

ОСОБЛИВОСТІ МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ
ВИРОБНИЦТВА ХЛІБА

Волошин В.С.

д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: vsylshn52@gmail.com;

Бурко В.А.

канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>, e-mail: burko_v_a@pstu.edu

В роботі розглянуті дослідження, що стосуються мінімізації відходів у традиційних промислових технологіях виробництва хліба. Показано, що при відносно невеликій кількості органічних відходів, що легко утилізуються в післявиробничий період, існує доки непереборна кількість енергетичних відходів, які досягають великих розмірів та відносяться до світових об'ємів виробництва цієї важливої для людини продукції. Незважаючи на певні сучасні технології та темпи виробництва хліба, питання промислових відходів існує і не вирішується. В статті запропоновано результати дослідження теоретично обґрунтованого мінімуму відходів загального типу щодо технології виробництва хліба, розроблено методіку, що дозволяє використовувати принцип термодинамічної двоєдності, як механізм, що відповідає за утворення відходів у технологічному процесі, та як основний, що дозволяє мінімізувати утворення відходів в межах самого технологічного процесу. Показано межі, які існують в досягненні бажаного результату, розподіл мінімально можливих відходів між етапами технологічного процесу, та рекомендовано використовувати модифіковану енергію зовнішнього впливу, як спроможну переробити ту частину сировини, яка в певних умовах здатна потрапити у відхід, але за допомогою нової енергії здатна до деяких інших якостей, що роблять з неї корисний продукт в межах самого технологічного процесу. Показано, як можна використати резонансні джерела енергії для досягнення цілі – максимально мінімізувати енергетичні втрати в технологічному процесі виробництва хліба. Посилаючись на теоретично обґрунтований мінімум утворення відходів, запропонований метод введення модифікованої енергії резонансних коливань в технологічний процес дозволяє не тільки на порядок знизити втрати теплової енергії, але й за рахунок резонансних взаємодій з молекулами сировинної води знизити втрати органічних відходів до максимально можливих 3% від сировини, що використовується в технології.

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

Постановка проблеми

Сучасні технології виробництва хлібної продукції, незважаючи на високий рівень технологічності, не змогли позбавитися від певної кількості органічних та енергетичних відходів. Причина цього бачиться в слабкості теоретичної бази, що пояснює причини та механізми створення відходів в цьому технологічному процесі. У такому сенсі принцип термодинамічної двоєдності та методика розрахунку теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів в межах технологічного процесу, що базується на ньому, здатні вирішити проблему визначення можливостей тієї чи іншої технології, знайти шляхи і засоби мінімізації відходів всередині технологічного процесу, тим самим мінімізувавши їх появу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Основи сучасних технологій отримання хліба сягають корінням в минулі тисячоліття, зародившись разом з технологіями землеробства. Досвід виробництва хліба з найбільш можливими модифікаціями зберігся і до наших днів, практично не змінюючи своїх основних етапів [1, 2], а саме:

- заміс і гідратація борошна з утворенням тіста;

- ферментація, що супроводжується виділенням CO_2 і поризацією замісу;
- порційне формування з подальшим вистоюванням;
- випічка хліба, під час якої відбувається кристалізація крохмалю і утворення поверхневої скоринки;
- охолодження готового хліба для подальшого транспортування та вживання.

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 та $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ – етанолу;
- термічні зміни з клейстеризацією крохмалю;
- реакція Майяра що супроводжує випічку.

Як і будь-який технологічний процес, виробництво хліба супроводжується появою промислових відходів, які мають органічний характер і, справедливості заради, в більшості своїй потім переробляються, утилізуються і майже не губляться. Однак основними відходами в цих технологіях є втрати енергії, пов'язані з термічним нагріванням і технологічним охолодженням продуктів. 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 (дані Продовольчої і сільськогосподарської організації ООН (ФАО)), 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 двоєдності [4] та методів подолання створення відходів із досягненням мінімально можливого відходу утворення 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 .

