Регулювання полум'я в режимі високе-низьке є надійним в плані безпеки, однак для побудови за цією структурою багатозонної системи нагріву необхідно розділяти газові магістралі та встановлювати на кожну з них засоби для регулювання.

Хоча основними об'єктами застосування імпульсного методу регулювання витрати палива традиційно були котли, позитивні характеристики цього методу підтверджують його ефективність і формують перспективи для його впровадження у харчовій промисловості.

Реалізація різномінературної моделі керування на повнорозмірній вафельній печі потребує великих капіталовкладень, тому концепція повинна

бути добре аргументованою. Найкращим способом досліджень такого впровадження є застосування методів моделювання для створення цифрової копії (близнюка) досліджуваного устаткування [22].

Отже, за результатами виконаного аналізу доцільно виділити такі перспективні напрямки подальших досліджень автоматизації тунельних вафельних печей.

Вдосконалення математичних моделей тунельної печі. Оскільки експериментальні дослідження таких печей потребують великих витрат, то вдосконалення математичних моделей тунельної печі та моделювання процесу випікання вафель є зручними засобами їх дослідження. Під час удосконалення цих математичних моделей потрібно також розробити алгоритми опрацювання інформації про температуру випікання за допомогою структур з комбінованими датчиками (пірометр + термомпари), а також температурними сканерами. Наявність точної математичної моделі тунельної печі також дає можливість дослідити застосування предиктивних систем регулювання температури в печі із врахуванням багатозонної структури. Одним з потрібних напрямів моделювання даного

процесу є виокремлення у структурі печі її теплосприймаючих елементів, що дозволить виконувати комп'ютерне дослідження з використанням різних джерел отримання тепла.

Вдосконалення технічних засобів автоматизації. Створення точних систем вимірювання температури на основі удосконалення алгоритмів опрацювання інформації від датчиків температури. Як видно з виконаного у цій роботі аналізу джерел, перспективним напрямом є розроблення активних температурних сканерів з двокоординатними системами їх переміщення. Розроблення складних виконавчих пристроїв для таких сканерів дозволить відтворювати різнотемпературні зони в тунельних печах.

Економічна оптимізація. Використання електричних джерел отримання тепла, як основного засобу випікання продукту, що включає в себе пошук оптимальних рішень щодо регуляторів нагріву, потребує подальших досліджень конструктивних особливостей випікаючих плит, та роботи над збільшенням ефективності систем нагріву.

Висновки

Традиційні методи побудови печі з використанням газового нагріву зазвичай використовують доволі просту схему регулювання температури випікання. Простота використання такої системи і досі виглядає привабливим рішенням з точки зору дешевого виробництва, однак, стрімкий технологічний прогрес, а також зростання обсягів виробництва потребують інноваційних рішень, що дозволять підвищити ефективність цих виробництв.

Загальним напрямком розвитку тунельних вафельних печей є розроблення схем керування нагрівом для організації різнотемпературних зон. Перехід до такої схеми регулювання на повнорозмірній вафельній печі потребує великих капіталовкладень, тому концепція повинна бути добре аргументованою.

Найкращим способом досліджень багатозонної структури є застосування методів моделювання для створення цифрової копії (близнюка) досліджуваного устаткування. Розроблення структури зонального керування вафельною піччю повинно зменшити витрати енергоносія та зменшити відхилення температури випікання від регламентованого значення. Багатозонна схема керування процесом випікання для печі що використовує енергію від спалювання газу – полягає у збільшенні кількості пальників, а також зміні алгоритму керування виконавчим пристроєм.

Перспективним напрямом підвищення ефективності тунельних вафельних печей є використання електричної енергії для нагріву печі, що потребує розроблення систем індивідуального керування температурою кожної плити. Початковий етап побудови системи автоматизації що виконує індивідуальне регулювання температури має високу вартість, тому потребує попередніх дослід-

жень, зокрема, використовуючи методи комп'ютерного моделювання.

Спільним напрямом проведення досліджень незалежно від типу використовуваної енергії є пошук рішення, що покращить метрологічні характеристики результату вимірювання температури випікаючих плит у тунельній печі. У випадку отримання позитивних результатів дослідження інноваційного методу вимірювання температури поверхні сегментів вафельної печі, відкривається перспектива впровадження індивідуального керування температурою плит. Таким перспективним методом вимірювань є метод формування матриці вимірюваних значень температури випікаючих плит.

