УДК 664.88:637.1 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.3

В. С. ВОЛОШИН
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри промислових теплоенергетичних установок
і теплопостачання
Приазовський державний технічний університет
ORCID: 0009-0005-6809-6779

В. А. БУРКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри промислових теплоенергетичних установок
і теплопостачання
Приазовський державний технічний університет
ORCID: 0000-0002-7384-4226

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ПІДХІД ТА ВИКОРИСТАННЯ РЕЗОНАНСНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У сучасному світі питання мінімізації відходів у промисловості набуває особливої актуальності, і хлібопекарське виробництво не є виключенням. Дана стаття присвячена дослідженню проблеми скорочення обсягів відходів у традиційних технологіях виробництва хліба, що широко застосовуються на підприємствах харчової промисловості. Автори наголошують, що, незважаючи на відносно невелику кількість органічних відходів, які, як правило, легко утилізуються або переробляються в післявиробничий період, значною проблемою залишаються енергетичні відходи. Їх обсяги є надзвичайно великими та співмірними зі світовими обсягами виробництва хліба, що робить цю проблему особливо значущою. Аналіз показує, що, незважаючи на наявність сучасних технологій та високі темпи виробництва хліба, питання промислових відходів не втрачає своєї актуальності та потребує комплексного вирішення. В даній роботі запропоновано результати дослідження, спрямованого на визначення теоретично обґрунтованого мінімуму відходів загального типу в технології виробництва хліба. Розроблено інноваційну методику, що дозволяє використовувати принцип термодинамічної двоєдиності. Згідно з цією методикою, принцип розглядається як механізм, що не тільки відповідає за утворення відходів у технологічному процесі, але й як основний фактор, що дозволяє мінімізувати їх утворення безпосередньо в межах самого технологічного циклу. У статті детально проаналізовано межі, які існують у досягненні оптимального результату щодо мінімізації відходів, а також розглянуто розподіл мінімально можливих відходів між різними етапами технологічного процесу. Авторами рекомендовано використовувати модифіковану енергію зовнішнього впливу, яка, на їх думку, є спроможною переробити ту частину сировини, яка за певних умов може потрапити у відходи. За допомогою нової енергії ця сировина набуває інших цінних якостей, що роблять її корисним продуктом в межах того ж технологічного циклу, таким чином зменшуючи обсяги відходів та підвищуючи ефективність виробництва. Окрему увагу в роботі приділено використанню резонансних джерел енергії для досягнення поставленої мети – максимально мінімізувати енергетичні втрати в технологічному процесі виробництва хліба. Посилаючись на теоретично обґрунтований мінімум утворення відходів, автори пропонують метод введення модифікованої енергії резонансних коливань в технологічний процес. Цей метод, як показують результати дослідження, дозволяє не тільки значно (на порядок) знизити втрати теплової енергії, але й за рахунок резонансних взаємодій з молекулами сировинної води, зменшити втрати органічних відходів до максимально можливого рівня – 3 % від загальної кількості сировини, що використовується в технологічному процесі.

Ключові слова: *промислові відходи, виробництво хліба, термодинамічна двоєдиність, мінімальне відходоутворення, енергетичні відходи, резонанс.*

V. S. VOLOSHIN
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Industrial Heat and Power Plants
and Heat Supply
Pryazovskyi State Technical University
ORCID: 0009-0005-6809-6779

V. A. BURKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Industrial Heat and Power Plants
and Heat Supply
Pryazovskyi State Technical University
ORCID: 0000-0002-7384-4226

