

## ПРО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПІДТВЕРДЖЕННЯ УМОВ ПОДОЛАННЯ ПРИНЦИПУ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ДВОЄДИНОСТІ ЯК ПРИЧИНИ СТВОРЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Волошин В.С., Бурко В.А.

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»  
вул. Гоголя, 29, 49044, м. Дніпро  
[vsvlshn52@gmail.com](mailto:vsvlshn52@gmail.com), [burko\\_v\\_a@pstu.edu](mailto:burko_v_a@pstu.edu)

В роботі надані результати експериментальних досліджень, які підтверджують основні положення принципу термодинамічної двоєдності, як механізму створення відходів в будь-якому технологічному процесі та основаному на ньому методі мінімізації відходів в межах самого технологічного процесу. В роботі використані дані так званих пасивних експериментів, які проводилися для технологій металургійної та харчової промисловості з метою виділення тих їх складових, які спроможні бути доказами або іншими аргументами на користь цих теоретичних досліджень. Розроблено методику пасивного експерименту, що базується на низці статистичних даних про хід та особливості технологічного процесу, включаючи його технологічні та теплотехнічні карти, порядок ведення технології, виявлення параметрів, що стали в нагоді, як технологічно помилкові або екстремальні для даного технологічного процесу, з подальшим виявленням їх впливу на процеси відходоутворення та залежностей від енергетичних параметрів технологічного процесу. Зокрема, це стосується таких особливостей технологічного процесу, які пов'язані із вводом в систему додаткових енергетичних джерел та їх вплив на стан і якість складової відходів, що отримуються. Встановлено у порівнянні технологій мартенівського вироблення сталі в умовах продувки ванни чистим киснем та без нього, та з киснево-конвертерним способом, що існує певна межа у використанні додаткової енергії, що вводиться в технологічний процес, яка може, не порушуючи цілісності основного процесу, певним чином впливати на ту частину сировинного потоку, з якої в звичайних умовах виходить відхід. Отримані опосередковані дані щодо діапазону відношення цієї енергії до базової енергії цього процесу в межах точки 0,62, як такої, що впливає на стан відхідної частини сировини, але не переводить технологічний процес у стан невизначеності та незворотності. Аналогічні дані з певною похибкою отримані і в технології випічки хліба, де, в межах пасивного експерименту, запропоновано використовувати в якості модифікованої базової енергії для отримання товарної продукції, інші види енергії для пропікання хлібу, зокрема, імпульсні джерела та резонансні засоби пропікання. Загальний висновок може стосуватися необхідностей у розвитку таких експериментальних досліджень для низки відомих технологічних процесів з метою підтвердження або аргументованого спростування цих залежностей, а значить і самої ідеї забезпечення мінімізації відходів у межах самого технологічного процесу. *Ключові слова:* промислові відходи, мінімізація, технологічний процес, енергія, зміна ентропії, термодинамічна невірноваженість.

**On experimental confirmation of the conditions for overcoming the principle of thermodynamic duality as the reason for the creation of industrial waste in technological processes. Voloshyn V., Burko V.**

The paper presents the results of experimental studies that confirm the main provisions of the principle of thermodynamic duality as a mechanism for creating waste in any technological process and the method of minimizing waste within the technological process itself. The paper uses the data of the so-called passive experiments, which were carried out for the technologies of the metallurgical and food industries in order to identify those components that can be used as evidence for other arguments in favor of these theoretical studies. A passive experiment technique has been developed, based on a number of statistical data on the course and features of the technological process, including its technological and thermal maps, the procedure for conducting the technology, the identification of parameters that have become useful as technologically erroneous or extreme for this technological process, with the subsequent identification of their impact on the processes of waste generation and dependencies on the energy parameters of the technological process. In particular, this applies to such features of the technological process that are associated with the introduction of additional energy sources into the system and their impact on the condition and quality component of the resulting waste. It has been established in the comparison of the technologies of open-hearth steel production under the conditions of bath products with pure oxygen and without it and with the oxygen-converter method, that there is a certain limit in the use of additional energy introduced into the technological process, which can, without violating the integrity of the main process, in a certain way affect that part of the raw material flow, from which under normal conditions the waste is exited. Indirect data on the range of the ratio of this energy to the base energy of this process within the point of 0.62, as such that affects the state of the raw material waste part, but does not transfer the technological process to a state of uncertainty and irreversibility. Similar data with a certain error were obtained in the technology of baking bread, where, within the framework of a passive experiment, it was proposed to use other types of energy for baking bread as a modified base energy for obtaining marketable products, in particular, pulse sources and resonant baking means. The general conclusion may relate to the need for the development of such experimental studies for a number of known technological processes in order to confirm or reasonably refute these dependencies, and therefore the very idea of ensuring the minimization of waste within the technological process itself. *Key words:* industrial waste, minimization, technological process, energy, change in entropy, thermodynamic imbalance.