Мета статті

Вказати на засоби щодо мінімізації виникнення відходів у самому технологічному процесі як альтернативи досвіду їх створення та наступної переробки, утилізації тощо.

Виклад основного матеріалу

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.

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].

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 вихідної сировини	Енергетична цінність втрат, кДж/кг вих. сировини
	Борошно, що не використано в технологічному процесі	50÷100	120
	Борошняний пил	5÷ 10	80÷90
	Залишки води з тіста (випарювання)	20÷ 30	330
	Хімічні добавки, 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

Продовження таблиці 1

Енергетичні витрати (кДж на 1 кг сировини)		
	Зовнішня вхідна енергія (E_0), включаючи:	2000-2310
	-енергію, що витрачається на ферментацію та на нагрівання тіста в процесі замісу –	20÷30
	-енергію, що необхідна для замісу тіста –	50÷100
	-енергію, що необхідна для нагрівання тіста –	100÷150
	-енергію, що витрачається на випарювання води –	500÷600
	-енергію для адсорбції води крохмалем –	80÷100
	-енергію необхідну на створення клейковини –	50÷70
	-енергію, що втрачається у вигляді відходу –	10÷20
	Корисна робота щодо зміни сировини до кінцевого продукту (A_0)	850-1160
	Зміна внутрішньої енергії в системі (ΔU)	~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 –	70-80
	- ферментації (бродиння) –	80-100
	- формування тіста –	50-60
	- випічки –	470-670
	- охолодження хліба –	180-250
	РАЗОМ:	850-1160

При наданні в систему додаткової енергії E_w ми не приймаємо до уваги, що внутрішня енергія системи при цьому також змінюється, тобто залишаємо $\Delta U = const$ 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 $\frac{\Delta S}{E_0} = \frac{J_0 X_0 + J_w X_w}{E_0} \lambda (1 - \lambda)$ запишемо у вигляді $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$. Враховуючи принцип взаємності Онсагера для системи в стані, близькому до термодинамічної 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

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

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 $\lambda \leq 1,0$ 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 $J_i = \sum_j L_{ij} X_j$. Для самого загального випадку, в умовах технологічного процесу, коли має місце

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 досліджень включала виявлення значень базових термодинамічних коефіцієнтів у послідовності технологій, що відносяться до виробництва хліба, незалежно від їх типу, якості та належності. У дослідженні приймається тільки традиційна технологія виготовлення хлібу шляхом термообробки тіста, що було попередньо приготовлено, з урахуванням поліпшених органолептичних та фізико-хімічних властивостей, зокрема, гідратаційних, ферментаційних, теплових та інших здібностей 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 струтурованого технологічного процесу, як $\Delta S = \sum \Delta S_k^{\pm} \geq 0$, де $\Delta S_k^{\pm}$ відноситься до того з k -их етапів технології, які в даній системі змінюються в дисипативному ($\Delta S_k^{\pm} > 0$) або репаративному ($\Delta S_k^{\pm} \leq 0$) 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. 1а.

Велике значення максимальної кількості зміни інтегральної ентропії (відносно значення $\frac{\Delta S_{\lambda=0,5}^{max}}{E_0} = 0,24 K^{-1}$ 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, вимагає 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 $\lambda \rightarrow 1,0$.

