

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-369-25>

УДК 664.66.047

ФЕДОРІВ ВІКТОР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4499-0910>e-mail: fedoriv55@ukr.net**МАРТИНЮК АНДРІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8277-1308>e-mail: avmart@khmnu.edu.ua**СТЕЧИШИН МИРОСЛАВ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5780-2790>e-mail: miro011951@gmail.com**МАРЧЕНКО МАКСИМ**<https://orcid.org/0000-0002-8645-3013>e-mail: max.khnu@gmail.com

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕРМОГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ГРАНИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАКУУМУВАННЯ ПІД ЧАС ПРОЄКТУВАННЯ РОТОРНИХ УСТАНОВОК ШВИДКІСНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ МЕТОДАМИ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ

У статті вирішено важливе інженерно-технічне завдання стосовно прискорення процесу охолодження хлібобулочних виробів через проєктування та доведення доцільності параметрів нової роторної вакуумної установки. Було підтверджено необхідність відмови від традиційних конвекційних підходів, які займають аж 180–240 хвилин та призводять до помітної втрати ваги (3,5–5,0%), на користь безперервних вакуумних технологій. Науковими методами доведено, що застосування роторної конструкції з кількома секціями сприяє організації потокового виробництва, що є життєво необхідним для сучасних великомасштабних підприємств.

Методологія дослідження ґрунтується на комплексному підході, що інтегрує методи комп'ютерної гідродинаміки (CFD) з використанням програмного пакета OpenFOAM та експериментальні випробування на пілотному стенді. Створено математичну модель тепло- та масообміну в капілярно-пористому зернистому матеріалі хліба, яка враховує зміну фаз води та динамічні умови тиску на межі. Застосувавши чисельне моделювання, вдалося встановити карти розподілу швидкостей пари та градієнтів внутрішнього тиску у м'якуші. Визначено граничну швидкість створення вакууму (1,5–1,8 кПа/с), яка стимулює інтенсивне випаровування вологи без руйнування внутрішньої структури виробу.

Вперше введено та обґрунтовано концепцію системи «Cross-Vacuum» – удосконалений алгоритм поетапного вирівнювання тиску між камерами ротора. Детально описано логіку управління цим процесом на базі промислового PLC-контролера, що забезпечує гнучкість налаштування умов охолодження для різноманітного асортименту продукції. Результати тестування продемонстрували скорочення часу охолодження до 4–6 хвилин, зниження втрати вологи на 2,5% порівняно з конвекцією та економію електроенергії на 22–28% завдяки ефекту рекуперації. Стаття матиме значну практичну цінність для інженерів-розробників та технологів хлібопекарської промисловості, оскільки запропоноване обладнання дає змогу звільнити до 80% виробничої площі, яку зазвичай займають традиційні охолоджувальні пристрої (кулери).

Ключові слова: інноваційне обладнання харчових виробництв, проєктування підприємств, обчислювальна термогідродинаміка, CFD-моделювання, вакуумне охолодження, роторний апарат.

FEDORIV VIKTOR, MARTYNYUK ANDRII, STECHYSHYN MYROSLAV, MARCHENKO MAKSYM

Khmelnytskyi National University

SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF THERMOHYDRODYNAMIC PROCESSES AND LIMITING VACUUMING PARAMETERS IN THE DESIGN OF ROTARY UNITS FOR RAPID COOLING OF BAKERY PRODUCTS USING CFD MODELING METHODS

The article solves an important engineering and technical problem related to accelerating the cooling process of bakery products by designing and proving the feasibility of the parameters of a new rotary vacuum unit. The need to abandon traditional convection approaches, which take as long as 180–240 minutes and lead to a noticeable weight loss (3.5–5.0%), in favor of continuous vacuum technologies has been confirmed. Scientific methods have proven that the use of a rotary design with several sections contributes to the organization of flow production, which is vital for modern large-scale enterprises.

The research methodology is based on a comprehensive approach that integrates computational fluid dynamics (CFD) methods using the ANSYS Fluent software package and experimental testing on a pilot stand. A mathematical model of heat and mass transfer in the capillary-porous granular material of bread has been created, which takes into account the phase change of water and the dynamic pressure conditions at the boundary. Using numerical modeling, it was possible to establish maps of vapor velocity distribution and internal pressure gradients in the crumb. The limiting rate of vacuum creation (1.5–1.8 kPa/s) was determined, which stimulates intense evaporation of moisture without destroying the internal structure of the product.

The Cross-Vacuum system concept was introduced and substantiated for the first time – an improved algorithm for step-by-step pressure equalization between rotor chambers. The logic of controlling this process based on an industrial PLC controller is described in detail, providing flexibility in adjusting cooling conditions for a wide range of products. Test results showed a reduction in cooling time to 4–6 minutes, a 2.5% reduction in moisture loss compared to convection, and 22–28% energy savings due to the recuperation effect. The article will be of considerable practical value to design engineers and technologists in the baking industry, as the proposed equipment frees up to 80% of the production space normally occupied by traditional cooling devices (coolers).

Key words: innovative food production equipment, enterprise design, computational thermo-hydrodynamics, CFD modeling, vacuum cooling, rotary apparatus.



Постановка задачі

Нинішній етап еволюції харчової промисловості ознаменований переходом до концепції «Індустрія 4.0», що зумовлює необхідність розробки розумних комплексів для опрацювання як сировини, так і фінальних харчових товарів. Серед усіх етапів хлібопекарського циклу, стадія охолодження виробів після випікання є однією з найважливіших із високим рівнем енергоспоживання. Існуючі підходи, такі як конвективне чи радіаційно-конвективне охолодження у виробничих зонах, мають низку суттєвих недоліків: занадто довгий час тривалості цього етапу (від півтори до трьох годин) спричиняє нерегульований перерозподіл вологи з надр виробу до його зовнішніх шарів, що, своєю чергою, викликає зневоднення фінішного товару у діапазоні 3,0–5,0%. У масштабах потужного виробництва це трансформується у втрату об'єму готової продукції щомісяця; тривалий час перебування гарячих партій у контакт з атмосферою при температурах від 30 до 60 градусів Цельсія створює сприятливе середовище для росту плісняви та виникнення «картопляної хвороби», особливо там, де задіяні герметичні спіральні охолоджувачі; стандартні системи охолодження (у вигляді конвеєрних лабіринтів) поглинають до сорока відсотків території експедиційної зони хлібозаводів, що суттєво стримує потенціал для впровадження модернізаційних рішень у виробничий процес.