**Постановка проблеми.** Методи мінімізації промислових відходів в межах діючих та нових технологічних процесів потребують своєї аргументованої експериментальної бази та кількісних параметрів, таких що забезпечують стійкість технологічного процесу та, водночас, надають можливості для реалізації цілеспрямованого енергетичного впливу на ту частину сировини, яка в традиційному технологічному процесі переходить у відходи.

**Актуальність дослідження.** Існуючий стан боротьби з промисловими відходами, незважаючи на кількість створених способів та технічних рішень, спрямованих на їх мінімізацію, не призводить до радикального вирішення цієї проблеми, включаючи створення нових відходів від діючих виробництв. На кожну тону перероблених з числа раніше створених відходів, сучасна промисловість виробляє декілька нових тонн тих самих відходів. Стає актуальною тема мінімізації відходів у джерелі їх виникнення, технологічному процесі та максимального недопущення їх появи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах [1, 2, 3] розкритий механізм принципу термодинамічної двоєдності, як одна з основ створення промислових відходів. В основі принципу знаходиться поняття про те, що одна й та ж енергія технологічного процесу по різному впливає на різні компоненти технологічної сировини таким чином, що завдяки її термодинамічному відношенню до базової енергії, що подається в технологічний процес, частина йде на отримання товарної продукції, а інша частина – на створення відходів.

Наразі у діючому металургійному виробництві, важко ставити промисловий експеримент який був би пов'язаний зі змінами в енергетичному балансі технологічного процесу. Існує метод прихованого експерименту, який пов'язаний з використанням особливостей нестандартних режимів ведення технологічного процесу [4]. Ці режими стосуються можливих помилок в організації технології, або інших умов, при яких технологічний процес йде з екстремальними значеннями основних показників [5]. Одним з таких прихованих експериментів у мартенівському виробництві стала технологія додаткового введення кисню в ванну мартенівської печі [6]. Метою таких змін в технологічному процесі була можливість підвищення інтенсивності виплавки мартенівської сталі, наближення її якості та темпів виробництва до конвертерного способу виробництва сталі. Але, наряду з цим, додаткова енергія, що потрапила до технологічного процесу з киснем, та екзотермічні реакції що її супроводжують, не могла не оказати впливу на хімічний склад і чисельні параметри відходів цього виробництва, шлаку та газів.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрій присвячується означена стаття.** Рішення поставлених проблем стикається з потребою в наведенні граничних умов для кількіс-

них показників, якими можна оперувати при управлінні виробничими, відходоутворюючими системами, стосовно з можливостями та специфікою для мінімізації відходоутворення в межах конкретного технологічного процесу.

**Новизна та загальнонаукове значення.** Аналітичні та експериментальні обмеження для параметрів, що характеризують відходоутворюючу залежність від енергетичної та термодинамічної складових для конкретного технологічного процесу складають підстави для створення виробничих систем і технологічних процесів нового покоління, з мінімальним відходоутворенням, що має суттєве значення в технологіях 5.0 як фактор людиноцентричності технологічних процесів.

**Викладення основного матеріалу.** Ми будемо зіставляти дані технологічного процесу на 250-тонній мартенівській печі одного з Донбаських металургійних заводів за умовами технологічного режиму без- та з введенням кисню в ванну печі, а також результати роботи 300-тонного конвертерного агрегату, у якому активним енергоносієм є лише чистий кисень та екзотермічні реакції у чаші конвертера.

Метою подачі у ванну мартенівської печі чистого кисню була безумовно не можливість мінімізувати відходи. Але цей приклад є природним експериментом для включення до складу зовнішньої енергії  $E_0$  від спалювання природного газу та мазуту, яка зазвичай присутня у цьому виді технологічного процесу, додатковий елемент – кисень, який змінює внутрішню енергію процесу  $\Delta U$  за рахунок екзотермічних реакцій у ванні. Такий додаток до базової енергії можна вважати за додаткове її джерело  $E_w^0$ .

Тим не менш, вдування кисню прискорює окислення та змінює хімію шлаку та умови створення відходів виробництва. Знижується частка  $FeO$  за рахунок збільшення окислення заліза до  $Fe_2O_3$  киснем, що вводиться. Вихід шлаку, наприклад, для 250-тонної печі знижується з 150–200 кг/тону сировини до 120–130 кг/т за плавку і залежить від витрати кисню, складу шихти, температури, кількості руди і режиму продування, зокрема, у виключенні з процесів окислення компонентів сировини ( $P, Si, Mn, C$ ) за рахунок кисню кислої руди ( $Fe_2O_3 \rightarrow FeO$ ) і зміни їх на пряме окислення цих компонентів. При витраті кисню  $20 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{год})$  зниження шлаку становить приблизно 10–15%, при  $50 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{ч})$  – до 25%. Основний фактор – зниження потреби в руді та прискорення окислення, що скорочує масу оксидів у шлаку [7].