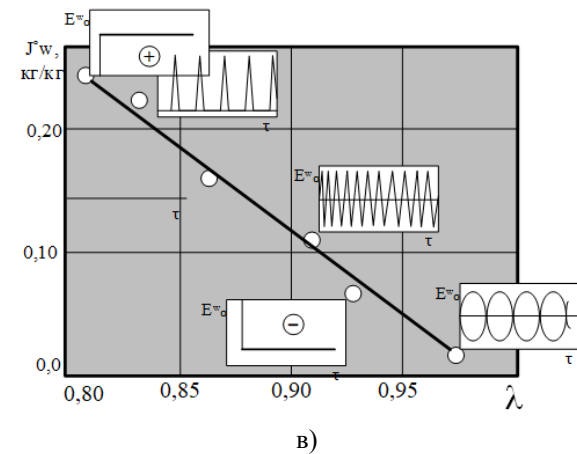
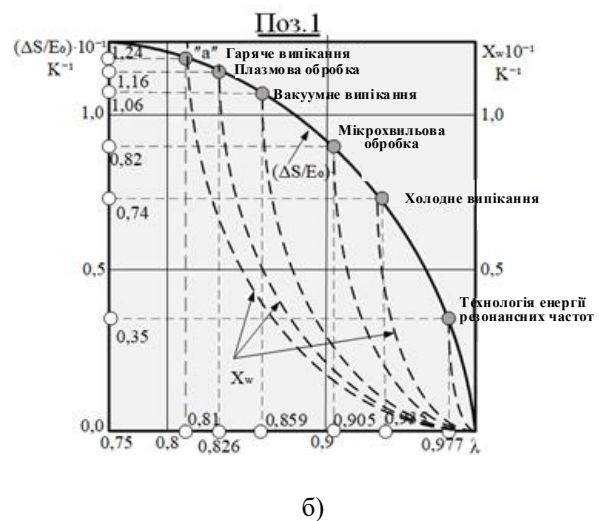
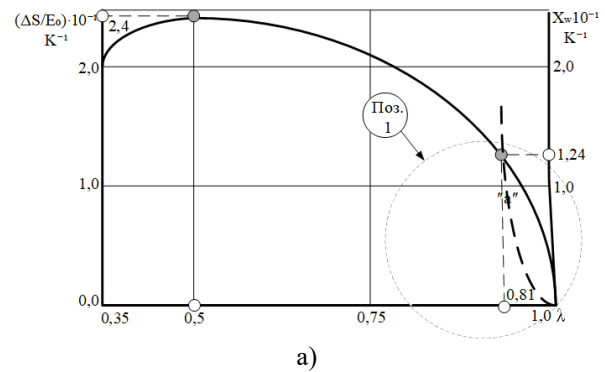


Рис. 1 – Схема для розрахунку та розрахункові дані щодо теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів у технологіях виробництва хліба. Тут: а) – позиція теоретичного мінімуму відходів в технології виробництва хліба; б) – розрахункові дані (п. 1) щодо виявлення фактичного відходу утворення для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

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%).

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 двоєдності [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).

