

## МІНІМІЗАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ, ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ПІДХІД

Волошин В.С., Бурко В.А.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

вул. Гоголя, 29, 49044, м. Дніпро

vsvlshn52@gmail.com, burko\_v\_a@pstu.edu

Проблема мінімізації промислових відходів є однією з найактуальніших у сучасному світі, оскільки їх накопичення створює значний негативний вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини. Традиційні підходи до управління відходами, зосереджені на їх утилізації або переробці після утворення, часто виявляються неефективними та недостатніми для досягнення сталого розвитку. Тому, дослідження та розробка нових методологій, спрямованих на зменшення відходів безпосередньо у джерелі їх виникнення, тобто в технологічних процесах, є надзвичайно важливим завданням. Дана робота пропонує інноваційний підхід до вирішення цієї проблеми, використовуючи принципи нелінійної термодинаміки. На відміну від класичної термодинаміки, яка розглядає лише системи, що перебувають у стані рівноваги, нелінійна термодинаміка аналізує системи, далекі від рівноваги, де процеси протікають з різною швидкістю та інтенсивністю. Це дає змогу отримати глибше розуміння процесів утворення відходів та розробити ефективніші стратегії їх мінімізації.

Ключовим елементом нашого підходу є поняття термодинамічної нерівноважності. Показано, що технологічні процеси, які відбуваються в умовах сильної термодинамічної нерівноважності, мають більший потенціал для мінімізації відходів. Це пов'язано з тим, що в таких умовах система здатна до самоорганізації та саморегуляції, що дозволяє більш ефективно використовувати наявні ресурси та зменшувати утворення побічних продуктів. В роботі показано, що для досягнення мінімального рівня відходоутворення недостатньо просто створити умови сильної термодинамічної нерівноважності. Необхідно також забезпечити надходження додаткової зовнішньої енергії  $E_w$  заданої якості. Ця енергія повинна мати такі характеристики, які дозволять вивести ту частину сировини, з якої зазвичай утворюється відхід, зі стану термодинамічної рівноваги та перевести її у стан слабкої нерівноважності. Це створить умови для того, щоб ця частина сировини могла ефективно інтегруватися в корисний продукт, не перетворюючись на відхід. Згідно з розрахунками, для досягнення такого ефекту необхідно ввести додаткову енергію в розрахунковому розмірі не менше 62% від енергії, що використовується в технологічному процесі. Це може здаватися значним енергетичним внеском, однак, враховуючи економічні та екологічні вигоди, отримані внаслідок мінімізації відходів, такі витрати є виправданими. Важливо зазначити, що якість додаткової енергії є не менш важливою, ніж її кількість. Енергія повинна мати такі характеристики, які дозволять ефективно впливати на стан сировини та сприяти мінімізації відходів. В рамках дослідження також було розглянуто питання бифуркації та її впливу на технологічні процеси. Показано, що потрапляння термодинамічної системи до зони парної бифуркації за параметрами феноменологічного рівняння не знижує можливості для технологічного процесу у досягненні теоретичного мінімуму відходоутворення. Це означає, що навіть у випадку, коли технологічний процес проходить через стадію нестабільності, за умови правильного застосування енергетичної інтервенції, мінімізація відходів залишається можливою. Однак, існує межа можливостей мінімізації відходів, яка визначається механізмом переходу виробничої системи з додатковими джерелами енергії зі стану парної бифуркації та відповідного їй стану термодинамічної нерівноважності в стан бифуркаційної парної множинності і далі до хаосу. Це розрахункове обмеження є тим бар'єром, який лімітує досягнення заявленого теоретичного мінімуму. Запропонований методологічний підхід до мінімізації промислових відходів з позицій нелінійної термодинаміки, пропонує новий погляд на проблему відходоутворення та відкриває нові можливості для розробки ефективних екологобезпечних технологій. Він дозволяє не лише зменшити кількість відходів, але й підвищити енергоефективність та ресурсозбереження виробничих процесів, що сприяє переходу до сталого розвитку промисловості. *Ключові слова:* промислові відходи, теоретичний мінімум відходоутворення, зовнішня енергія, ентропія, термодинамічна двоєдність.