**Методика дослідження.** Передбачається контроль 22-х параметрів мартенівської плавки як протягом плавки, так і за результатами повного технологічного циклу:

Аналізу підлягали технологічні карти та тепло-технічні графіки плавки, маршрутні карти, відомості про сировинні матеріали, згідно з ОСТ 14-1-147-86 «Сталеплавильне виробництво. Загальні технічні умови» на період проведення експериментів.

Розрахунку підлягають такі параметри:

- загальна кількість тепла  $E_0 + E_w^0$ , що бере участь у технологічному процесі, кДж/кг;
- корисна робота  $A_0$ , спрямовану отримання основний товарної продукції, сталі, кДж/кг;
- термодинамічна сила  $X_0$ , відповідальна за одержання товарної продукції, кДж/кг;
- термодинамічна сила  $X_w$ , з якою зв'язується утворення відходів, кДж/кг;
- значення узгодженого коефіцієнта  $\lambda$  для технологічного процесу;
- енергія екзотермічних реакцій у ванні печі (конвертері), кДж/кг ( $\text{м}^3 / \text{т} \cdot \text{ч}$ );
- поточні значення загальної ентропії  $\Delta S$  для технологічного процесу, як сумарна зміна нерівноважного стану в системі за час процесу виплавки сталі. Вона відображає втрати та перерозподіл енергії у вигляді тепла, газів та незворотних процесів, у тому числі:
  - зміна ентропії ( $\Delta$ ), пов'язана з передачею тепла від джерела (факела, екзотермічних реакцій) до ванни, кДж/К;
  - зміна ентропії у додаткових хімічних реакціях ( $\Delta S_{\text{аз}}$ ), пов'язаних з утворенням газів ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) при окисленні вуглецю та домішок, кДж/К. Ентропія хімічних реакцій визначалася, як сума ентропії продуктів за мінусом ентропії реагентів,  $\Delta S = \sum n_i S_i$ ;
  - зміна ентропії і незворотності ( $\Delta S_i > 0$ ), як у внутрішньої генерації, так і ентропії через незворотні процеси (тертя, турбулентність, теплові втрати), що вказують на втрату корисної енергії, яка розсіюється в системі, кДж/К;
  - швидкість зміни ентропії ( $\frac{dS}{dt}$ ), Дж/(К·с);
  - коефіцієнт якості сталі, КЯС (частки од.).

Ці величини разом показують, як енергія процесу перетворюється на корисну роботу і відходи, причому в мартенівському процесі ці значення вище через більшу тривалість, а в конвертерному – нижче, але з більшою інтенсивністю.

У хронологічному порядку було досліджено 9 плавок із відхиленнями за теплотехнічними параметрами від технологічних завдань на плавку.

Відхилення стосувалися зміни теплового режиму печі або конвертера у бік перевищення кількості енергоносія, що вводиться в межах  $\pm(5 \div 13)\%$  від номінальних значень, а також змін якісних або кількісних показників матеріального потоку (сировини). Аналізу підлягали плавки з випадковими відхиленнями до 10% по тоннажу брухту, що завантажується і заливається чавун, які не порушували допустимих меж за потужністю печі. Кислотність шлаку в контрольних плавках утримувалася лише на рівні  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 0,55 - 0,85$ . Цільові температурні режими досягалися зміною подачі теплоносія (газ) та кисню в піч. Якість сталі для конкретних плавок визначалося за коефіцієнтом якості сталі, описаного в роботі [7], таким чином:

$$\Lambda = \frac{\sigma_s \delta_s}{\sigma_n \delta_n} [1 - \pi(S + P)]$$

де:  $\pi$  – коефіцієнт впливу домішок (0,1–0,5);  $\sigma_s$  – опір на розрив, МПа (370–490 для вуглецевих сталей);  $\delta_s$  – відносне подовження (%) при розтягуванні зразка (не менше 20% для вуглецевих сталей);  $\sigma_n$  і  $\delta_n$  – нормативні показники (370–490 МПа і трохи більше 20% відповідно, для вуглецевих сталей);  $S$  і  $P$  – масові частки (%) хімічних елементів (сірки та фосфору), які максимально негативно впливають на якість сталі.

Вихідні дані до розрахунку представлені у табл. 1.

Результати дослідження зображені на рис. 1 у вигляді графіків залежності зміни ентропії  $\Delta S = f(E_0, E_w)$  в порівнянні з графіком зміни якості результуючого продукту – сталі  $\Lambda = \phi(E_0, E_w)$ , який оцінювався за загальним відхиленням параметрів хімічного складу від нормативних значень згідно з ГОСТ 380-2005 «Сталь вуглецева звичайної якості».