THERMODYNAMIC APPROACH AND USE OF RESONANT ENERGY FOR WASTE MINIMIZATION IN THE FOOD INDUSTRY

In the modern world, the issue of waste minimization in industry is becoming particularly relevant, and bread-making is no exception. This article is devoted to the study of the problem of reducing waste in traditional bread production technologies, which are widely used in food industry enterprises. The authors emphasize that, despite the relatively small amount of organic waste, which, as a rule, is easily disposed of or processed in the post-production period, energy waste remains a significant problem. Their volumes are extremely large and commensurate with the world's bread production volumes, which makes this problem particularly significant. The analysis shows that, despite the availability of modern technologies and high rates of bread production, the issue of industrial waste does not lose its relevance and requires a comprehensive solution. This paper proposes the results of a study aimed at determining a theoretically justified minimum of general waste in bread production technology. An innovative methodology has been developed that allows using the principle of thermodynamic duality. According to this methodology, the principle is considered as a mechanism that is not only responsible for the formation of waste in the technological process, but also as a main factor that allows minimizing its formation directly within the technological cycle itself. The article analyzes in detail the limits that exist in achieving the optimal result in terms of waste minimization, and also considers the distribution of the minimum possible waste between different stages of the technological process. The authors recommend using modified energy of external influence, which, in their opinion, is capable of processing that part of the raw material that under certain conditions can become waste. With the help of new energy, this raw material acquires other valuable qualities that make it a useful product within the same technological cycle, thus reducing the amount of waste and increasing the efficiency of production. Special attention is paid in the work to the use of resonant energy sources to achieve the goal of minimizing energy losses in the technological process of bread production as much as possible. Referring to the theoretically justified minimum of waste generation, the authors propose a method of introducing modified energy of resonant oscillations into the technological process. This method, as the results of the study show, allows not only to significantly (by an order of magnitude) reduce thermal energy losses, but also, due to resonant interactions with raw water molecules, to reduce losses of organic waste to the maximum possible level – 3 % of the total amount of raw materials used in the technological process.

Keywords: *industrial waste, bread production, thermodynamic duality, minimal waste generation, energy waste, resonance.*

Постановка проблеми

Попри розвиненість сучасних технологій хлібопечення, проблема відходів (органічних та енергетичних) залишається актуальною. Це пов'язано з недостатньою теоретичною базою для розуміння причин їх виникнення. Принцип термодинамічної двоєдиності та розроблена на його основі методика розрахунку теоретичного мінімуму відходів дозволяють визначити можливості технології, знайти способи мінімізації відходів безпосередньо в процесі виробництва та зменшити їх утворення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Виробництво хліба, що бере свій початок в епоху розвитку землеробства, протягом тисячоліть зберегло основні етапи технологічного процесу: замішування тіста, ферментація, формування та вистоювання, випікання і охолодження [1, 2]. Сучасні технології, попри модифікації, ґрунтуються на цих базових принципах. Основні фізичні та фізико-хімічні процеси, що відбуваються при виробництві хліба [3]:

– гідратація з набуттям якості клейковини з білкової частини (глютеніну і гліадину) в замісі тіста для утримання бульбашок газу;
– ферментація (анаеробне бродіння) з переробкою борошняного цукру в CO_2 и C_2H_5OH – етанолу;
– термічні зміни з клейстеризацією крохмалю;
– реакція Майяра що супроводжує випічку.

Виробництво хліба, як і будь-який інший технологічний процес, неминуче супроводжується утворенням промислових відходів. Хоча органічні відходи в основному переробляються та утилізуються, найбільшою проблемою є втрати енергії, пов'язані з нагріванням та охолодженням продуктів у процесі виробництва. Якщо органічні відходи утилізуються після його утворення в технологічному процесі на 40–80 % при відносно невеликій їх кількості, то втрати тепла при промисловому виробництві хліба в світі до 300 млн тонн на рік, можуть досягати відчутних розмірів, приблизно $2{,}5 \cdot 10^9$ МДж/рік. Такі втрати практично нікуди не утилізуються і є певною проблемою для цього надзвичайно важливого технологічного процесу.

Цією особливістю технологія виробництва хліба цікава з точки зору унікальної властивості термодинамічної двоєдиності [4] та методів подолання створення відходів із досягненням мінімально можливого відходоутворення в межах самого технологічного процесу. Заради зміни суттєвості частини компонентів вихідної сировини, що складають майбутні відходи J_w, у відповідності до методики [5], до системи слід ввести додаткову енергію E_w потрібної якості, чи змінити вигляд базової енергії до потрібного якісного стану E_0^w.