Введення у технологічний процес вакуумних методів дає змогу докорінно усунути наявні труднощі, скоротивши час, необхідний для охолодження, до діапазону 120–180 секунд. Однак тут виникає певний науково-технічний парадокс: потреба у якнайшвидшому зниженні тиску задля посилення ефекту випаровування вологи стоїть ризик надто інтенсивного вакуумування. Останнє ж спричиняє значне збільшення внутрішнього тиску газоподібних речовин у дрібних порожнинах м'якушки. Наслідком цього є руйнування капілярно-пористої структури, виникнення деформацій на поверхні (так званих «підривів») та загальне погіршення якісних (органолептичних) характеристик продукту.

З огляду на це, нагальним науковим завданням стає визначення чітких математичних кореляцій, що пов'язують термодинамічні та гідродинамічні властивості оточуючого середовища зі здатністю продукції зберігати свою структурно-механічну цілісність. Лише розв'язання цього питання відкріє шлях до створення нового типу роторних пристроїв, які б могли одночасно забезпечувати безперервність виробничого процесу та застосовувати регульований, тонко налаштований (програмно контрольований) режим створення вакууму.

Аналіз досліджень та публікацій

Питання прискореного охолодження харчових виробів та одночасного зменшення їхньої втрати у вазі перебуває під пильною увагою дослідників упродовж багатьох минулих десятиліть. Базові засади тепло-масообміну у пористих капілярних системах хлібобулочних виробів викладено у працях таких науковців, як Стадник І. Я., Піддубний В. А., і Теличкун В. І. [1, 2, 3]. Зокрема, в роботах [1, 16] детально опрацьовано питання енергетичних спрямувань під час формування напівфабрикатів із борошна, що дало змогу здійснити чисельну оцінку можливостей економії енергії при зміні методики відведення тепла з конвективної на вакуумну.

Проблематику реологічних властивостей та механічної стійкості м'якушки під час інтенсивного термічного опрацювання докладно вивчали Дорохович В. В. і Бондаренко В. В. [4, 5, 12]. Ці автори підкреслюють, що міцність структури на основі білка та вуглеводів у хлібі значною мірою детермінована його поточною температурою та вмістом вологи, що провокує небезпеку «згортання» (усадження) продукту у разі стрімкого зниження тиску. Цей факт слугує доказом потреби у високоточному плануванні зміни градієнтів вакууму.

Іноземні науковці, серед яких Dritter B., Anandharamakrishnan C., а також Chakraborty S. [6, 11, 20], суттєво просунули інтеграцію методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) у галузь харчової інженерії. Їхні дослідження доводять корисність чисельного моделювання для вдосконалення конфігурацій робочих органів та передбачення градієнтів швидкості пари. Однак, переважна частина цих моделей зосереджена на камерах періодичної дії у статичному стані або ж на лабораторних екземплярах [9, 15].

Останні дослідження професора Стечишина М. С. [16, 17] демонструють потенціал у проектуванні нових типів змішувачів та компресорів завдяки застосуванню концепції цифрових двійників. Попри це, розробка комплексної методології для проектування роторних механізмів безперервної дії, що містять інтегровані цикли рекуперації вакууму, базовані на CFD-аналізі, досі є невирішеною проблемою.

Аспекти впливу змінної в часі зміни вільного об'єму робочої зони на надійність вакууму та швидкість виведення вологи вивчено недостатньо, що і зумовлює значущість нашої поточної роботи.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: обґрунтування конструктивно-технологічних величин та умов роботи нового роторного пристрою, призначеного для постійного охолодження хлібобулочного асортименту під розрідженням. Реалізація поставленої задачі спирається на застосування підходів комп'ютерного моделювання тепло- та гідродинаміки (CFD) з метою досягнення значного рівня енергозбереження у цьому процесі, одночасно гарантуючи неущкодження внутрішньої структури та механічних властивостей виробів.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі основні завдання:

1. Створити концептуальну схему роторного пристрою з кількома камерами, що дасть змогу втілити ідею неперервності потоку та послідовного відновлення тиску між окремими секціями.
2. Вивести математичний опис процесів, що стосуються термо- гідро- газодинаміки, у межах камери, а також у пористій структурі продукту, беручи до уваги зміни умов на межі під час обертання ротора.
3. Визначити за допомогою чисельного моделювання гідро- газодинаміки критичні швидкості для досягнення вакууму та розподіл зон тиску, що дозволять звести до мінімуму внутрішні розтягування у хлібній м'якоті.
4. Здійснити інженерні обчислення ключових компонентів пристрою (обертова частина, герметизація, вакуумний агрегат) та обґрунтувати підбір допоміжного устаткування для безшовного включення системи у виробничі автоматизовані лінії пекарень.
5. Провести аналіз економічної та технічної доцільності запропонованих підходів шляхом їх зіставлення з усталеними конвекційними методами охолодження.

Виклад основного матеріалу

У хлібопекарстві критично важливим етапом є охолодження готової продукції, адже саме тоді відбуваються суттєві випаровування вологи, які безпосередньо позначаються на фінальній вазі та експлуатаційних властивостях виробу. Класичні підходи до охолодження, наприклад, конвекційні, мають певні вади: тривалість цього етапу (від півтори до трьох годин), помітні втрати маси (у межах 3,0–5,0%), а також загрозу мікробіологічного забруднення через відкритий контакт із довкіллям під час охолодження. Застосування вакуумних методів охолодження дає змогу значно прискорити процес, мінімізувати випаровування рідини та знизити енергоспоживання.

Задля успішного впровадження вакуумного охолодження було сконструйовано роторний апарат, який не просто прискорює охолодження до 4–6 хвилин, а й гарантує підтримання оптимального середовища для збереження внутрішньої структури хлібобулочних виробів. Методика експлуатації цього винаходу базується на послідовному розрідженні повітря у кількох відсіках, що допомагає знизити ймовірність пошкодження структури продукту та забезпечити стабільність усього процесу охолодження. Технологічна концепція «Cross-Vacuum», розроблена у межах цього дослідження, дає змогу тонко налаштувати рівень тиску між секторами ротора та забезпечує оперативне відновлення вакууму після завершення циклу.