Залежності, отримані експериментально-розрахунковим шляхом мають деяку точку перегину «а» (аналогічні точки є і у інших залежностей в системі), на яку завжди можна порахувати значення параметра  $k = E_w / E_0$ , розуміючи під цим значенням деяку сукупність термодинамічних параметрів, здатних забезпечити подолання принципу термодинамічного двоєдності, зокрема, умови  $k \approx 0,62$ . У технологічному процесі, що протікає у ванні мартенівської печі, якщо туди подається додаткове опосередковане джерело зовнішньої енергії, зміна ентропії всієї системи, що приведена до базової енергії, при невеликих значеннях  $\Delta E_w \approx 1 \cdot 10^4$  кДж/кг зменшується від  $0,81 \frac{1}{K}$  до  $0,68 \frac{1}{K}$ , тим самим показуючи здібності системи до більшої організованості, і зокрема, продувка заснована на тому, що окислювальні процеси у ванні пов'язані тільки із зовнішнім киснем, а природна мінімізація відходів обумовлена зниженням подачі у ванну печі сирової кислоти руди. Однак, після певної межі, зі зростанням  $\Delta E_w > 0,968 \cdot 10^4$  кДж/кг можна бачити суттєве зростання зміни ентропії у бік її різкого збільшення від  $0,67 \frac{1}{K}$  до  $0,89 \frac{1}{K}$ , що свідчить про появу в системі дії, спрямованої на дезорганізацію технологічного процесу. Про це говорить, зокрема, різке зниження активності окисних екзотермічних реакцій (див. рис. 1) з подальшим обов'язковим зниженням якості основної продукції – сталі.

Подібні процеси можливі і в конвертерній чаші, якщо на вході суттєво змінити режим подачі кисню. Якість металу в цьому випадку також знижуватиметься. Тільки в конвертері при цьому не стоїть завдання мінімізації відходів – вони в такому режимі тільки зростають за рахунок перерозподілу компонентів вихідної сировини між відомими нам двома частинами.

Таблиця 1

**Вихідні дані та результати промислового експерименту в умовах мартенівського виробництва з продувкою ванни киснем та для киснево-конвертерного виробництва**

| Вихідний параметр                                              | Мартенівська піч                                    |                                                   | Киснево-конвертерний Агрегат                      |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                                                                | без продування киснем                               | з продуванням киснем                              |                                                   |
| Потужність, т                                                  | 250                                                 | 250                                               | 200                                               |
| Температура ванни,                                             | ~1700 К                                             | ~1750 К (зріст на 50–100 К)                       | ~1700 К                                           |
| Час плавки                                                     | 8 годин                                             | 6 годин                                           | 0.5 години (30 хвилин)                            |
| Витрата палива, кг/т                                           | 130 ± 20,0                                          | 90 ± 30,0                                         | 20 ± 7,0                                          |
| $E_0$ , кДж/кг                                                 | $(3,0^{+1,3}_{-0,5}) \cdot 10^4$                    | $(2,1^{+0,65}_{-0,45}) \cdot 10^4$                | $(1,1^{+0,55}_{-0,34}) \cdot 10^4$                |
| Теплота процесу, Дж                                            | $(1,3^{+0,6}_{-0,5}) \cdot 10^{12}$                 | $(1,0 \pm 0,54) \cdot 10^{12}$                    | $(\cdot 10^{11})$                                 |
| Витрата кисню м³/(т·год),                                      | Відсутня                                            | 20 ± 7,7                                          | 50 <sup>+27</sup> <sub>-15</sub>                  |
| Корисна робота, $A_0$ , кДж/кг                                 | 1 100 <sup>+200</sup> <sub>-250</sub>               | 1 300 <sup>+500</sup> <sub>-250</sub>             | 1950 <sup>+550</sup> <sub>-330</sub>              |
| Матеріальний потік $J_0$ , кг/(кг·ч)                           | 0,15 ± 0,04                                         | 0,18 ± 0,33                                       | 1,79 <sup>+0,10</sup> <sub>-0,25</sub>            |
| Матеріальний потік $J_w$ , кг/(кг·ч)                           | 0,029 <sup>+0,011</sup> <sub>-0,005</sub>           | 0,025 <sup>+0,009</sup> <sub>-0,011</sub>         | 0,11 <sup>+0,08</sup> <sub>-0,03</sub>            |
| Термодинамічна сила $X_0$ , кДж/кг                             | 2,3 <sup>+0,54</sup> <sub>-0,35</sub>               | 3,0 <sup>+0,49</sup> <sub>-0,25</sub>             | 3,5 <sup>+0,54</sup> <sub>-0,75</sub>             |
| Термодинамічна сила $X_w$ , кДж/кг                             | 0,8 ± 0,15                                          | 1,05 <sup>+0,35</sup> <sub>-0,33</sub>            | 0,80 <sup>+0,11</sup> <sub>-0,07</sub>            |
| Середня швидкість зміни ентропії ( $\frac{dS}{dt}$ ), Дж/(К·с) | 4.86 · 10 <sup>4</sup>                              | 4.41 · 10 <sup>4</sup>                            | 8.3 · 10 <sup>4</sup>                             |
| <b>Відходи</b> : шлак, $J_w$ , кг/т                            | 150–200 кг/т                                        | 120–160 кг/т (зниження на 10–20%)                 | 80–120 кг/т                                       |
| - з залишку шлаку                                              | Високий вміст FeO                                   | Більше Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , менше FeO | Більше Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , менше FeO |
| <b>Відходи</b> : газ, м³/т                                     | 500–600 м³/т                                        | 400–500 м³/т (зниження на 15–25%)                 | 150–200 м³/т                                      |
| - з залишків газів                                             | ~80–90% CO, решта CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> | 30–50% CO <sub>2</sub> , менше CO                 | 40–60% CO <sub>2</sub> , менше CO                 |
| Відходи: пил, кг/т                                             | 1–2 кг/т (~2–4.5 г/м³)                              | 5–10 кг/т, зростання у 5–10 разів                 | 2–5 кг/т, зростання у 5–10 разів                  |