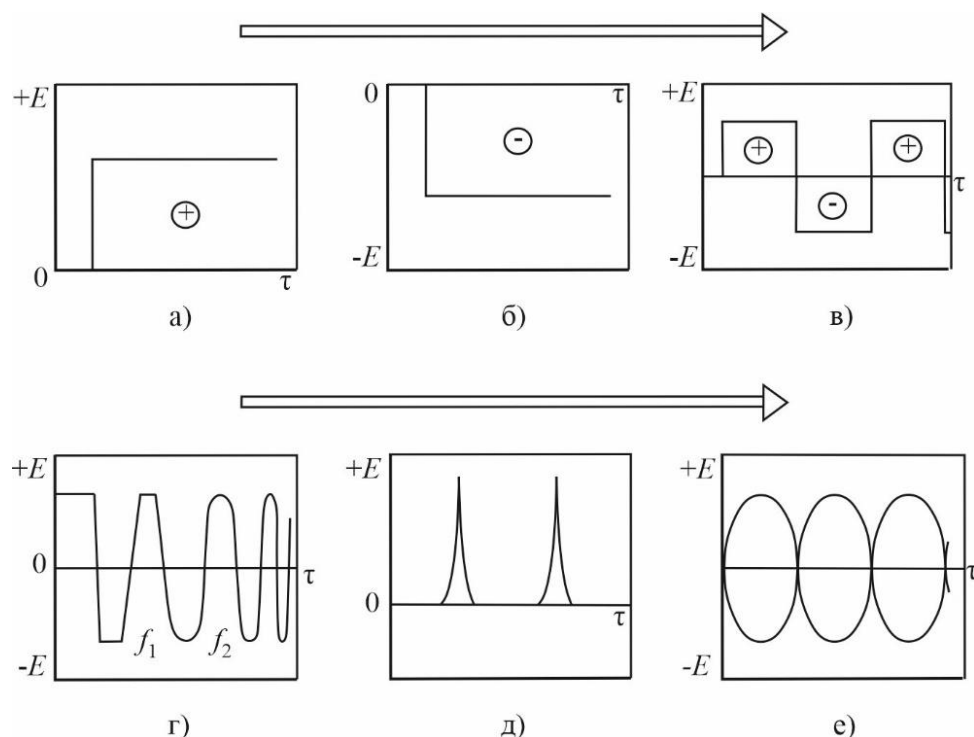


Рис. 2 – Лінія розвитку характеристик енергетичного поля, що використовується в технологічному процесі: а) енергія постійного знаку; б) енергія зворотного знаку впливу; в) змінна енергія; г) високочастотне змінне енергетичне поле; д) імпульсне енергетичне поле; е) резонансне частотне поле

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, К	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

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

-холодної випічки (див. поз. б, рис. 2), яка передбачає використання хімічних розпушувачів, які у взаємодії з кислотою сприяють виділенню вуглекислого газу, що піднімає тісто. Розрахункове значення $\lambda \leq 0,935$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 0,74 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$;

-вакуумної випічки, при якій тісто нагрівається в умовах зниженого тиску, що значно знижує температуру випаровування води з тесту і прискорює цей процес ($\lambda \leq 0,859$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 1,06 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$);

-мікрохвильової обробки з використанням височастотних електромагнітних хвиль для нагрівання, а потім «приготування» тіста (див. поз. г, рис. 2). Швидкість випікання становить кілька хвилин при $\lambda \leq 0,906$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 0,82 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$;

-плазмової імпульсної обробки (див. п. д, рис. 2) з використанням імпульсного плазмового генератора для обробки тіста, що дозволяє нагрівати хліб до потрібної температури без традиційних печей ($\lambda \leq 0,826$ при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 1,16 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$).

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

Використання резонансних явищ між компонентами сировини і основною модифікованою енергією впливає на всі стадії технологічного процесу (табл. 3), на відміну від інших способів випічки хліба, наприклад, індукційний метод впливає тільки на випічку, холодний спосіб впливає, в основному, на процеси бродіння і гідратації і т.д. У технологіях виробництва хліба резонансний нагрів та обробка, наприклад, може використовуватися, у тому числі, для прискорення таких процесів, як желатинізація крохмалю, гідроліз і поліпшення 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 $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 0,35 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$ (див. рис. 1, в), тобто наближення до теоретичного мінімуму утворення відходів у самому джерелі – технологічному процесі.

Таблиця 3

Спеціальні властивості джерел базової енергії резонансних виток в технологіях виробництва хліба (за даними Д. Міллера, 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 С – 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 – результуюча в'язкість; η_0 – початкова в'язкість; α – константа, що характеризує чутливість в'язкості до магнітного поля; H – магнітна напруженість.
3	Резонансний нагрів. Відноситься до резонансної взаємодії зовнішнього електромагнітного поля 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.	$\frac{d^2 A}{dt^2} + 2\gamma \frac{dA}{dt} + \omega^2 A = F(t)$. 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 електромагнітного поля.

Безумовно, для такої давньої і розвиненої технології, як виробництво хліба, вже відомі джерела модифікованої основної енергії, в основі якої лежить теплова обробка, можуть надати вирішальний вплив на мінімізацію як матеріальних (органічних) відходів, так і втрат енергії. Сучасні джерела енергії: низькотемпературні, високочастотні нагрівачі, імпульсні джерела енергії вже показали свої результати (див. рис. 1в). Тим не менш, ресурси в самому технологічному процесі дозволяють розраховувати на можливість наближення до теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів, в тому числі і теплових втрат.