Формулювання мети дослідження

Розробити та обґрунтувати підходи до мінімізації утворення відходів в технологічному процесі, з метою зменшення потреби в їх переробці та утилізації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Основні сировинні компонент у вигляді($J_0 + J_w$), де J_0 – частина матеріального потоку сировини, з якої створюється товарна продукція) сучасного технологічного процесу виробництва хліба і їх зміст в сировинній складовій представлені в таблиці 1. Тут же представлені основні параметри, необхідні для вивчення особливостей термодинамічного стану виробничої системи, основи яких викладені у вигляді наведеної нижче методики дослідження.

Таблиця 1

Опосередковані аналітичні дані для дослідження процесів утворення відходів при різних способах виробництва хліба

№№ п/п	Параметр	Значення параметру	
Структура вихідної сировини ($J_0 + J_w$) (% від сумарного)			
1	Борошно пшеничне	60	
2	Вода	35	
3	Дріжджі	1 ÷ 2	
4	Сіль	1 ÷ 1,5	
5	Цукор, жири, молочні продукти, штучні розпушувачі та ін.	до 3,0	
	РАЗОМ:	100	
Відходи (J_w) (кг/тонну сировини)			
	Назва відходу	**Кількість, кг/т віхідної сировини**	**Енергетична цінність втрат, кДж/кг вих. сировини**
	Борошно, що не використано в технологічному процесі	50 ÷ 100	120
	Борошняний пил	5 ÷	80 ÷ 90
	Залишки води з тіста (випарювання)	20 ÷ 30	330
	Хімічні додатки, зокрема, дріжджі	15 ÷ 20	50 ÷ 120
	Тісто, яке не підійшло для випічки (брак)	50 ÷ 80	150–220
	Підсушений і зіпсований хліб	85 ÷ 150	120 ÷ 280
	Відходи упаковки (пластик, картон))	30 ÷ 50	–
	РАЗОМ:	225–390	–
	Сумарні енергетичні втрати:	–	850–1160
Енергетичні витрати (кДж на 1 кг сировини)			
	Зовнішня вхідна енергія (E_0),включаючи: – енергію, що витрачається на ферментацію та на нагрівання тіста в процесі замісу – енергію, що необхідна для замісу тіста – енергію, що необхідна для нагрівання тіста – енергію, що витрачається на випарювання води – енергію для адсорбції води крохмалем – енергію необхідну на створення клейковини – енергію, що втрачається у вигляді відходу	2000–2310 20 ÷ 30 50 ÷ 100 100 ÷ 150 500 ÷ 600 80 ÷ 100 50 ÷ 70 850–1160	
	Корисна робота щодо зміни сировини до кінцевого продукту (A_0	~500	
	Зміна внутрішньої енергії в системі (ΔU)	~650	
Енергетичні втрати (ΔQ_w) (кДж на 1 кг сировини)			
	Теплові втрати на етапах: – приготування тіста і заміс – ферментації (бродіння) – формування тіста – випічки – охолодження хліба РАЗОМ:	 70–80 80–100 50–60 470–670 180–250 850–1160	

Приймаючи до уваги всі ключові етапи процесу, тепловий баланс у хлібопекарній технології можна виразити наступним чином: $E_0 = A_0 + \Delta U + \Delta Q_w$, де E_0 – зовнішня енергія, що надається у технологічний процес (кДж/кг сировини), A_0 – корисна робота, що створюється при виробництві хліба (кДж/кг сировини), ΔU – зміна внутрішньої енергії технологічного процесу (кДж/кг сировини), ΔQ_w – безповоротні втрати енергії (кДж/кг сировини). Корисна робота A_0 відображає зміни, які відбуваються в кінцевому продукті і можуть бути виміряні. Вона включає в себе роботу, витрачену на підвищення температури тіста, зміну його структури (трансформації клейковини і газів), а також на зміну фізичних і хімічних властивостей хліба в процесі випічки [2].

Внутрішня енергія ΔU технологічного процесу складається з енергії, завдяки якій стаються екзотермічні фізико-хімічні зміни: утворення клейковини, термічні процеси перетворення крохмалю, реакцію Майяра, утворення скоринки, тепловий ефект реакції бродіння. Ця енергія також витрачається на зміну температури і стану тіста, випаровування води та інші хімічні реакції, що відбуваються в процесі випічки [2].