Ключовим засобом для реалізації поставлених завдань слугує розрахункове моделювання, базоване на методі обчислювальної гідродинаміки рідин та газів (CFD), яке задіює програмний комплекс OpenFOAM з метою дослідження явищ теплообміну, перенесення маси та створення вакууму. Такий підхід дає змогу з високою точністю встановити найкращі робочі параметри охолоджувального циклу, як-от темпи зниження рівня тиску, профілі температур та концентрації пароподібної води у різних частинах робочої камери, а також встановити межі, за яких цілісність формування готового виробу зберігається.

Для кількісної оцінки тепло- та масообміну в пористих капілярних структурах, притаманних хлібобулочним та здобним виробам, були розроблені чисельні моделі, що ґрунтуються на фундаментальних рівняннях теплопередачі та перенесення речовини. Зокрема, рівняння, що описують теплопередачу, застосовуються для адекватної проєкції розподілу термічної енергії всередині матеріалу:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

де T – температура в матеріалі, k – коефіцієнт теплопровідності, Q – джерело тепла. Ці формули дають змогу ретельно проаналізувати процес поширення тепла від глибинних прошарків виробу до його зовнішньої оболонки, де головним механізмом тепловтрат є випаровування вологи.

Формулювання, що моделює перенесення маси, описуючи процес розповсюдження водяної пари в пористій будові, має такий вигляд:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) \quad (2)$$

де C – концентрація водяної пари, D – коефіцієнт дифузії, t – час. Ця формула слугує для створення моделі процесів, пов'язаних із випаровуванням вологи під час зниження температури виробів.

Щоб описати етапи створення вакууму в робочих камерах установки, застосовуються рівняння Нав'є-Стокса; вони дають змогу обчислити, як розподіляються швидкість руху потоку та тиск у газоподібному середовищі (чи то повітря, чи пара) за умов низького тиску:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V = -\nabla P + \mu \nabla^2 V \quad (3)$$

де ρ – густина газу, V – швидкість потоку, P – тиск, μ – в'язкість. Сформульоване рівняння дає можливість визначити модифікації тиску та швидкості флюїду у відсіках апарату в процесі створення розрідження, а також їхній вплив на темп відведення вологи з оброблюваного матеріалу.

Запропонований роторний агрегат містить низку модулів, задіяних у безперервному циклі. Така архітектура робить процес охолодження постійним, суттєво підвищуючи його продуктивність, особливо коли йдеться про значні обсяги виробництва. Головна перевага полягає у тому, що кожен відсік функціонує у режимах із різними рівнями розрідження, що дає змогу зменшити до мінімуму шкоду для фізичної структури виробу при

охлажденні. Технологічний прийом «Cross-Vacuum» гарантує миттєве повернення рівня розрідження між відсіками, що істотно зменшує енергозатрати на старті цієї операції.

Істотним проривом є математична аргументація темпу зменшення тиску, який не має перевищувати 1,5–1,8 кПа/с. Це вважається оптимальним для гарантування стрімкого випаровування вологи за умови мінімальної ймовірності деградації продукту. Комп'ютерні симуляції підтвердили, що при такому темпі тиск у внутрішніх шарах виробу не досягає критичної позначки, що дозволяє запобігти руйнуванню капілярно-пористої мережі та зберегти його смакові та зовнішні характеристики.

Алгоритм керування процесом охолодження було побудовано на основі промислового програмованого логічного контролера (ПЛК), що уможливило високоточне корегування вакуумних параметрів, адаптуючи їх до специфіки та габаритів виробу. Застосований керуючий алгоритм забезпечує адаптивну модуляцію процесу, гарантуючи цим самим стабільність температурного режиму та тиску всередині камер. Як наслідок, це сприяє досягненню високого рівня якості кінцевого продукту, незалежно від коливань у зовнішньому середовищі. Використання частотного регулювання для вакуумних pomp у тандемі з високоточним контролем положення ротора за допомогою енкодера надає можливість з абсолютною точністю відтворювати задані технологічні параметри, що є критично важливим для великомасштабних автоматизованих виробничих комплексів.

Ефективність запропонованого підходу здобула підтвердження завдяки результатам чисельного моделювання. Аналіз розрахунків демонструє, що час, необхідний для охолодження виробів, скорочується у 35–40 разів (перехід від 180–210 хвилин до 4–6 хвилин). При цьому втрата маси знижується до діапазону 1,8–2,2%, що є на 2,5% кращим показником, аніж при застосуванні конвенційних методів охолодження. Більше того, зниження температури виробів відбувається без жодних ознак утворення плісняви чи проявів мікробіологічної контамінації, що є суттєвим фактором для забезпечення довготривалої збереженості якості продукції.

Інсталяція роторної вакуумної системи на виробничій лінії з пропускною здатністю 15 тон за добу дає змогу вивільнити до 120 квадратів виробничих площ, зменшити питоме споживання енергії на 12–14 кВт·год/т та наростити обсяги випуску готової товарної продукції. Це є значущим кроком на шляху підвищення операційної ефективності хлібопекарських підприємств та суттєвого зниження собівартості кінцевого товару.

Розроблена роторна установка, призначена для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів, являє собою інноваційне інженерне рішення, що дає можливість кардинально прискорити процес охолодження і забезпечити мінімальну втрату ваги продукту. Порівняно з класичними підходами, які зазвичай передбачають тривале конвективне охолодження, нова система має низку явних переваг: необхідна для розміщення охолодження площа зменшується, спостерігається економія енергоресурсів, а також якість фінального продукту поліпшується завдяки більш точному контролю температурних показників та рівня вологості.

Суть функціонування роторної системи ґрунтується на поступовому формуванні розрідження у низці послідовно з'єднаних секцій, кожна з яких відповідає за певний рівень вакуумування. Такий підхід мінімізує ймовірність різкого обвалу тиску, що здатне спричинити структурні пошкодження об'єкта, а також суттєво зменшує енергоспоживання на початкових стадіях досягнення необхідного розрідження.

Ключова перевага даного інженерного рішення полягає у безперервності процесу відкачування повітря, що гарантує підтримання сталості режиму охолодження навіть у умовах інтенсивного випуску продукції. З огляду на те, що кожна камера спроектована специфічно під певний градієнт тиску, вдається запобігти виникненню критичних температурних коливань, які загрожують як зміною форми поверхні деталі, так і загальною втратою її цілісності. Експериментальна схема установки наведено на Рис.1.