З цих досліджень можна зробити висновок про практичне існування деякої межі для додаткової енергії, що вводиться в технологічний процес, яка може, не порушуючи цілісності основного процесу, певним чином впливати на ту частину сировинного потоку, з якої в звичайних умовах виходить відхід.

Як другий технологічний процес виберемо технологію випікання хліба в традиційному і сучасному вигляді, коли в якості додаткової енергії виступає модифікована зовнішня енергія  $E_w^0$ . Технологія випікання хліба, ставши масовою для більшості країн світу, постійно змінюється у напрямку сортаменту хлібних виробів та їх якості. Тому основний розвиток технології пов'язаний із цими проблемами, майже ніяк не належить до проблем відходоутворення, яке, втім, для цієї технології не є проблемним,

тому що основні відходи легко утилізуються в інших галузях харчування. Тим не менш, головним і найважливішим відходом залишається теплові втрати, що досягають 58% від зовнішньої енергії, що використовується. І в цьому плані сучасні індукційні та резонансні технології дають переваги у мінімізації втрат тепла.

**Методологія та припущення** описані вище, відрізняються тим, що дані традиційної випічки засновані на типових хлібопекарських печах (конвекційних або подових) [8]. Для мікрохвильової технології використані дослідження з НВЧ-випічки, де нагрівання відбувається за рахунок діелектричного нагрівання води в тесті [9]. Технологія резонансних частот менш поширена, передбачається використання електромагнітних хвиль на частотах, що відповіда-

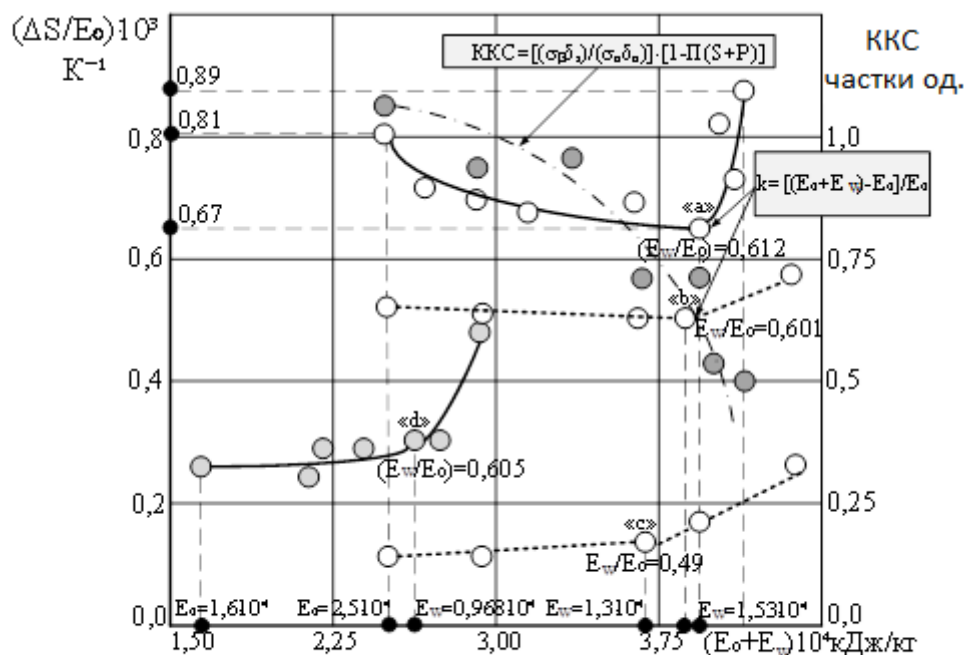


Рис. 1. Динаміка зміни показників мартенівської плавки з продуванням ванни киснем та порівняно з киснево-конвертерним способом отримання сталі. Тут I – мартенівський процес; II – киснево-конвертерний процес