При наданні в систему додаткової енергії E_w мы не приймаємо до уваги що внутрішня енергія системи при цьому також змінюється, тобто залишаємо $\Delta U = \text{const}$ и запишемо, що $E_0 + E_w \geq \Delta U + (A_0 + A_w)$. Але тут параметр A_w вже означає роботу, що виконана для того, щоб перевести матеріальний потік J_w, з якого раніше отримували відхід, в максимально можливий товарний стан, тобто, в певну корисну продукцію.Узгоджений феноменологічний показник λ у рівнянні Л. Онсагера загального виду $\frac{\Delta S}{E_0} = \frac{J_0 X_0 + J_w X_w}{E_0} \lambda(1-\lambda)$ [7] запишемо у вигляді $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$. Враховуючи принцип взаємності Онсагера для системи в стані, близькому до термодинамічноі рівноважності у відносності частин сировини J_0 і J_w, а також встановлене відношення $A_w/A_0 \approx 0{,}62$, показник λ представимо, як

$$\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w} = \frac{A_0/J_0}{A_0/J_0 + A_w/J_w} = \frac{J_w}{(0{,}62 J_0 + J_w)},$$

що буде відповідати вже тому стану сировини J_w, яка буде в майбутньому отримувати зміни, що пов'язані з впливом енергії E_w в термодинамічно нерівноважному стані. При цьому $l \leq 1{,}0$ та наближається до одиниці, вказуючи на область теоретично обґрунтованого мінімального утворення відходів.

Тут і в подальших дослідженнях під термодинамічними силами X_i слід розуміти, зокрема, градієнт зміни одного з силових параметрів, що відносяться до конкретної технічної системи. Причому співвідношення між силами і потоками має бути лінійним за допомогою феноменологічних коефіцієнтів L_{ij} таким чином, що $J_i = \sum_j L_{ij} X_i$. Для самого загального випадку, в умовах технологічного процесу коли має місто перенос речовини (m) та енергії (e) в матеріальних потоках (J_i) за допомогою сил (X_i), що їх створюють, локальне виробництво ентропії можна представити наступним чином: $\sigma[S] = J_0 X_0 + J_w X_w > 0$.

Методика дослідження

Методика дослідження полягала у визначенні основних термодинамічних коефіцієнтів для різних технологій виробництва хліба, незалежно від типу, якості та рецептури. Дослідження охоплює лише традиційну технологію випікання хліба, отриманого з тіста, попередньо підготовленого для досягнення оптимальних органолептичних і фізико-хімічних властивостей, зокрема враховуючи гідратаційні, ферментаційні, теплові та інші характеристики вихідної сировини. Вихідними даними для кожного з розглянутих технологічних процесів є статистична звітність про:

– величину зовнішньої енергії E_0, що надходить у технологічний процес для переробки сировини на одиницю її маси;

– температурні параметри T_i власне технологічного процесу та зовнішнього середовища T_0 для розрахунку зміни ентропії;

– параметри сировини, яка підлягає переробці у конкретному технологічному процесі, а саме:

– параметр матеріального потоку J_0, який витрачається на отримання основної товарної продукції;

– параметр матеріального потоку J_w, який становить весь первісний обсяг сировини у своїй відходоутворюючій частині;

– запропоновану величину додаткової зовнішньої енергії $E_w \leq kE_0$ обраної якості, яка може дозволити вивести матеріальний потік J_w зі стану близького до термодинамічної рівноваги до нерівноважного стану;

Розрахунку підлягали показники:

– величина термодинамічної сили X_0, що забезпечує цілеспрямовану зміну матеріального потоку J_0 до стану товарної продукції;

– величина необхідної термодинамічної сили X_w, яка здатна змінити матеріальний потік J_w до максимальної можливості корисної продукції, у відповідності до типу технологічного процесу;

– зміна ентропії системи, залежно від стану її нерівноважності, відповідно до відомих рівнянь Л. Онсагера, теореми І. Пригожина та ін., залежно від змісту та закономірностей самого технологічного процесу (в дослідженні використовуємо інтегральну ентропію структурованого технологічного процесу, як $\Delta S = \sum \Delta S_k^{\pm} \geq 0$, де E_0^w, відноситься до того з k-их етапів технології, які в даній системі змінюються в дисипативному $(\Delta S_k^{\pm} \pm > 0)$ або репаративному $(\Delta S_k^{\pm} \pm \leq 0)$ напрямках);

– зміна наведеної ентропії системи $\Delta S/E_0$ залежно від феноменологічного показника $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$ з подальшим виявленням його параметрів на кожному наступному n-му етапі ітерації.