Література

- [1] A sustainable food system for the European Union. Berlin: SAPEA, 2020.
DOI: 10.26356/sustainablefood
- [2] C. Mbow, C. Rosenzweig, L. G. Barioni, T. Benton, et al., "Chapter 5: Food Security". IPCC SRCCL 2019. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/2f-Chapter-5_FINAL.pdf
- [3] F. Gordon, Climate Change Policies after the 2015 Paris Agreement. L'Europe en Formation. 2016. vol. 380, no. 2. P. 13. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3917/eufor.380.0013>
- [4] Global GHG emissions by sector 1990-2023 | Statista. Statista. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1423179/global-ghg-emissions-by-sector-annual/>
- [5] Köklü, U., Yıldız, M., & Karataş, M. (2025). Investigation of the effects of wafer-baking plates on thermal distribution, wafer thickness, and wafer color distribution. *Applied Sciences*, vol. 15, no. 1, 466, 2025. DOI: 10.3390/app15010466
- [6] R. E. Gosselin, (1984). Baking plate for baking machine. U.S. Patent No. 4,438,685. United States Patent and Trademark Office.
- [7] P. Scheckel, *Home Energy Diet: How to Save Money by Making Your House Energy-Smart*. New Society Publishers, Limited, 2005.
- [8] M. Carzino, G. Stanescu, M. Errera, "Finned wafer baking plates for heat transfer and distribution", *Seatific Engineering Research Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 80-89. DOI: 10.14744/seatific.2022.0007
- [9] A. Asthana, S. Mukherjee, & E. Purlis, "Waste heat recovery from industrial baking ovens", *Energy Procedia*, vol. 123, pp. 321–328, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.259
- [10] A. Asthana, S. Mukherjee, & E. Purlis, "Achieving operational excellence for industrial baking ovens", *Energy Procedia*, vol. 161, pp. 395–402, 2019. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.100
- [11] F. Pask, P. Lake, A. Yang, H. Tokos, & J. Sadhukhan, "Industrial oven improvement for energy reduction and enhanced process performance", *Clean Technologies and*

- Environmental Policy*, vol. 19, pp. 215–224, 2017.
DOI: 10.1007/s10098-016-1206-z
- [12] J. Steinbach, L. Jadachowski, A. Kugi, & A. Steinböck, “Optimal design of baking plates for an inductive wafer baking oven”, in *Proceedings of the COMSOL Conference 2023*. COMSOL.
- [13] J. Steinbach, L. Jadachowski, A. Steinböck, & A. Kugi, “Modeling and Optimization of an Inductive Oven with Continuous Product Flow”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 27, pp. 184–189, 2022.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.10.509
- [14] E. C. Ogu, J. Ekundayo, O. Olumide, “Temperature control system”, BSc thesis, School of Science and Technology, Babcock University, 2011.
- [15] Temperature measurement. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Temperature_measurement
- [16] Moulded Wafers - Hebenstreit. [Online]. Available: <https://www.hebenstreit.de/en/products/flat-wafers/moulded-wafers>
- [17] Franz Haas SWAKT-Eco Automatic Wafer Baking Oven | Bühler Group. Bühler Group | Innovations for a better world. [Online]. Available: https://www.buhlergroup.com/global/en/products/franz_haas_swakt-ecowaferbakingoven.html
- [18] І. Брао, “Аналіз проблематики перспективних напрямів розвитку безконтактної термометрії”, *Вимірвальна техніка та метрологія*, Вип. 75, с. 40-44, 2014.
- [19] K. Kroner, M. Wicker, “Regulation of air/gas ratio in industrial heating systems”, vol. 55, pp. 263–269, 2006.
- [20] K. Warwick, “Neural network-based control systems in food processing”, in *IEE Colloquium on Automation and Control in Food Processing*, 3 April 1992, London, UK, 4/1-4/5.
- [21] Керування потужністю печей за допомогою імпульсного горіння. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.promgas.com.ua/uk/pulse-firing-ua/>
- [22] R. Van Dinter, B. Tekinerdogan, C. Catal, “Predictive Maintenance using Digital Twins: A Systematic Literature Review”, *Information and Software Technology*, vol. 15, pp. 107008, 2022.
DOI:10.1016/j.infsof.2022.107008

UDC 681.5

Y.V. Stoliarskyi, O.M. Khymko*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine***ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF AUTOMATION SYSTEMS FOR TUNNEL WAFER OVENS**

This article provides a review and analysis of recent publications in the field of industrial automation applied to wafer-baking technologies. Based on this analysis, key characteristics of existing automation systems were generalized, and promising directions for further research were identified. Particular attention is devoted to the analysis of the tunnel oven as a control object. The study confirms that temperature is the main input within controlling of the wafer baking process in a tunnel oven. It also highlights key features of temperature-control systems in industrial ovens, including the high thermal inertia of both the baking process and the primary temperature transducers used in industry.

The article reviews established methods for measuring temperature in tunnel ovens: the contact method using thermocouples, the non-contact method using infrared pyrometers, and a combined method integrating both techniques. The advantages and limitations of each method are considered. In particular, infrared pyrometers are shown to provide accuracy sufficient for industrial measurement of the temperature on the surface of baking plates, while the additional thermocouple measurement of the baking chamber temperature serves as a reliable intermediate reference, enhancing system stability and reducing oscillatory process.

Special emphasis is placed on various temperature-control systems used in tunnel ovens. The study analyzes technical solutions such as multi-burner gas heating systems and electric heating with matrix control of heating elements. It is demonstrated that pulse-modulated flame-power control offers advantages over continuous control. The main benefits of pulsed control include lower cost of the required components and simplified maintenance. Among electric-heating options, the most effective—requiring no major structural modifications to the tunnel oven—is the use of resistive heaters mounted directly on the surface of the baking plates. The use of electrical energy also enables a reduction in the resources required to control heating of individual oven segments.

Keywords: automation system, tunnel oven, wafer baking, control object, temperature measurement, pulse control.

*Надійшла до редакції
27 жовтня 2025 року*

*Рецензовано
19 листопада 2025 року*



© 2025 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).