### Minimization of industrial waste in technological processes, thermodynamic approach. Voloshyn V., Burko V.

The problem of minimization of industrial waste is one of the most urgent in the modern world, since its accumulation creates a significant negative impact on the environment and human health. Traditional approaches to waste management, focused on their disposal or recycling after generation, often turn out to be ineffective and insufficient to achieve sustainable development. Therefore, research and development of new methodologies aimed at reducing waste directly at the source of its origin, that is, in technological processes, is an extremely important task. This work offers an innovative approach to solving this problem using the principles of nonlinear thermodynamics. Unlike classical thermodynamics, which considers only systems in a state of equilibrium, nonlinear thermodynamics analyzes systems far from equilibrium, where processes occur at different speeds and intensities. This allows us to gain a deeper understanding of waste generation processes and develop more effective strategies for their minimization.

The key element of our approach is the concept of thermodynamic disequilibrium. It is shown that technological processes that occur under conditions of strong thermodynamic disequilibrium have a greater potential for minimizing waste. This is due to the fact that under such conditions the system is capable of self-organization and self-regulation, which allows for more efficient use of available

resources and reduction of the formation of by-products. The work shows that to achieve a minimum level of waste generation, it is not enough to simply create conditions of strong thermodynamic disequilibrium. It is also necessary to ensure the receipt of additional external energy  $E_w$  of a given quality. This energy must have such characteristics that will allow removing that part of the raw material from which waste is usually formed from the state of thermodynamic equilibrium and transferring it to a state of weak disequilibrium. This will create conditions for this part of the raw material to be effectively integrated into a useful product without turning into waste. According to calculations, to achieve such an effect, it is necessary to introduce additional energy in an estimated amount of at least 62% of the energy used in the technological process. This may seem like a significant energy contribution, however, given the economic and environmental benefits obtained as a result of waste minimization, such costs are justified. It is important to note that the quality of additional energy is no less important than its quantity. Energy must have such characteristics that will allow it to effectively influence the state of raw materials and contribute to waste minimization. The study also considered the issue of bifurcation and its impact on technological processes. It is shown that the entry of a thermodynamic system into the pair bifurcation zone according to the parameters of the phenomenological equation does not reduce the possibilities for the technological process to achieve the theoretical minimum of waste generation. This means that even in the case when the technological process goes through a stage of instability, provided that energy intervention is correctly applied, waste minimization remains possible. However, there is a limit to the possibilities of waste minimization, which is determined by the mechanism of transition of a production system with additional energy sources from the state of pair bifurcation and the corresponding state of thermodynamic disequilibrium to the state of bifurcation pair multiplicity and further to chaos. This computational limitation is the barrier that limits the achievement of the stated theoretical minimum. The proposed methodological approach to the minimization of industrial waste from the standpoint of nonlinear thermodynamics offers a new perspective on the problem of waste generation and opens up new opportunities for the development of effective environmentally friendly technologies. It allows not only to reduce the amount of waste, but also to increase the energy efficiency and resource conservation of production processes, which contributes to the transition to sustainable industrial development. *Key words:* industrial waste, theoretical minimum of waste generation, external energy, entropy, thermodynamic duality.