Статистична обробка результатів дослідження виконана за допомогою *програмного пакету Statistica 6.0. (StatSoft, Inc., США)*.

Термодинамічні сили в рівнянні Л. Онсагера можна виразити через макроскопічні параметри системи. У нашому випадку ми будемо враховувати тільки термодинамічні сили $X_T = -\frac{1}{T}\nabla T$ (K^{-1}), що викликані температурним градієнтом ∇T. Діаграма для оцінки теоретично обґрунтованого мінімуму відходів, що відносяться до технології промислового виробництва хліба, надана на рис. 1, *а*.

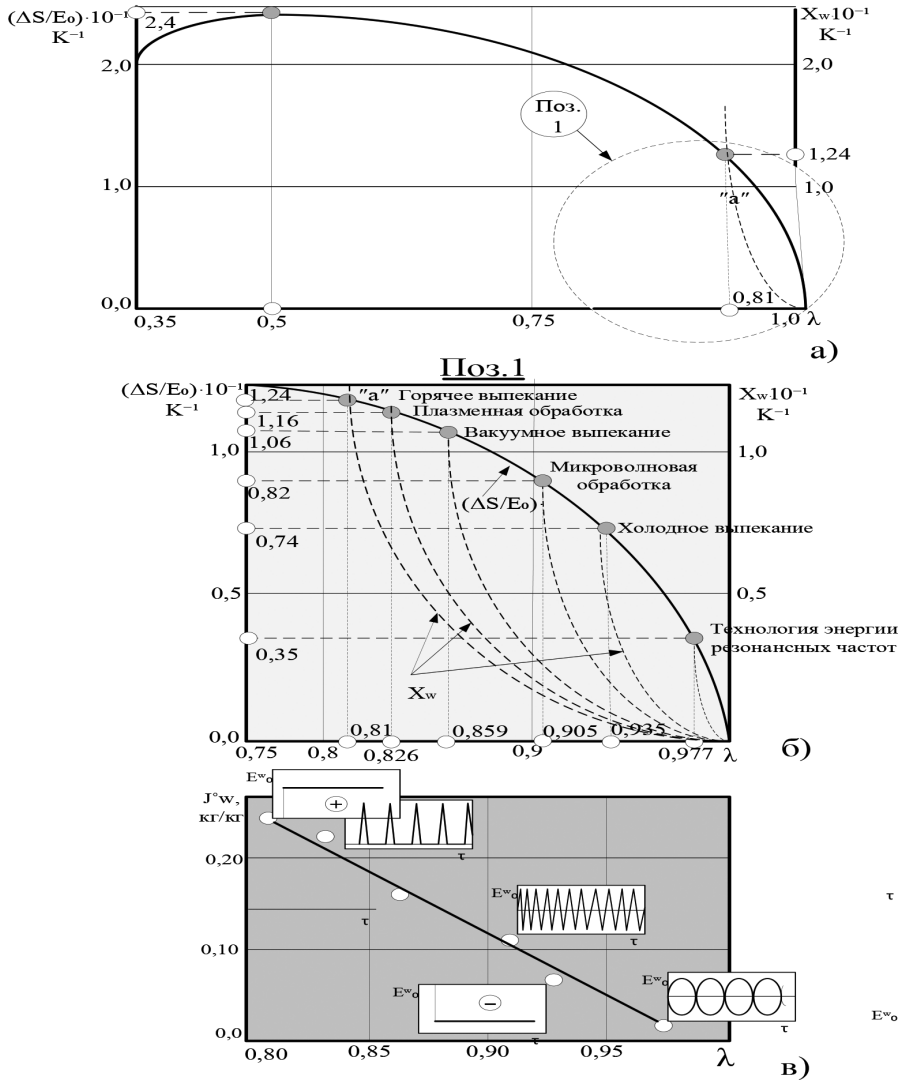

Рис. 1. Схема для розрахунку та розрахункові дані щодо теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів у технологіях виробництва хліба. Тут: *а* – позиція теоретичного мінімуму відходів в технології виробництва хліба; *б* – розрахункові дані (п. 1) щодо виявлення фактичного відходоутворення для різних технологій виробництва хліба; *в* – залишкові відходи J_w^0 виробництва хліба при використанні модифікованої енергії E_0^w різних типів