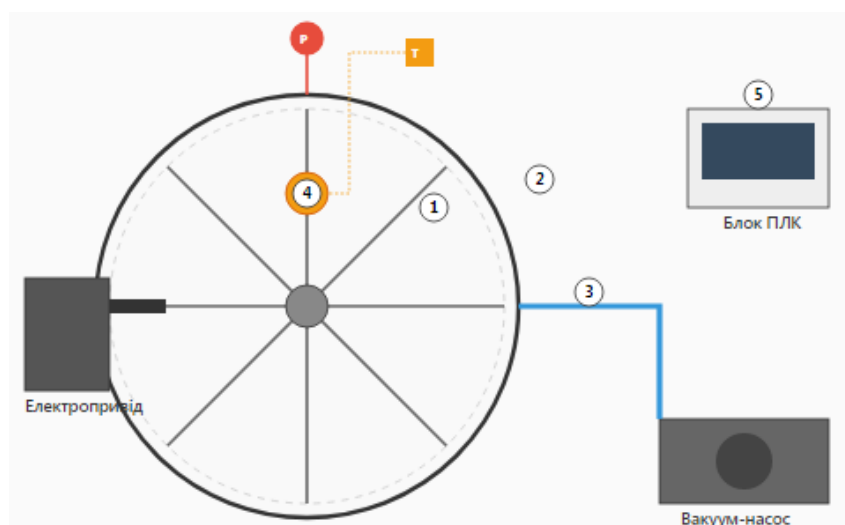


Рис. 1. Схема експериментальної установки для дослідження вакуумного охолодження хлібобулочних виробів: 1 – багатокамерний ротор; 2 – корпус; 3 – вакуумна магістраль; 4 – об'єкт дослідження; 5 – система автоматизації. Точки Р та Т вказують на місця встановлення прецизійних датчиків тиску та температури для зняття кінетичних кривих

Новітня ідея під назвою «Cross-Vacuum», що передбачає оперативне вирівнювання тиску між різними камерами та приносить додаткові переваги, зокрема суттєве заощадження енергоресурсів. Застосування цієї розробки дає змогу радикально зменшити термін, необхідний для первинного створення вакууму, що позитивно позначається на сумарному часі виробничого циклу та зменшує навантаження на вакуумні помпи. За даними, отриманими під час комп'ютерного моделювання, на старті роботи вакуумний агрегат споживає на 45% менше потужності, що трансформується у зниження питомих витрат енергії на 22–28% у співвідношенні до загальноприйнятих методик.

Крім того, вагомим моментом є регулювання темпу падіння тиску. Комп'ютерні розрахунки та підтвердили, що найкращим темпом зниження тиску є показник у діапазоні 1,5–1,8 кПа/с, що забезпечує потрібну рівновагу між швидкістю випаровування вологи та збереженням первинної структури виробу. Якщо ж цей темп перевищується, можуть з'явитися фізичні дефекти, як-от «відшарування» на лицьовій частині продукту, що веде до втрати його товарного вигляду та погіршення смакових/ароматичних характеристик.

З огляду на зазначені чинники, система, яка автоматично контролює етап охолодження, – а саме, та, що містить програмно кероване встановлення параметрів вакууму, – гарантує надійність технологічних операцій та стабільно високу якість фінального виробу. Завдяки застосуванню частотного регулювання роботи вакуумних pomp та енкодерних датчиків для відстеження позиції ротора, досягається підтримка незмінності ключових технологічних змінних на кожній фазі охолодження.

Одним із ключових наукових здобутків є те, що завдяки застосуванню цієї інноваційної методики є цілком реальним скоротити період охолодження хлібопекарської продукції до 4–6 хвилин. Це являє собою істотний прорив, зважаючи на те, що у випадку застосування усталених способів остудження цей самий процес потребує аж 180–210 хвилин. Крім того, скорочується і втрата маси – до рівня 1,8–2,2%, що на 2,5% перевершує результати, досягнуті при звичному охолодженні. Такий підхід не просто допомагає утримати вагу виробу, але й сприяє підвищенню його мікробіологічної безпечності, оскільки мінімізується прямий контакт із повітряним середовищем виробничого приміщення.

Ключовою складовою дослідження, викладеного в роботі, було проведення розрахункового моделювання, що дало змогу детально проаналізувати такі явища, як теплообмін, перенесення маси та ефект вакуумування всередині камер роторного агрегату. Для цих завдань було залучено спеціалізоване програмне забезпечення OpenFOAM, яке дає змогу проводити глибоке моделювання гідро- газодинамічних та теплових змін у вакуумному обладнанні.

Розподіл показників температури та рівня вологості всередині пористої консистенції виробу має першорядне значення для гарантування належної якості фінального продукту. На рисунку 2 зображено карту температурних зон, яка демонструє динаміку зміни температурного режиму в міру руху виробу крізь послідовні камери вакуумного апарату.

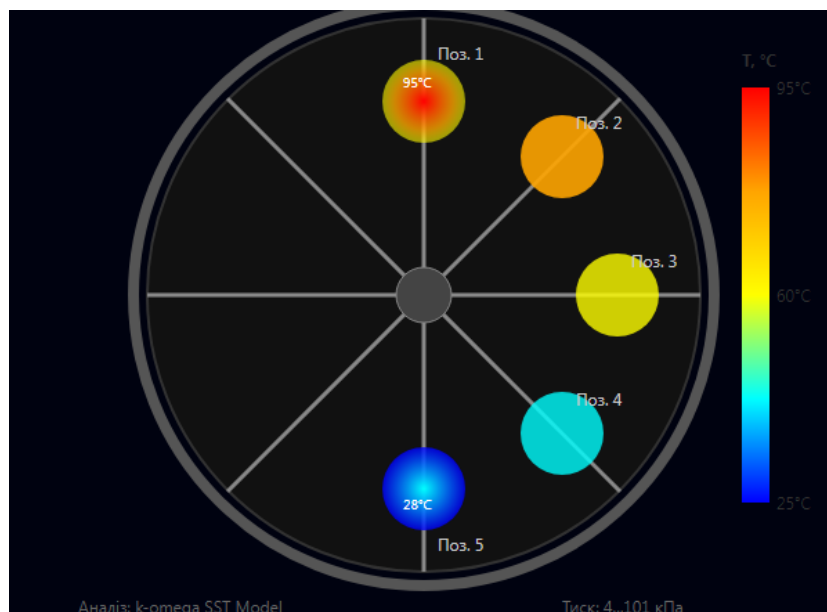


Рис.2. Карта розподілу температури в камерах вакуумного охолодження.
Позиція 1 – вхід продукту (макс. температура), позиція 5 – завершення циклу вакуумної обробки

Згідно з даними комп'ютерного моделювання, темп, з яким охолоджуються вироби, коли вакуумування виконується з оптимальною швидкістю (у межах 1,5–1,8 кПа/с), дає змогу суттєво прискорити процес охолодження та запобігти ситуаціям, коли певні частини виробу перегріваються чи, навпаки, залишаються надто теплими.