ють резонансним коливанням молекул води (наприклад, 2.45 ГГц, як у НВЧ, але з оптимізацією) [10]. Дані частково екстрапольовані. Вихідні дані зведено в таблицю 2.

Зниження відходів у технології використання резонансних частот пов'язане з зниженням теплових втрат, пов'язаних з точковим нагріванням компонентів тіста і рівномірним розподілом тепла (енергії), а також із оптимізацією технологічного процесу та більш ефективним використанням вихідної сировини.

Технологія резонансної обробки тіста дозволила знизити матеріальні відходи на 37–45%, а теплові втрати – на 54,1%. Застосована зовнішня резонансна енергія електромагнітних хвиль, налаштованих на частоти, що відповідають резонансним коливанням молекул води в тісті (наприклад, 2.45 ГГц) і магнетроном, що випускаються. Результат її впливу – прискорена та цілеспрямована обробка тіста за рахунок діелектричного ефекту з різким зниженням теплових втрат за рахунок точкового впливу енергії електромагнітних хвиль на резонансних частотах для вибіркового нагрівання молекул води в тісті, з мінімізацією нагрівання навколишнього середовища.

У результаті промислового експерименту (рис. 2) не вдалося отримати достовірних статистичних даних про стан системи у випадку, коли модифікована енергія могла б скласти величину в межах  $E_0^w / E_0 = 1,62$ , (тут  $E_0^w$  – сумарна енергія, що подається) що відповідало б нашим припущенням. В даному випадку (див. рис. 2) це співвідношення могло досягнути величини  $E_0^w / E_0 = 1350 / 2050 = 0,62$ . При цьому зміна

ентропії, тобто ступінь неорганізованості системи, що передбачає як отримання товарної продукції, так і мінімізацію відходів за рахунок модифікованої енергії  $E_0^w > E_0$  мало тенденцію до зниження від  $\Delta S / E_0 = 8,3$  до  $\Delta S / E_0 = 5,1$ .

Фактичні значення модифікованої енергії, здатні як до виробництва товарної продукції, так і до мінімізації відходів виявилися здатними до позитивного результату. Однак, навіть оціночні розрахунки показують, що при збільшенні кількості модифікованої енергії, що подається в систему до  $E_0^w = 1750$  кДж/кг дозволило б знизити зростання ентропії до  $\Delta S / E_0 = +2,3$  що дуже істотно. При цьому теплові втрати в системі могли б знизитися від нинішніх значень при подовій випічці  $\Delta Q_m / E_0 = 0,595$  до можливих  $\Delta Q_m / E_0 = 0,340$ , що дало б економію теплових втрат у розмірі не менше  $0,595 \cdot 2050 - 0,340 \cdot 1350 = 760$  кДж/кг, або 62% до існуючого у традиційній випічці хліба.

Звернімо увагу на динаміку складових термодинамічних сил, які за таких параметрів відповідали за виробництво, власне, хліба –  $J_0 X_0$  та одержання промислових відходів –  $J_w X_w$  (див. рис. 2, б). Застосування модифікованих джерел зовнішньої енергії, в даному випадку, індукційної та резонансної, дозволило перерозподілити термодинамічні сили та матеріальні потоки, що відповідають за отримання товарної продукції та відходів, відповідно, таким чином, щоб збільшилася їхня друга складова майже в 2 рази, при зменшенні першої складової на 57%. При цьому цікавим є співвідношення  $(J_0 X_0)^{pez} / (J_0 X_0)^{nod} = \frac{22,8}{37,5} = 0,62$ , та співвідношення