Велике значення максимальної кількості зміни інтегральної ентропії (відносне значення $\frac{\Delta S_{\lambda=0,5}^{\max}}{E_0} = 0,24K^{-1}$ для $\lambda = 0,5$) на феноменологічній кривій Онсагера, при відносно невеликих значеннях цього показника в області отримання відходів (точка «а» на рис. 1), показує, що зміна стану термодинамічної рівноважності для тієї частини сировини J_w, з якої зазвичай виходять відходи, вимагають особливих умов для отримання додаткової зовнішньої енергії E_w, при яких термодинамічна сила не повинна перебільшувати значення $X_w \leq 1,24 \cdot 10^{-1}\ K^{-1}$ для $\lambda \geq 0,81$, щоб не порушити умови отримання основної товарної продукції. Це може бути як модифікована базова енергія E_0^w, що здатна впливати й на компоненти сировини J_0, і на компоненти J_w, так і додаткова енергія спеціальної якості E_w, що здатна забезпечити або підвищені когезійні якості напівфабрикату, або виключити рівні можливості для температурної обробки різних компонентів вихідної сировини при яких $\lambda \to 1,0$.

Таким чином, висновок про утворення відходів в технологічному процесі виробництва хліба включає в себе наступне.

1. Матеріальні втрати в кількості 39 % сировини (див. таблицю 1) при $\lambda \geq 0,81$ – це харчові відходи, які практично повністю утилізуються поза технологічним процесом отримання хліба і не представляють додаткового інтересу. Вони включають компостування (80–90 % хлібних відходів), корми для тварин (60–70 %), виробництво біогазу (50–60 %), харчові добавки та продукти переробки (30–40 %), термічну утилізацію (10–15 %) та виробництво біопластику (5–8 %).

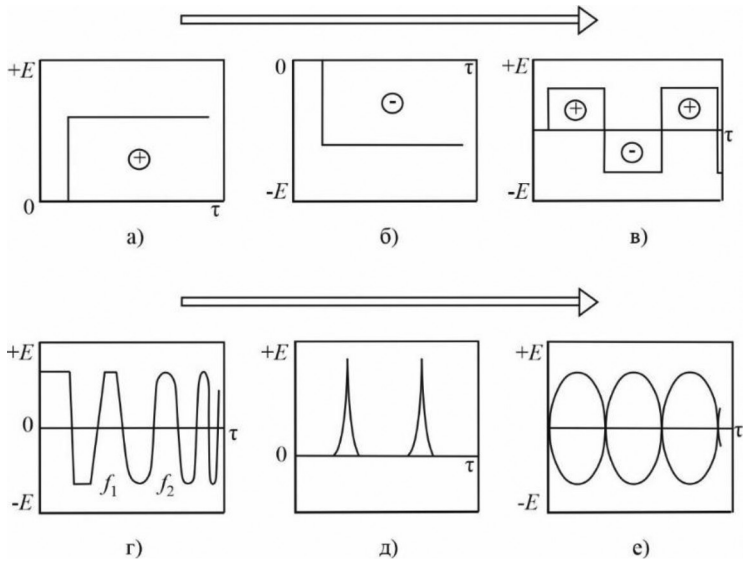

Рис. 2. Лінія розвитку характеристик енергетичного поля, що використовується в технологічному процесі: *а* – енергія постійного знаку; *б* – енергія зворотного знаку впливу; *в* – змінна енергія; *г* – високочастотне змінне енергетичне поле; *д* – імпульсне енергетичне поле; *е* – резонансне частотне поле

Таблиця 2

Розрахункові дані для аналізу ефективності технологій виробництва хліба щодо мінімізації відходів за умови постачання в систему модифікованої енергії E_0^w