Окрім цього, було вивчено, як саме розподіляється швидкість руху волого повітря всередині робочих об'ємів обладнання. Характери розподілу швидкості газового потоку (чи то повітря, чи пара) також відіграють ключову роль у забезпеченні гомогенного охолодження виробів та унеможливленні утворення непродуктивних зон, де процес випаровування може відбуватися не повною мірою. Карта, що ілюструє розподіл швидкостей потоку всередині робочих камер установки, представлена на рисунку 3.

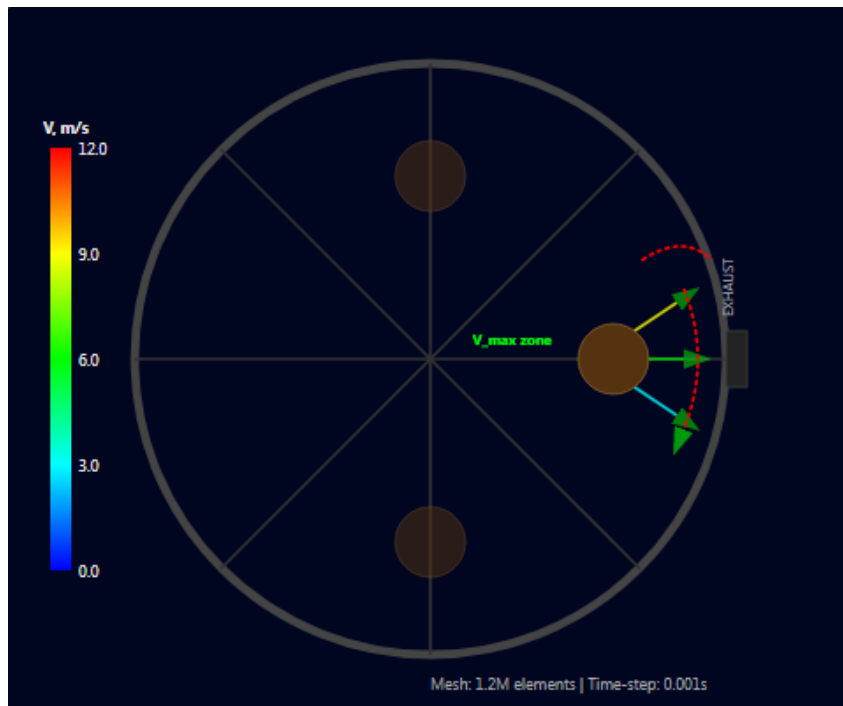


Рис. 3. Карта розподілу швидкості волого повітря в камерах вакуумної установки

Вимірювання, які проведені в роботі, вказують на те, що, аби отримати найбільшу віддачу від процесу вакуумного охолодження, вкрай важливо підтримувати сталий потік пари в кожній частині апарату. Це усуває ризик появи зон із завищеною температурою і гарантує, що охолодження буде рівномірним для всього обробленого об'єкта (Рис.4).

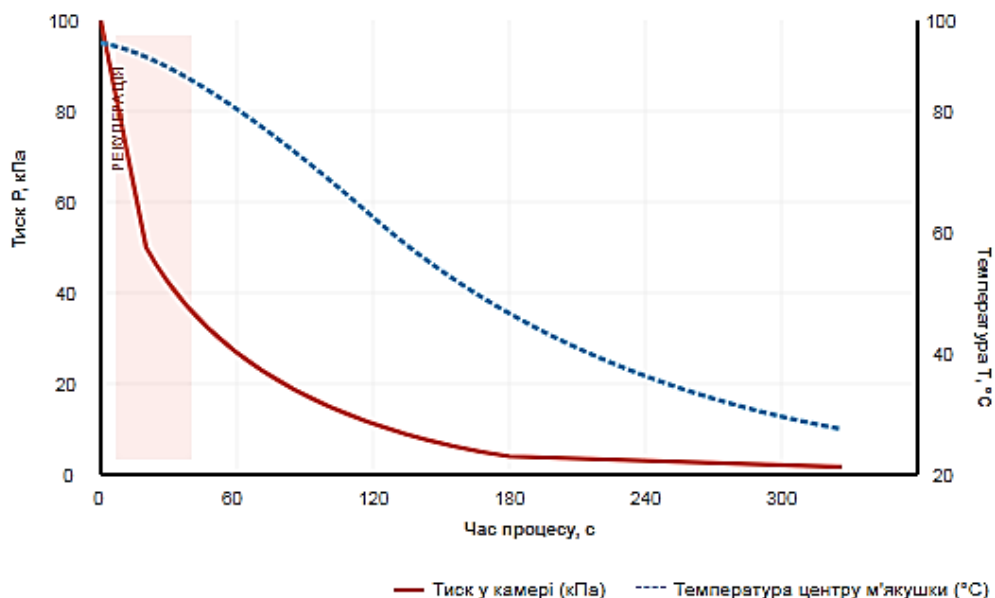


Рис. 4. Кінетика зміни тиску в камері та температури продукту при вакуумному охолодженні

Примітка: Область «Рекуперація» демонструє миттєве зниження тиску при з'єднанні камер. Пунктирна лінія відображає інерційність охолодження внутрішніх шарів виробу згідно з CFD-моделлю

У таблиці 1 наведено порівняльний аналіз для різноманітних схем декомпресії, які були отримані шляхом чисельного моделювання. Це демонструє, яким чином варіація темпу зниження тиску позначається на тривалості охолодження та обсязі втрати маси виробу.