Питання створення маловідходних і навіть безвідходних технологій є одним із ключових, яким розглядаються в науці про охорону навколишнього середовища. Ці терміни знаходять розуміння та відображені у законодавчій літературі [1, 2], інженерії [3, 4], екологічних науках [5], як фундаментальні, з погляду екологічної безпеки будь-якого виробництва. Глибоке розуміння фізичного сенсу маловідходності та безвідходності виробництва дозволяє знаходити ефективніші способи та методи мінімізації відходів, забезпечувати захист навколишнього середовища від безмежного накопичення промислових відходів. У роботах автора [6, 7] запропоновано та показано на багатьох прикладах методика оцінки такого показника, як теоретичний мінімум відходоутворення в конкретних технологічних процесах, заснована на їх термодинамічних властивостях. Подібні схеми для різноманітних технологічних процесів включають зіставлення двох графіків: залежностей описуваних феноменологічним рівнянням Л.А. Онсагера для визначення ентропії в системах зі слабкою термодинамічною нерівноважністю і кривою, що показує залежність термодинамічних сил  $X_i$  від параметричного коефіцієнта  $\lambda = \Delta X_i / X_i$ . Проте механізми, і навіть параметричні значення граничних умов такого явища виявлено були.

Зокрема, неочевидним було питання про граничні значення шуканого мінімуму, його умови та причини появи. Як впливає із пізніх робіт І. Пригожина [8, 9], такі залежності виходили з розуміння умов термодинамічної нерівноважності, незворотності та можливих умов стаціонарності таких систем. Однак, при цьому не враховувалися умови, за яких такі системи переходили до стану невизначеності, що робило їх некерованими.

Як показали дослідження, такі невизначені стани можуть стати причинами недосяжності теоретич-

ного мінімуму відходоутворення для певних класів технологічних процесів. Зокрема, зміна (зростання) ентропії у відходоутворюючих системах, як показник мінімізації відходоутворюючих матеріальних потоків, це закономірна величина, яка залежить від якості енергії, що використовується і визначає свій вектор у напрямку протилежному ефективній переробці сировини [10]. Крім того, мінімізація матеріальних потоків для однієї з частин технологічного процесу (наприклад, сировина, з якої виходить відхід), неможлива без відповідної інтерпретації першого закону термодинаміки [11] у тому його розумінні, яке давало відповідь на питання про структурування зовнішньої енергії  $E_0$  та корисної роботи  $A_0$ , яка відбувається у системі.

У такому контексті залишається актуальним питання: наскільки досяжним є такий теоретичний мінімум відходів у технологічному процесі і від чого він залежить. Представимо технологічний процес, який спрямований на одержання готової корисної продукції ( $p$ ) та утворення при цьому деякого відходу ( $w$ ). Реалізація цього технологічного процесу здійснюється у межах деякої виробничої системи. Для такого технологічного процесу інтерпретація першого закону термодинаміки здійснюється у вигляді  $E_0 = \Delta U + (A_{0p} + A_{0w})$ , де  $E_0$  – підведена зовнішня енергія;  $\Delta U$  – внутрішня енергія системи;  $A_{0p}$  – корисна робота системи, спрямовану отримання продукції;  $A_{0w}$  – робота системи, спрямовану отримання відхода.

З метою мінімізації відходів усередині джерела виникнення – самого технологічного процесу, вимагатимемо присутності додаткового джерела зовнішньої енергії  $\Delta E_w$ . Тоді перший закон термодинаміки може бути записаний у наступному вигляді:  $E_0 + \Delta E_w = \Delta U + (A_{0p} + A_w)$ , де:  $A_w$  – робота, що здійснюється для впорядкованого перетворення на про-

дукцію тієї частини сировини  $J_w$ , яка у звичайному вигляді переходить у відхід (рис. 1). У контексті технологічного процесу, спрямованого на виробництво готової продукції (р) та утворення відходів (w), величина  $\Delta U^*$  відображає енергію, що зберігається всередині системи, включаючи всі форми внутрішньої енергії: кінетичну, потенційну, хімічну та термодинамічну, у тому числі, ендегенну, що відноситься до перетворення матеріального потоку  $J_w$ . Ця

енергія може змінюватися в результаті підведення або відведення енергії  $\Delta E_w$  та виконання роботи системою  $A_{op} + A_{op}$ .