№№ п/п	Найменування та особливості технологічного Процесу	Вид показника			
		T, K	λ, ед.	$\Delta S/E_0$ K^{-1}	ΔQ_w, кДж/кг
1	Гаряча випічка	473–523	0,812	$1{,}24 \cdot 10^{-1}$	850–1160
2	Холодна випічка	320–330	0,935	$0{,}74 \cdot 10^{-1}$	200–400
3	Вакуумна випічка	390–410	0,859	$1{,}06 \cdot 10^{-1}$	300–520
4	Мікрохвильова обробка	350–450	0,906	$0{,}82 \cdot 10^{-1}$	450–700
5	Плазмова обробка	800–950	0,826	$1{,}16 \cdot 10^{-1}$	800–1200
6	Технологія енергії резонансних частот	320–370	0,977	$0{,}35 \cdot 10^{-1}$	150–200

Таблиця 3

Спеціальні властивості джерел базової енергії резонансних виток в технологіях виробництва хліба (за даними Д. Міллєра, Р. Вільямса, С. Саблані – 2008–2019)

№№ п/п	Технологічні процеси в системі	Фізичні залежності
1	**Фізико-хімічні процеси.** При резонансному впливі зовнішнього поля частота молекулярних коливань в компонентах тіста (вода та ін.) збільшується, що призводить до пришвидшення цих процесів. резонансне поглинання енергії молекулами води прискорює її нагрівання і сприяє більш ефективному процесу клейстеризації крохмалю в тісті	$\frac{dC}{dt} = k_0 C^m,$ де C – концентрація речовини (наприклад, цукру, що утворюється при гідролізі крохмалю); k_0 – константа швидкості реакції; m – порядок реакції, який залежить від температури та ін. факторів (включаючи електромагнітн. вплив)
2	**Зміна реологічних властивостей.** Резонансні взаємодії дозволяють змінювати в'язкість тіста, його еластичність, текстуру. Частота молекулярних коливань в компонентах тіста збільшується, що призводить до пришвидшення цих процесів	$\eta = \eta_0(1 + \alpha H^2)$. де: η – резельтуюча в'язкість; η_0 – початкова в'язкість; α – константа, що характе-ризує чутливість в'язкості до магнітного полю; H – магнітна напруженість
3	**Резонансний нагрів.** Відноситься до резонансної взаємодії зовнішнього електромагнітного полю з молекулами води з тіста. При співпадінні частоти зовнішнього впливу з власною частотою $\omega = \omega_0$, система поглинає максимальну кількість енергії, що й призводить до нагріву	$\frac{d^2A}{dt^2} + 2\gamma\frac{dA}{dt} + \omega^2 A = F(t).$ тут: γ – коефіцієнт демпфування (пов'язаний з в'язкістю води та іншими характеристиками середовища), ω_0 – власна частота молекул води; A – амплітуда; $F(t)$ – зовнішня сила, пропорційна дії зовнішнього електромагн. поля

2. У номенклатурі енергетичних відходів переважають теплові втрати (36–58 % від енергії, що використовується), які неминучі в умовах переважно теплових процесів в технічних системах. Для того щоб мінімізувати їх в межах самого технологічного процесу, за принципом термодинамічної двоєдиності [4], необхідно ввести в технологічний процес або додаткове джерело енергії $E_w \sim 0{,}62E_0$, або модифіковану базову енергію E_0^w, Наприклад, за принципом, зазначеним в роботі [6] – по лінії розвитку основних модифікацій базової енергії – від зворотного знаку енергії до імпульсних і резонансних частотних полів (рис. 2).

Прикладом використання таких видів енергії в промисловому виробництві хліба можуть служити вже відомі технології (див. рис. 1, *б*), описані А. Ханом, Дж. Смитом, П. Тейлором, М. Джонсоном, М. Финчем (2001–2020).

Свого дослідження чекає технологія використання енергії резонансних частот щодо власних частотних властивостей сировини (борошна, вологи в тесті та ін.).

Застосування резонансних явищ, що виникають між компонентами сировини та модифікованою енергією, впливає на всі етапи технологічного процесу виробництва хліба (табл. 3). На відміну від інших методів, наприклад, індукційний впливає лише на етап випікання, а холодний – переважно на процеси бродіння та гідратації. Резонансний нагрів та обробка, зокрема, можуть використовуватись для прискорення желатинізації крохмалю, гідролізу та покращення реологічних властивостей тіста.