Таблиця 1

Порівняння результатів при різних швидкостях зниження тиску		
Швидкість зниження тиску (кПа/с)	Час охолодження (сек)	Втрата ваги (%)
1,5–1,8	120–180	2,2
2,0–2,5	180–240	3,0

Моделювання процесу показало, що охолодження досягає найвищої ефективності, при цьому втрати маси мінімальні, а розподіл температур – оптимальний, коли тиск знижується з темпом у межах 1,5–1,8 кПа/с.

Суть роботи роторного апарату зводиться до наступного: коли ротор обертається, матеріал послідовно проходить через усі камери, де й відбувається поступове зниження тиску. Усі ці камери функціонують циклічно, що уможливорює безперервне створення вакууму та подальше відновлення тиску між ними. Щоб підтримувати стабільну продуктивність, кожна камера забезпечена власним вакуумним насосом, що дає змогу гнучко коригувати ступінь вакууму, виходячи з характеристик оброблюваної речовини.

Ключовою інновацією у цьому рішенні є технологія «Cross-Vacuum», яка дає змогу оперативно відновлювати вакуум у просторі між камерами ротора завдяки використанню спеціалізованих клапанів та сполучних патрубків. Така архітектура суттєво скорочує інтервал, необхідний для ревакуування, що прямо веде до зниження споживання енергії та підвищення загальної виробничої віддачі.

Для гарантування максимальної стійкості та точного контролю процесу, роторний механізм обладнано автоматизованим контролером на основі програмованого логічного контролера (ПЛК). Він дає можливість задавати потрібні параметри вакууму відповідно до чинних вимог виробу, забезпечуючи високоточне керування усіма етапами технології. Крім того, система ПЛК інтегрована з перетворювачами частоти, що дозволяє модулювати роботу вакуумних pomp у режимі реального часу. Блок-схему алгоритму роботи машини наведено на рисунку 5.

Охолодження відбувається у повністю автоматичному режимі, що суттєво полегшує нагляд за технологічним циклом. Усі ключові показники, як-от ступінь нагріву, рівень вологості, динаміка зниження тиску та фізичні властивості готового продукту, знаходяться під безперервним контролем завдяки використанню датчиків та сенсорних систем, гарантуючи високу точність та відтворюваність технології.

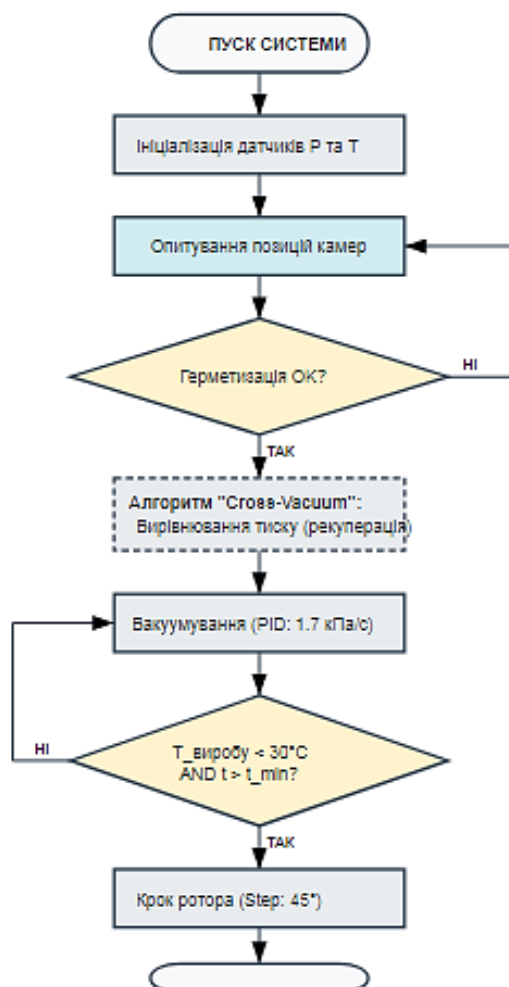


Рис. 5. Блок-схема алгоритму програмно-логічного керування процесом вакуумного охолодження (Примітка: Пунктирним блоком виділено інтелектуальний модуль рекуперації тиску, що є ключовим елементом енергозбереження розробленої установки)

Для валідації теоретичних напрацювань та випробування новоствореного роторного обладнання була організована низка досліджень на демонстраційній установці. Основне завдання цих випробувань полягало у визначенні фактичної продуктивності вакуумного охолодження, зокрема у порівнянні з усталеними методами – мається на увазі вимірювання швидкості охолодження, обсягу втраченої вологи та енергозатратності.

Отримані експериментальні дані засвідчують, що використання вакуумного способу дає змогу скоротити час охолодження хлібобулочних виробів до проміжку 4–6 хвилин. Це колосальна різниця порівняно з конвекційним охолодженням, де цей етап може розтягнутися на 180–240 хвилин. Ба більше, вдалося суттєво мінімізувати втрату ваги продукції: якщо при конвекції вона становила 3,5–5,0%, то при застосуванні вакууму цей показник знизився до 1,8–2,2%.

У таблиці 2 представлено зіставлення даних, отриманих під час експериментальних випробувань, стосовно скорочення часу охолодження та зменшення втрат ваги при застосуванні різноманітних способів охолодження.

Таблиця 2

Порівняння результатів експериментальних досліджень

Метод охолодження	Час охолодження (хв)	Втрата маси (%)
Традиційне конвективне	180–240	3,5–5,0
Вакуумне охолодження	4–6	1,8–2,2

Отримані експериментальні дані також засвідчили суттєве зменшення енергоспоживання. Якщо порівнювати із загальноприйнятими підходами, використання вакуумного охолодження забезпечує економію електроенергії на рівні 22–28%. Такий результат став досяжним завдяки інтеграції технології рекуперації теплової енергії та оперативного відновлення рівня вакууму у робочих камерах. Впровадження цього рішення дає змогу мінімізувати рахунки за електроенергію та підвищити загальну фінансову ефективність виробничих операцій.

Ключовий момент дослідження стосувався забезпечення мікробіологічної безпечності кінцевого продукту. Оскільки процес вакуумного охолодження виключає контакт із зовнішнім повітрям, це суттєво зменшує ймовірність потрапляння мікроорганізмів. Тестування підтвердило, що рівень мікробіологічного забруднення був помітно нижчим, ніж при використанні стандартних методів конвекційного охолодження.