Таблиця 2

Вихідні дані для досліджень стійкості системи для технології випікання хліба у традиційній технології та в технологіях з модифікованими джерелами енергії

| Параметр                                                                  | Традиційна випічка | Мікрохвильова технологія | Технології резонансних частот |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Продуктивність, т/доба                                                    | 10                 | 10                       | 10                            |
| Температура процесу, °C                                                   | 220–250            | 100–120                  | 110–130                       |
| Тривалість випічки, год                                                   | 0,66               | 0,166                    | 0,133                         |
| Витрата палива, ел. Енергії                                               | 50 кг/т сировини   | 0,42 кВт·год/кг Сировини | 0,33 кВт/кг Сировина          |
| Зовнішня енергія, $E_0$ кДж/кг сировини                                   | $E_0 = 20\ 5\ 0$   | $E_0^w = 15\ 4\ 0$       | $E_0^w = 13\ 1\ 0$            |
| Теплота процесу, кДж                                                      | $2,8 \cdot 10^7$   | $2,1 \cdot 10^7$         | $1,82 \cdot 10^7$             |
| Корисна робота, $A_0$ кДж/кг сировини                                     | 800                | 600                      | 550                           |
| Матеріальний потік $J_0$ , кг/(кг сировини · год)                         | 0,029              | 0,029                    | 0,029                         |
| Матеріальний потік $J_w$ , кг/(кг сировини · год)                         | 0,004              | 0,003                    | 0,0025                        |
| Термодинамічна сила $X_0$ , кДж/кг                                        | 1200               | 1000                     | 900                           |
| Термодинамічна сила $X_w$ , кДж/кг                                        | 120                | 150                      | 2 20                          |
| Швидкість змін. ентропії ( $dS/dt$ ), до Дж/(К·с)                         | $1,74 \cdot 10^2$  | $1,39 \cdot 10^2$        | $1,16 \cdot 10^2$             |
| ВІДХОДИ, кг/кг сировини (% зниження порівняно з подовою), в т.ч. ч.:      |                    |                          |                               |
| –зола                                                                     | 0,11               | 0,06 (36,3%)             | 0,038 (65,4%)                 |
| –цвіль                                                                    | 0,05               | 0,03 (40%)               | 0,02 (60%)                    |
| –пригорілі частини                                                        | 0,01               | 0,005 (50%)              | 0,003 (70%)                   |
| –борошно та крихти                                                        | 0,02               | 0,01 (50%)               | 0,005 (75%)                   |
|                                                                           | 0,03               | 0,015 (50%)              | 0,01 (67%)                    |
| ТЕПЛОВІ ВТРАТИ, $Q_m$ кДж/кг, (% зниження порівняно з подовим), в т.ч.ч.: |                    |                          |                               |
| –заміс                                                                    | 1200               | 900 (25%)                | 550 (45,8%)                   |
| –ферментація                                                              | 50                 | 40 (4,4%)                | 35 (6,4%)                     |
| –пропікання                                                               | 150                | 100 (11,1%)              | 70 (12,7%)                    |
| –охолодження                                                              | 900                | 700 (77,8%)              | 490 (89,1%)                   |
|                                                                           | 100                | 60 (66,5%)               | 35 (6,4%)                     |
| Інтегральний показник якості [11]                                         | 1.1                | 1.05                     | 1.0 5                         |

$(J_w X_w)^{pez} / (J_w X_w)^{pod} = \frac{0,67}{0,41} = 1,62$ . Вони знову при-  
водять нас, але вже як експериментальні, до відо-  
мих за минулими дослідженнями значень [12], але  
тепер вони відносяться вже не до зовнішньої моди-  
фікованої енергії, а до співвідношення наведених  
форм корисної роботи, пов'язаної з виробництвом  
товарної продукції та перетворенням тієї частини  
сировини, яка раніше йшла у відхід, зберігаючи цю  
 $k = 0,62$  та пропорцію  $1/k = 1,62$ .

Недостатність зовнішньої додаткової енергії не  
дозволяє запустити мінімізаційні процеси управління  
відходами всередині виробничої системи. А надлишок  
цієї енергії (понад 0,62) здатний привести виробничу  
систему зі стійкого стану в стан близький до хаосу, що  
виробничою мовою означає припинення виробництва  
запланованої товарної продукції, отримання явного  
браку, і все це при тому, що основне завдання залу-  
чення додаткової енергії для переробки сировини, що  
раніше траплялося у відхід – не здійснюється.

