

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Єлістратова Н. Ю., ст. викладач,

Бурко В. А., канд. техн. наук, доц

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ОСОБЛИВОСТІ МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА ХЛІБА

Технології виробництва хліба беруть свій початок разом з аграрною революцією, яка була призвана створити нове людське суспільство, і хліб тут зіграв не останню роль. Тому вивчення особливостей утворення відходів у такій традиційній технології має бути повчальним для сучасних фахівців.

Основні сировинні компоненти сучасної технології виробництва хліба у вигляді $(J_0 + J_w)$, де J_0 та J_0 -частини матеріального потоку сировини, з якої створюється товарна продукція сучасного технологічного процесу виробництва хліба і її відходи, 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, хлібі, 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 ми 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 $\frac{\Delta S}{E_0} = \frac{J_0 X_0 + J_w X_w}{E_0} \lambda (1 - \lambda)$ [1] запишемо у вигляді $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$.

Враховуючи принцип взаємності Онсагера для системи в стані, близькому до термодинамічної рівноваженості 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 термодинамічному нерівноважному стані. При цьому $\lambda \leq 1,0$ та наближається до одиниці, вказуючи на область теоретично обґрунтованого мінімального утворення відходів.

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 відх. 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
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 –		1650÷2200 60÷100 100÷150 500÷600 80÷100 50÷70 10÷20 850÷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 (бродиння) – - формування тіста – - випічки– - охолодження хліба – РАЗОМ:		70÷80 80÷100 50÷60 470÷670 180÷250 850÷1160

Методика дослідження. Методика досліджень включає виявлення значень базових термодинамічних коефіцієнтів у послідовності технологій, що відносяться до виробництва хліба, не залежно 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 невірноваженості, відповідно до відомих рівнянь Л. Онсагера, теореми І. Пригожина та ін.

- 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).

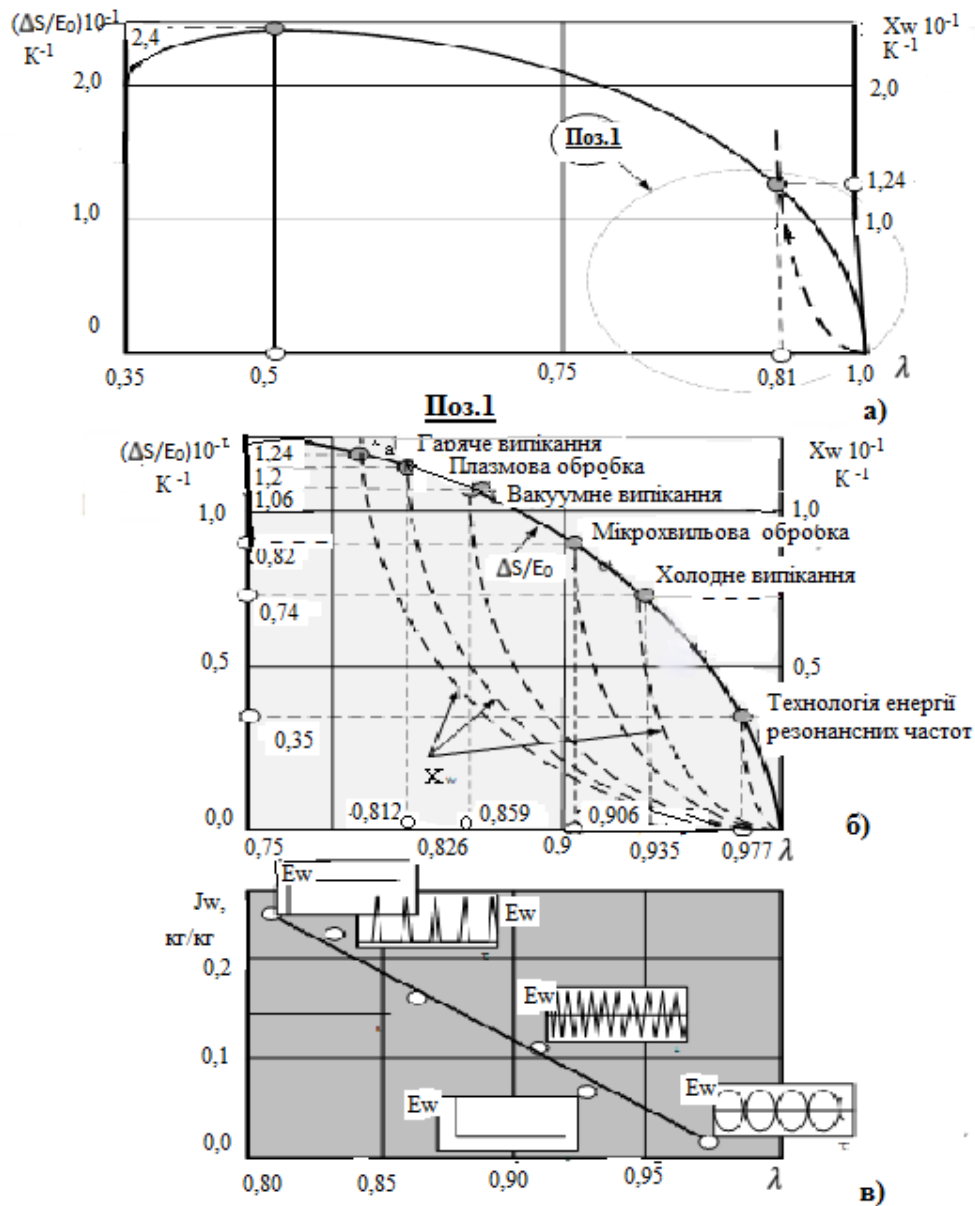


Рисунок 1 – Схема для розрахунку та розрахункові дані щодо теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів у технологіях виробництва хліба. Тут:

- 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_w^0 різних типів

Велике значення для максимальної кількості у зміні інтегральної ентропії (відносне значення $\frac{\Delta S_{\lambda=0.5}^{max}}{E_0} = 0,24 \text{ K}^{-1}$ для $\lambda = 0,5$) на феноменологічній кривій Л. Онсагера, порівнюється з відносно невеликими значеннями цього показника в області

отримання відходів (точка «а» на рис. 1). Вона показує, що зміна стану термодинамічної рівноваженості 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 сировинних компонентів при яких $\lambda \rightarrow 1,0$.

Таким чином, з викладеного про утворення відходів в технологічному процесі виробництва хліба має бути наступне.

1. Матеріальні витрати 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 [3], необхідно ввести в технологічний процес або додаткове джерело енергії $E_w \sim 0,62 E_0$, або модифіковану базову енергію E_0^w ,

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 , од.	$\Delta S/E_0$, 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	$1,2 \cdot 10^{-1}$	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. 1, б), описані А. Ханом, Дж. Смитом, П. Тейлором, М. Джонсоном, М. Финчем (2001-2020), зокрема:

-холодної випічки, 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. 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 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, 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.

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, височастотні нагрівачі, імпульсні джерела енергії вже показали свої результати (див. рис. 1, в). 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.

Література

1. Nielsen, S. S. Food Analysis, 5th edition, 2017, Springer, 784 p.
2. 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. Scientific monograph. Riga, Latvia. Baltija Publishing. 2024. P. 32-53.
3. Волошин В. С. Відходи та їх природа. Київ-Маріуполь, СПД Самченко, 2024. 630 с.