Припустимо, що система змінюватиметься таким чином, щоб робота з перетворення тієї частини сировини, з якої виходить відхід  $A_{0w} \rightarrow 0$ . Це означає, що відходи в системі матимуть максимальне значення.

Припустимо тепер, що частина роботи в системі, що витрачається на перетворення тієї частини сиро-

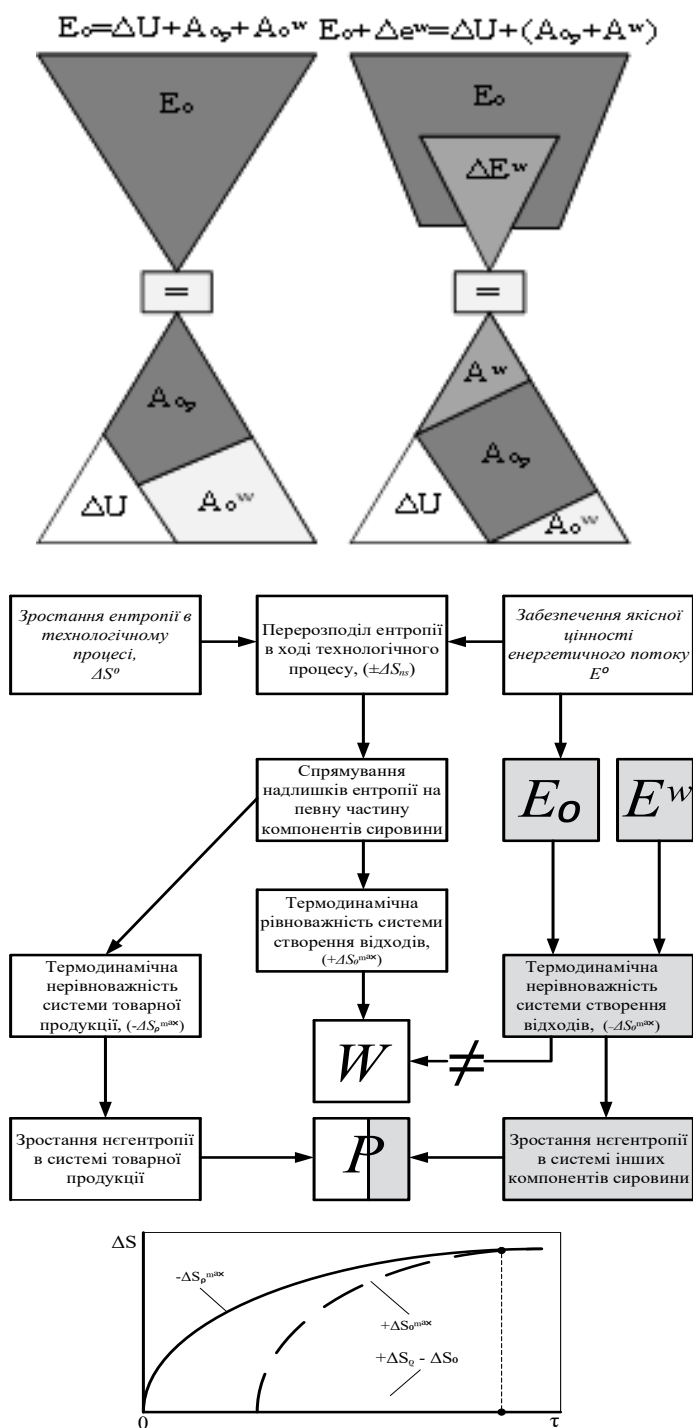


Рис. 1. Енергетичний баланс та умови перерозподілу ентропії та негентропії у процесі виробництва корисних продуктів та їх графічна інтерпретація для розумів першого та іншого законів термодинаміки

вини  $J_w$ , з якої раніше виходив відхід  $A_0 w \neq 0$  і зростатиме в результаті підведення додаткової зовнішньої енергії певної якості. Частина цієї енергії знову піде на збільшення внутрішньої енергії  $\Delta U^*$ , а інша частина у вигляді роботи  $A_{0w} + A_w > 0$  – витрачається на перетворення зазначеної раніше частини сировини  $J_w$ . Але цей «відхід» матиме дещо інші якості, які роблять його кориснішим. На це ясно вказують зміни, що відбуватимуться з ентропією такої системи (рис. 1).