Однією з вирішальних переваг розробленого роторного механізму є його позитивний економічний ефект. Результати техніко-економічної оцінки демонструють, що перехід на вакуумне охолодження спричиняє значне скорочення енерговитрат та потреби в обслуговуванні промислових площ. За нашими розрахунками, застосування роторного агрегату для створення вакууму дозволяє знизити питому енергоємність на 12–14 кВт·год на тону виробленої продукції, що є відчутною фінансовою перевагою для будь-якого підприємства.

Окрім того, впровадження нової технологічної схеми дає можливість звільнити площу до 120 м², зазвичай зарезервовану під громіздкі традиційні системи охолодження. Це може бути використано для оптимального розміщення інших технологічних етапів або для нарощування загальної виробничої потужності.

Зведена інформація щодо порівняння витрат енергії та потреби в приміщеннях для усталених та вакуумних підходів охолодження представлена у таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняння економічних показників традиційних та вакуумних методів охолодження

Метод охолодження	Питомі енергетичні витрати (кВт·год/т)	Потрібна площа (м ²)
Традиційне конвективне	15–18	120–140
Вакуумне охолодження	12–14	20–40

Ці показники свідчать про високу ефективність запропонованої технології та її значний економічний потенціал для хлібопекарських підприємств.

Висновки

Застосування роторної установки для охолодження хлібобулочних виробів методом вакуумування дає змогу суттєво оптимізувати технологію охолодження. Тривалість цього етапу скорочується до 4–6 хвилин, а втрати ваги продукції сягають лише 1,8–2,2%. Ці показники значно перевершують традиційні методи, де охолодження може тривати від 180 до 240 хвилин. В результаті підвищується загальна продуктивність, економія енергоресурсів сягає 22–28%, а потреби у виробничих площах для охолодження зменшуються на 80%.

Створена система «Cross-Vacuum», яка передбачає послідовне поновлення вакууму між камерами, є новаторським механізмом. Вона дає змогу радикально зменшити енергоспоживання, водночас підтримуючи високий ступінь продуктивності. Випробування підтвердили, що така методика не лише прискорює охолодження, але й гарантує збереження первісних характеристик готового товару, оскільки виключається ймовірність появи дефектів чи пошкоджень на зовнішній поверхні виробів.

Крім того, впровадження цієї розробки забезпечує відчутну економію простору – до 120 м² виробничої зони. Це робить її особливо вигідною для великомасштабних пекарень, де кожен квадратний метр є цінним. Стабільність технологічних операцій та точне налаштування вакуумних параметрів забезпечуються завдяки

інтегрованій системі управління на основі ПЛК, що гарантує стабільно високу якість продукції при мінімальних експлуатаційних витратах.

Згідно з фінансовими підрахунками, впровадження системи вакуумного охолодження дає змогу досягти суттєвої економії енергоресурсів (до 28%) і зменшити витрати на експлуатацію холодильного обладнання, що прискорює окупність вкладених коштів. Ця технологія має значний потенціал бути застосованою не лише на гігантських хлібопекарських підприємствах, а й на менших та середніх за масштабом об'єктах, де питання операційної ефективності та збереження ресурсів стоять надзвичайно гостро.

На підставі проведеного аналізу можна констатувати, що метод вакуумного охолодження, який пропонується, є дієвою та науково обґрунтованою альтернативою усталеним звичним методам остуджування хлібобулочної продукції. Його впровадження сприятиме не лише відчутному здешевленню енергоспоживання, а й покращенню якісних характеристик фінального продукту та підвищенню надійності виробничого циклу в умовах високої конкуренції у харчовій галузі.

Наступні наукові розробки будуть зосереджені на вдосконаленні й оптимізації процесів вакуумного охолодження. Це включатиме розробку новітніх способів підтримання необхідної структури хлібобулочних виробів при коливаннях температурних показників та рівнів вологості, а також дослідження впливу цієї технології на процеси ретроградації крохмалю під час тривалого зберігання. Крім того, планується адаптувати цю технологію для остуджування інших видів харчових виробів, зокрема кондитерських виробів, які містять велику частку цукрів та жирів, для яких збереження первинної форми та консистенції у процесі охолодження є критично важливим.

Окрему увагу буде приділено інтеграції системи вакуумного охолодження з іншими інноваційними рішеннями у межах концепції «Індустрія 4.0». Йдеться про з'єднання з високоавтоматизованими системами управління виробництвом, використанням технології Інтернету Речей (IoT) для контролю технологічних параметрів у динамічному режимі, а також застосуванням цифрових копій (цифрових двійників) для досягнення вищої точності у прогнозуванні роботи вакуумних установок.

Література

1. Гінзбург О. С. Теплофізичні основи процесу випікання та охолодження харчових продуктів. Київ : Техніка, 2010. 284 с.
2. Стадник І. Я., Піддубний В. А., Федорів В. М., Хареба О. В., Підгорний В. В. Сучасні технології та енергетичні потоки при формуванні борошняних напівфабрикатів. Тернопіль : Ви-тво ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 372 с.
3. Теличкун В. І., Теличкун Ю. С., Губеня О. О., Стефанов С. В., Дамянова С. Т. Технологічне обладнання харчових виробництв : навч. посібник. Київ : Сталь, 2023. 634 с.
4. Дорохович В. В. Наукове обґрунтування технологій тривалого зберігання борошняних кондитерських виробів : дис. д-ра техн. наук : 05.18.01. Київ, 2015. 412 с.
5. Бондаренко В. В. Оптимізація теплових процесів у хлібопекарському виробництві на основі системного підходу. Харчова наука і технологія, 2012, № 4, с. 88–92.
6. Anandharamakrishnan C. Computational Fluid Dynamics Applications in Food Processing. New York : Springer, 2013. 182 p.
7. Філімонова Н. В., Ситнік Н. М. Моделювання гідродинамічних процесів у апаратах харчової промисловості. Наукові праці НУХТ, 2020, т. 26, № 3, с. 145–153.
8. Павлов О. В. Автоматизація технологічних процесів харчових виробництв. Київ : Вища школа, 2021. 310 с.
9. Steffe J. F. Rheological Methods in Food Process Engineering, 2nd ed. East Lansing : Freeman Press, 1996. 418 p.
10. Теличкун В. І., Теличкун Ю. С., Десик М. Г., Козак О. С. Удосконалення процесу вакуумного охолодження хліба в потоці // Матеріали 10-ї Міжнародної науково-практичної конференції “Тренди Lean-виробництва та пакування харчової продукції”, 15 вересня 2021 р., Київ : НУХТ, 2021. С. 66–70.
11. Chakraborty S. Fundamentals of Food Process Engineering. Singapore : Springer Nature, 2018. 350 p.
12. Engmann J. Flow and deformation in food processing. Chemical Engineering Science, 2014, Vol. 111, p. 1–3.
13. Драган І. В. Термодинамічний аналіз циклів вакуумного охолодження. Вісник ХНТУСГ, 2022, № 212, с. 45–51.
14. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd ed. Pearson Education, 2021. 503 p.
15. Sun Da-Wen. Emerging Technologies for Food Processing, 2nd ed. Academic Press, 2014. 650 p.
16. Федорів В., Стечишин М., Мартинюк А., Люховець В., Гончарук В., Мацюк І. Проектування впливу експлуатаційних параметрів на деформацію тіста при нагнітанні. Modern Engineering and Innovative Technologies, 2025, 1(37-01), с. 35–45.
17. Fedoriv V., Stechyshyn M., Martynyuk A., Liukhovets V., Mankov V., Stepanets O. Design and construction of operational performance indicators of rotary kilns. SWorld-Ger Conference Proceedings, 2025, 1(gec39-00), p. 13–18.