Висновки

Незважаючи на те, що сучасні технології виробництва хліба відрізняються відносно невеликою кількістю органічних відходів, які максимально утилізуються після їх створення, максимальним у виробництві є тепловий відхід, що безповоротно втрачається в технологічному процесі. Посилаючись на теоретично обґрунтований мінімум утворення відходів, запропонований метод введення модифікованої енергії резонансних коливань в технологічний процес дозволяє не тільки на порядок знизити втрати теплової енергії, але

й за рахунок резонансних взаємодій з молекулами сировинної води знизити втрати органічних відходів до максимально можливих 3% від сировини, що використовується в технології.

Перелік використаних джерел

- [1] Belitz H. D., Grosch W., Schieberle P. Food Chemistry. Berlin: Springer, 2009. 984 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69934-7>.
- [2] Nielsen S. S. Food Analysis. 5th ed. Springer, 2017. 784 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5>.
- [3] Дробот В. І. Технологія хлібопекарського виробництва. К. : Профкнига, 2024. 516 с.
- [4] Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. К. : СПД Самченко, 2024. 80 с.
- [5] Волошин В. С. Відходи та їх природа. К. : СПД Самченко, 2024. 630 с.
- [6] Волошин В. С., Бурко В. А. 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*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2024. Pp. 32-53.

FEATURES OF WASTE MINIMIZATION IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF BREAD PRODUCTION

Voloshyn V.S.

D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: vsvlshn52@gmail.com;

Burko V.A.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>, e-mail: burko_v_a@pstu.edu

The paper considers studies related to waste minimization in traditional industrial technologies of bread production. It is shown that with a relatively small amount of organic waste that is easily disposed of in the post-production period, there is an irresistible amount of energy waste that reaches large sizes, related to the world production volumes of this important product for humans. Despite certain modern technologies and rates of bread production, the issue of industrial waste exists and is not solved. The article proposes the results of the study of the theoretically grounded minimum of waste of the general type, regarding the technology of bread production, develops a technique that allows using the principle of thermodynamic duality as a mechanism responsible for the generation of waste in the technological process, as the main one that allows minimizing the formation of waste within the technological process itself. The limits that exist in achieving the desired result, the distribution of the minimum possible waste between the stages of the technological process are shown, it is recommended to use modified energy of external influence, as able to process that part of the raw material that under certain conditions is able to get into waste, but with the help of new energy is capable of some useful qualities that make it a useful product within the technological process itself. It is shown how it is possible to use 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 grounded minimum of waste generation, the proposed method of introducing the modified energy of resonant oscillations into the technological process allows not only to reduce heat energy losses by an order of magnitude, but also to reduce the loss of organic waste to the maximum possible 3% of the raw materials used in the technology due to resonant interactions with raw water molecules.

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

References

- [1] H.D. Belitz, W. Grosch, and P. Schieberle, *Food Chemistry*. Berlin: Springer, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-69934-7.
- [2] S.S. Nielsen, *Food Analysis*, 5th ed. Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-45776-5.
- [3] V.I. Drobot, *Tekhnolohiia khlibopekarskoho vyrobnytstva* [Bakery production technology]. Kyiv, Ukraine: Profknyha Publ., 2024. (Ukr.)
- [4] V. Voloshyn, *Vidkhody ta termodynamika* [Waste and thermodynamics]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [5] V. Voloshyn, *Vidkhody ta yikh pryroda* [Waste and its nature]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [6] V.S. Voloshyn, and V.A. Burko, "The Principle of Thermodynamic Duality as a Basis for the Creation of Industrial Waste in Technological Processes," in *Scientific Aspects of Conserving and Restoring Natural Resources Under the Modern Development of Society*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2024. Pp. 32-53.

Стаття надійшла 25.05.2025

Стаття прийнята 20.06.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Волошин В. С., Бурко В. А. Особливості мінімізації відходів у технологічному процесі виробництва хліба. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 223-230. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344955>.