Якщо об'єктом аналізу вектора зміни ентропії є нерівноважна неізольована система, в якій протікають як дисипативні, так і впорядковані, репаративні процеси перетворення енергії та речовини, то інший закон для інтегральної ентропії можна записати у вигляді  $\Delta S_k = \sum k \Delta S_k^{\pm} \geq 0$ , де  $\Delta S_k^{\pm}$  відноситься до тієї з  $k$ -их властивостей, які в даній системі змінюються в дисипативному ( $\Delta S_k^{\pm} \pm > 0$ ) або репаративному ( $\Delta S_k^{\pm} \pm \leq 0$ ) напрямках. Подібна схема реалізує принцип, що відображається у відомій теоремі І. Пригожина, згідно з яким, для таких систем існують можливості для емісії ентропії в надсистему та зворотні процеси енергетичної інтервенції з надсистеми в систему, що кореспондується з принципом термодинамічної двоєдності, описаної в роботі [12], а також із роботами авторів [13, 14].

Зокрема, шляхом зниження  $\Delta U_w$  (частини внутрішньої енергії, пов'язаної з накопиченням непридатних відходів) та перерозподілу енергії  $\Delta E_w$  на корисне перетворення сировини, система стає термодинамічно ефективнішою. Подібний перерозподіл сприяє зниженню зростанню ентропії відходів (за рахунок їх упорядкованості та корисності) [15].

Стосовно нашого випадку доречним буде розгляд рівняння Л. Онсагера для отримання ентропії в термодинамічно близьких до рівноваги системах на підставі перетвореної формули [7]

$$\Delta[S] = (J_0 X_0 + J_w X_w) \lambda (1 - \lambda) \quad (1)$$

Тут  $X_0$  і  $X_w$  відповідно, термодинамічні сили, спрямовані на перетворення частини матеріального потоку (частини сировини)  $J_0$  в готову продукцію, і матеріального потоку  $J_w$  для частини сировини, яка раніше потрапляла у відхід, а тепер – в незаплановану товарну продукцію.  $\lambda = \frac{X_w}{X_0 + X_w}$  – деякий феноменологічний коефіцієнт, що визначає відношення докладання шуканих сил  $X_0$  і  $X_w$  і досконалих при цьому роботу  $A_0$  і  $A_w$  відповідно. Співвіднесемо обидві частини цього виразу з тією роботою, яка припадає на одержання товарної продукції за допомогою енергії  $E_0$  наступним чином

$$\frac{\Delta[S]}{E_0} = \frac{(J_0 X_0 + J_w X_w)}{E_0} \lambda (1 - \lambda) \quad (2)$$

Та запишемо в наступному вигляді:

$$\lambda_s = r \lambda (1 - \lambda) \quad (3)$$

де обидві частини вираз мають власний зміст, що відображає їх роль у феноменологічній кривій [6]. А саме,  $\lambda_s = \frac{\Delta[S]}{E_0}$  – наведений показник зміни ентропії всієї виробничої системи до тієї частини зовнішньої енергії, яка спочатку є у системі. А  $r = \frac{(J_0 X_0 + J_w X_w)}{E_0}$  – термодинамічний показник, що відображає відношення сумарної роботи з перетворення всієї сировини ( $J_0 + J_w$ ) в товарну продукцію до базового значення енергії  $E_0$ . Саме такий показник пов'язує теоретичний мінімум відходуотворення таких систем з якісними та кількісними характеристиками зовнішньої енергії, що підводиться в систему. Представимо вираз (2) у вигляді логістичного відображення відповідної функції з характерними для неї властивостями [16, 17].