Використання резонансних явищ в системах виробництва хліба може бути дуже енергоефективним методом, враховуючи, що в цілому це маловідходне виробництво має основне джерело відходів у вигляді втраченої теплової енергії з втратами близько 1000 кДж/кг сировини, і навіть при використанні сучасних індукційних або інфрачервоних систем енергозабезпечення для спікання хліба – втрати досягають 400–700 кДж/кг сировини. У цьому ряду навіть розрахункові значення можливих втрат енергії при використанні резонансних технологій отримання випічки хліба можуть давати сумарні втрати тепла $\Delta Q_w \leq 120$ кДж/кг використовуваної сировини при значеннях $\lambda = 0{,}977$ і більш, при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 0{,}35 \cdot 10^{-1} K^{-1}$ (див. рис. 1, *в*), тобто наближення до теоретичного мінімуму утворення відходів у самому джерелі – технологічному процесі. Звісно, для такого розвиненого процесу, як виробництво хліба, існують способи модифікації основної енергії (теплової обробки), які можуть суттєво зменшити як матеріальні (органічні) відходи, так і втрати енергії. Сучасні джерела енергії, такі як низькотемпературні та високочастотні нагрівачі, а також імпульсні джерела, вже продемонстрували свою ефективність (див. рис. 1, *в*). Однак ресурси, приховані в самому технологічному процесі, дають надію на наближення до теоретичного мінімуму утворення відходів, включаючи теплові втрати.

Висновки

У сучасному хлібопеченні, хоча органічні відходи відносно невеликі та добре утилізуються, найбільшою проблемою залишаються значні втрати теплової енергії. Однак, згідно з теоретичним мінімумом утворення відходів, запропонований метод введення в технологічний процес модифікованої енергії резонансних коливань дозволяє не лише на порядок зменшити теплові втрати, а й завдяки резонансній взаємодії з молекулами води в сировині, знизити втрати органічних відходів до мінімально можливих 3 % від використаної сировини.

Список використаної літератури

1. Belitz, H.D., Grosch, W. and Schieberle, P. (2009) *Food Chemistry*. 4th Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1070 p.
2. Nielsen, S. S. (2017) *Food Analysis*, Department of Food Science Purdue University West Lafayette Indiana USA, Springer, 784 p.
3. Дробот В. І. (2024) *Технологія хлібопекарського виробництва*. Профкнига. Київ. 516 с.
4. Волошин В. С. (2024) *Відходи та термодинаміка*. Київ-Маріуполь, СПД Самченко, 80 с.
5. Волошин В. С. (2024) *Відходи та їх природа*. Київ-Маріуполь, СПД Самченко, 630 с.
6. Волошин В. С., Бурко В. А. (2024) *The Principle of Thermodynamic Duality as a Basis for the Creation of Industrial Waste in Technological Processes*. Scientific Aspects of Conserving and Restoring Natural Resources Under the Modern Development of Society. Scientific monograph. Riga, Latvia. Baltija Publishing. P. 32–53.

References

1. Belitz, H.D., Grosch, W. and Schieberle, P. (2009) *Food Chemistry*. 4th Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1070 p.
2. Nielsen, S. S. (2017) *Food Analysis*, Department of Food Science Purdue University West Lafayette Indiana USA, Springer, 784 p.
3. Drobot V. I. (2024) *Technology of bakery production*. Professional book. Kyiv. 516 p.
4. Voloshyn V. S. (2024) *Waste and thermodynamics*. Kyiv-Mariupol, SPD Samchenko, 80 p.
5. Voloshyn V. S. (2024) *Waste and its nature*. Kyiv-Mariupol, SPD Samchenko, 630 p.
6. Voloshyn V. S., Burko V. A. (2024) *The Principle of Thermodynamic Duality as a Basis for the Creation of Industrial Waste in Technological Processes*. Scientific Aspects of Conserving and Restoring Natural Resources Under the Modern Development of Society. Scientific monograph. Riga, Latvia. Baltija Publishing. P. 32–53.