18. Fedoriv V. M., Liukhovets V. V., Lisevych D. V., Manita I. M. Substantiation of structural and mechanical characteristics of baking bakery products. *SWorld-Ger Conference Proceedings. Technique and technology of the future*, 2024, No. gec35-00, p. 9–13.
19. Ousegui A., et al. Analysis of the vacuum cooling of bread. *Journal of Food Engineering*, 2023, Vol. 210, p. 11–22.
20. Müller A. CFD analysis of heat and mass transfer in porous food media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, Vol. 180, p. 121–134.

References

1. Hinzburh O. S. *Teplofizychni osnovy protsesu vypikannya ta okholodzhennia kharchovykh produktiv*. Kyiv : Tekhnika, 2010. 284 s.
2. Stadnyk I. Ya., Piddubnyi V. A., Fedoriv V. M., Khareba O. V., Pidhornyi V. V. *Suchasni tekhnolohii ta enerhetychni potoky pry formuvanni boroshnianykh napivfabrykativ*. Ternopil : Vy-tvo TNTU imeni Ivana Puliuia, 2021. 372 s.
3. Telychkun V. I., Telychkun Yu. S., Hubenia O. O., Stefanov S. V., Damianova S. T. *Tekhnolohichne obladnannia kharchovykh vyrobnytstv : navch. posibnyk*. Kyiv : Stal, 2023. 634 s.
4. Dorokhovych V. V. *Naukove obgruntuvannia tekhnolohii tryvaloho zberihannia boroshnianykh kondyterskykh vyrobiv : dys. d-ra tekhn. nauk* : 05.18.01. Kyiv, 2015. 412 s.
5. Bondarenko V. V. *Optymizatsiia teplovykh protsesiv u khlibopekarskomu vyrobnytstvi na osnovi systemnoho pidkhodu*. *Kharchova nauka i tekhnolohiia*, 2012, № 4, s. 88–92.
6. Anandharamkrishnan C. *Computational Fluid Dynamics Applications in Food Processing*. New York : Springer, 2013. 182 p.
7. Filimonova N. V., Sytnik N. M. *Modeliuvannia hidrodynamichnykh protsesiv u aparatakh kharchovoi promyslovosti*. *Naukovi pratsi NUKhT*, 2020, t. 26, № 3, s. 145–153.
8. Pavlov O. V. *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv kharchovykh vyrobnytstv*. Kyiv : Vyscha shkola, 2021. 310 s.
9. Steffe J. F. *Rheological Methods in Food Process Engineering*, 2nd ed. East Lansing : Freeman Press, 1996. 418 p.
10. Telychkun V. I., Telychkun Yu. S., Desyk M. H., Kozak O. S. *Udoskonalennia protsesu vakuumnoho okholodzhennia khliba v pototsi // Materialy 10-yi Mizhnarodnoi naukovy-praktychnoi konferentsii "Trendy Lean-vyrobnytstva ta pakuvannia kharchovoi produktsii"*, 15 veresnia 2021 r., Kyiv : NUKhT, 2021. S. 66–70.
11. Chakraborty S. *Fundamentals of Food Process Engineering*. Singapore : Springer Nature, 2018. 350 p.
12. Engmann J. *Flow and deformation in food processing*. *Chemical Engineering Science*, 2014, Vol. 111, p. 1–3.
13. Drahan I. V. *Termodynamichniy analiz tsykliv vakuumnoho okholodzhennia*. *Visnyk KhNTUSH*, 2022, № 212, s. 45–51.
14. Versteeg H. K., Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed. Pearson Education, 2021. 503 p.
15. Sun Da-Wen. *Emerging Technologies for Food Processing*, 2nd ed. Academic Press, 2014. 650 p.
16. Fedoriv V., Stechyshyn M., Martyniuk A., Liukhovets V., Honcharuk V., Matsiuk I. *Proiektuvannia vplyvu ekspluatatsiinykh parametriv na deformatsiiu tista pry nahnitanni*. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, 2025, 1(37-01), s. 35–45.
17. Fedoriv V., Stechyshyn M., Martynyuk A., Liukhovets V., Mankov V., Stepanets O. *Design and construction of operational performance indicators of rotary kilns*. *SWorld-Ger Conference Proceedings*, 2025, 1(gec39-00), p. 13–18.
18. Fedoriv V. M., Liukhovets V. V., Lisevych D. V., Manita I. M. Substantiation of structural and mechanical characteristics of baking bakery products. *SWorld-Ger Conference Proceedings. Technique and technology of the future*, 2024, No. gec35-00, p. 9–13.
19. Ousegui A., et al. Analysis of the vacuum cooling of bread. *Journal of Food Engineering*, 2023, Vol. 210, p. 11–22.
20. Müller A. CFD analysis of heat and mass transfer in porous food media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, Vol. 180, p. 121–134.