$$(\lambda_s)_n = r \lambda_{n-1} (1 - \lambda_{n-1}) \quad (4)$$

Для цього рівняння вимагатимемо виконання наступних умов:

1. Послідовність ітерації повинна дотримуватися за умови сумісності параметрів,  $\lambda_s = \frac{\Delta[S]}{E_0}$  та  $\lambda = \frac{X_w}{X_0 + X_w}$  в тому самому часовому інтервалі, позначеному як  $\Delta n$ .

2. Крок ітерації вибираємо як  $\Delta n \sim \Delta t$  у деякому часовому інтервалі. При цьому ми свідомо втрачаємо частину даних безперервної функції, але натомість отримуємо картину зв'язку показника мінімізації відходів з термодинамічних характеристик системи.

Перше умова може бути здійсненним у разі, якщо в ньому будуть враховані можливості для інтервальної ітерації, що вимагає розгляду його через порівнянні значення відповідних потужностей  $A$ , як властивостей існуючої термодинамічної системи.

$$\lambda_s \cong \lambda \quad \text{или} \quad \frac{\Delta[S]}{A_0} \Delta n \cong \frac{\dot{X}_w}{\dot{X}_0 + \dot{X}_w} \quad \text{или} \quad \Delta[S] = \lambda \frac{A_0}{\Delta n}$$

Останнє означає, що умовою логістичного стану формули (1) є пряма залежність зміни ентропії такої системи від роботи, яку вдається виконати завдяки енергії  $E_0$ , що є присутньою в технологічному процесі. Така залежність у вигляді феноменологічної кривої у співвідношенні з графіками термодинамічних сил  $X_0$  та  $X_w$ , що беруть участь у переробці матеріальних потоків  $J_0$  та  $J_w$  представлена на рис. 2.

Цю діаграму слід розглядати в порівнянні з іншим графіком (рис. 2), що відображає результати розрахунку залежності  $\lambda_s$  ( $r$ ) у традиційному для таких логістичних рівнянь вигляді [17]. Для нас важливими є інтервали, в яких відображається відношення параметрів системи до термодинамічної рівноваги.

1. Умова, коли  $0 \leq r < 1,0$  відображає область термодинамічної рівноваги для всієї виробничої системи відходу. Усі траєкторії системи прагнуть нуля. Тут виконується умова  $J_w X_w = 0$  чи  $A_w = 0$ , коли