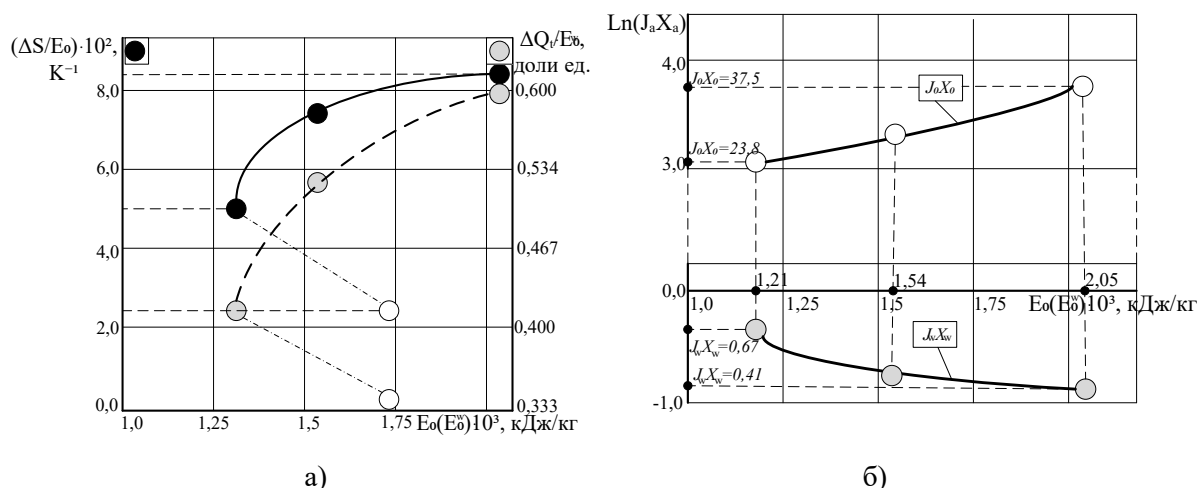


Рис. 2. Динаміка зміни показників у технології випікання хліба, послідовно, подовим способом, індукційним способом, із застосуванням резонансних частотних джерел енергії: а) – зміна ентропії, пов'язана із зміною джерела зовнішньої енергії; б) – зміна взаємодіючих термодинамічних сил і потоків, відповідальних отримання товарної продукції  $J_0 X_0$  і на відходу  $J_w X_w$

**Головні висновки.** Аргументованість представлених закономірностей, як доказ, потребує подальших індивідуальних досліджень, та поки може відноситися тільки до окремих груп прикладних технологій, зокрема, зв'язаних з деякими аспектами систем, орієнтованих на свої виробничі завдання. Й децю інший висновок, який, на наш погляд, є не менш актуальним та перспективним для людини, що створює технології 5.0. Подолання принципу термодинамічної двоєдності з метою мінімізації відходів і досягнення максимально можливої продуктивності, в якому проявляються властивості, близькі до властивостей «золотого перетину» Фібоначчі.

Незважаючи на їх випадкову чисельну збіжність, це може бути сигналом про можливе прагнення штучних технологічних процесів, створених людським розумом, до їх гармонійного співіснування з Природою за допомогою подальшого розвитку, без порушення ландшафтів, гідрологічних деформацій, атмосферних аномалій. Як форма співіснування природного та штучного світів на планеті, це раціональне використання природних ресурсів при мінімальному техногенному впливі на поверхню планети. Це основа термодинамічного оптимізму на планеті, коли Природа і людина знаходять умови для термодинамічно узгодженого співіснування.

### Література

1. Волошин В. С. Мінімізація промислових відходів у технологічних процесах, термодинамічний підхід. Екологічні науки, № 6(57), 2024. С. 25-30.
2. Волошин В. С., Бурко В. А. Відповідність принципу термодинамічної двоєдності, як причини відходоутворення. Вісник Приазовського державного технічного університету. 2024. Серія: Технічні науки Вип. 49. Т. 2. С. 86-93.
3. Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. Київ-Маріуполь, СПД Самченко. 2024. 88 с.
4. Luis A. Morales-Sánchez, L. A., Moreno-García J. A., Mora-González J. A. An Experimental Study of the Empirical Identification Method to Infer an Unknown System Transfer Function. MDPI (Sensors), 2022. 140 p.
5. Bogdanski K, Best M. C. A new structure for non-linear black-box system identification using the extended Kalman filter. SAGE Publications (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering), 2017. P.223-232.
6. Jewkes J., Sawers D., Stillerman R. Oxygen Steel-Making. Palgrave Macmillan, 1969. P.471-555.
7. Krauss G. Steels: Processing, Structure, and Performance. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, 2015. 704 p.
8. Purlis, E. Baking Process Design and Energy Efficiency. Food Research International, Vol. 43, Issue 7, Amsterdam: Elsevier. 2010, P. 1861-1869.
9. Sumnu, G., Sahin, S. Microwave Baking: Principles and Applications. In: Advances in Food Science and Technology. New York. Wiley, 2019. 320 p.
10. Therdtai, N., Zhou, W. Recent Advances in Bread Baking Technology. Trends in Food Science and Technology, Vol. 20, Issue 2, Amsterdam: Elsevier. 2009, P. 89-97.
11. Campbell G. M. Baking Quality – an overview. Elsevier (ScienceDirect). Amsterdam, 2005. 421 p.
12. Волошин В. С. Чи варто шукати «золоті пропорції» Фібоначчі у процесах утворення відходів. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки, 36. наук. праць. Вип. 44. Дніпро, 2022. С. 43-53.

Дата першого надходження рукопису до видання: 03.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025