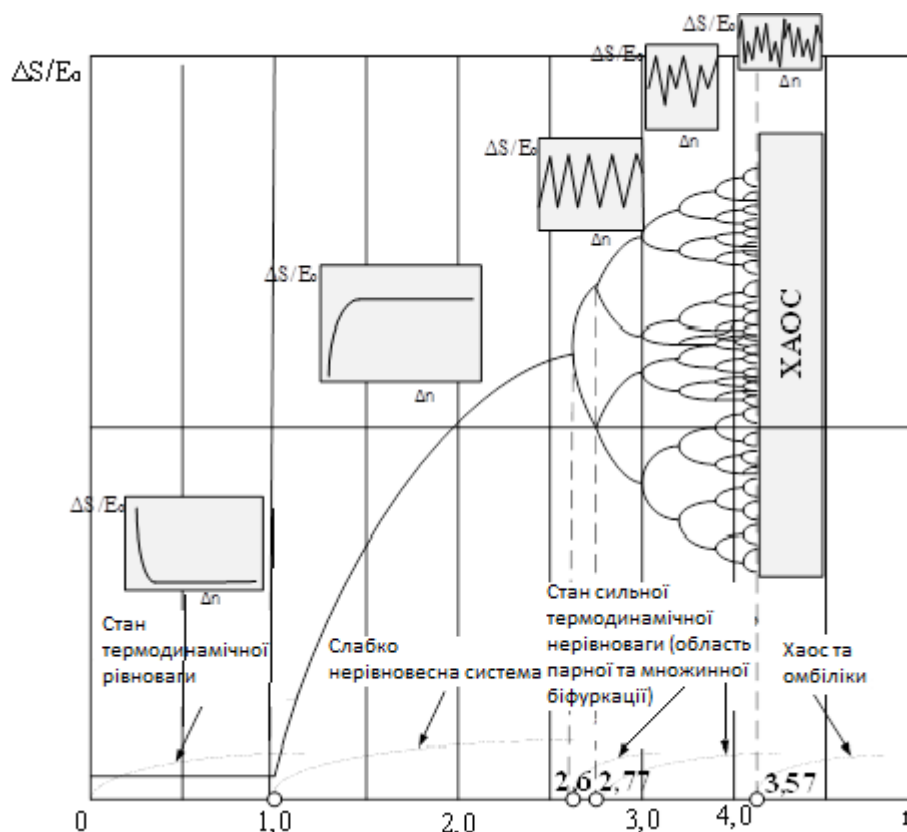


Рис. 2. Залежність зміни ентропії у технологічному процесі від показника його термодинамічний стан

технологічний процес взагалі пов'язані з цілеспрямованим перетворенням потенційних відходів. Або, коли нерівнозначні термодинамічні сили, створені задля створення товарної продукції і на відході, розділені і перебувають у стані термодинамічного двоєдності [18].

2. Умова попадання системи з рівноважного стану до стану слабкої термодинамічної нерівноважності передбачає  $r \geq 1$  (рис. 1). У такому стані система прагне фіксованої точки і знаходить здатність до реалізації принципу термодинамічного двоєдності по відношенню до різних частин  $J_0$  та  $J_w$  матеріального потоку (сировини). При цьому лише умови  $J_0 X_0 \geq 0$  явно замало перетворення другої частини матеріальних потоків  $J_w$ , які довільним чином переходять у відходи. Виникає необхідність у деякому  $X_w \neq 0$ .

3. Умова  $r \geq 2,6$  або  $J_w X_w \leq 0,625 E_0$  відображає ту частку додаткової зовнішньої енергії (з розрахунку умовних 62,5% від початкової енергії для реалізації основного технологічного процесу), якої буде достатньо, щоб термодинамічні сили, що реалізуються в сильно нерівноважній системі  $X_w$  були здатні перетворити матеріальний потік  $J_w$  у напрямі його суттєво інших якостей, наприклад, споживчої цінності.

4. В той же час, що виникають біфуркації, і перехід системи до періодичної поведінки, коли недо-

статність додаткової зовнішньої енергії, навіть за умови термодинамічної нерівноважності в системі, наприклад, при  $r \geq 2,77$  або  $J_w X_w \leq 0,564 E_0$  є джерелом парної біфуркації, а при  $2,6 < r < 3,57$  або  $J_w X_w > 0,389 E_0$  — ознакою вже множинної біфуркації, що робить систему малокерованою щодо цікавого для нас матеріального потоку  $J_w$ .

5. Далі, за умови  $r \geq 3,57$  або  $J_w X_w \leq 0,389 E_0$ , тобто, при недостатності енергії, що вводиться (менше 39% від початкової, необхідної для забезпечення основного технологічного процесу), система переходить у стан повного хаосу з чутливістю до початкових умов щодо можливостей не тільки для переробки потенційних відходів ( $w$ ), а й для реалізації основної цілі системи — продукції ( $p$ ), коли біфуркаційне множення періодів робить виробничу систему з додатковою зовнішньою енергією  $E_w$  енергетично некерованою в найближчому діапазоні зміни термодинамічного параметра  $r$ .

З викладеного слід висновок у тому, що умовою мінімізації відходів усередині джерела їх виникнення — технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності, є достатність додаткової зовнішньої енергії  $E_w$  заданої якості, щоб вивести ту частину сировини, з якої зазвичай виходить відхід зі стану термодинамічної рівноваги та перевести її у вихідний стан слабкої нерівноважності.

### Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження

1. Умовою мінімізації відходів усередині джерела їх виникнення – технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності, є достатність додаткової зовнішньої енергії  $E_w$  заданої якості.

2. Для того щоб вивести ту частину сировини, з якої зазвичай виходить відхід зі стану термодинамічної рівноваги і перевести її в стан слабкої нерівноважності, в систему необхідно ввести додаткову енергію в розрахунковому розмірі не менше 62% від енергії, що використовується в технологічному процесі.

3. Попадання термодинамічної системи до зони парної біфуркації за параметрами феноменологічного рівняння не знижує можливості для технологічного процесу у досягненні теоретичного мінімуму відходоутворення.

4. Механізм переходу виробничої системи з додатковими джерелами енергії зі стану парної біфуркації та відповідного їй стану термодинамічної нерівноважності в стан біфуркаційної парної множинності, і далі до хаосу, є тим розрахунковим обмеженням для технологічного процесу, який лімітує досягнення заявляється теоретичного мінімуму.

### Література

1. Graedel T. E., Allenby B. R. *Industrial Ecology and Sustainable Engineering*. 1st Edition. Pearson. 2009. – 432 p.
2. Gamage M., Arachchige U., Godakanda I. *Introduction of Cleaner Production and Sustainable Development Goals*. *Journal of Research Technology and Engineering*. 4(2). 2023. P. 160-172.
3. Mihelcic J. R., Zimmerman J. B. *Environmental Engineering: Fundamentals, Sustainability, Design*. John Wiley & Sons. 2021 г. – 736 p.
4. Nazaroff W. W., Alvarez-Cohen L. *Environmental Engineering Science*. John Wiley & Sons. 2000. – 720 p.
5. Hossain S., H., Law J., Asfaw A. *The Waste Crisis: Roadmap for Sustainable Waste Management in Developing Countries*. John Wiley & Sons. 2022. – 384 p.
6. Волошин В. С. Про деякі закономірності щодо мінімізації відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі. *Екологічні науки*. № 55, 2024. С. 84-89.
7. Волошин В. С. *Відходи та термодинаміка*. Київ, ФОП Самченко. 2024. – 80 с.
8. Prigogine I. «*Thermodynamics of Irreversible Processes*». Wiley-Interscience, 1961. – 119 p.
9. Nicolis G., Prigogine I. «*Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*». Wiley, 1977. – 491 p.
10. Voloshyn V. S. *Alternative method of control over wastes – a contemporary challenge in technology and economics./ Development of the Innovative Environmental and Economic system in Ukraine*. Monografia. Oktan Print s.r.o. Prague. 2019. P. 108-120.
11. Kondepudi D., Prigogine I. «*Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*». Wiley, 1998. – 486 p.
12. Волошин В. С. *Відходи та їх природа*. Київ, ФОП Самченко. 2024. – 630 с.
13. Bejan A. *Advanced Engineering Thermodynamics*. 2016 – 746 p.
14. Moran M. J., Shapiro, H. N. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc. Chichester, West Sussex, England. 2014. – 847 p.
15. Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E. *Fundamentals of Classical Thermodynamics*. Wiley. New York. 1994. – 872 p.
16. May, R. M. *Simple mathematical models with very complicated dynamics*. *Nature*, 261(5560), P. 459-467.
17. Strogatz, S. H. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. CRC Press. 2018. – 471 p.
18. Волошин В. С. Бурко В.А. Щодо питання про відповідність принципу термодинамічної двоєдності, як причини відходоутворення, другому закону термодинаміки. XX Міжнародна науково-практична конференція Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення. 2024. Харків. С. 160-169.