

УДК 536.7:621.798

Щодо питання про досяжність теоретичного мінімуму утворення відходів як фізичного явища в технологічних процесах

В'ячеслав Волошин¹, Вадим Бурко²

¹ Приазовський державний технічний університет,
кафедра промислових теплоенергетичних установок і теплопостачання, м. Дніпро. Україна
vsvlshn52@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-6809-6779>

² Приазовський державний технічний університет,
кафедра промислових теплоенергетичних установок і теплопостачання, м. Дніпро. Україна
burko_v_a@pstu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>

Анотація. У статті представлені результати досліджень, пов'язаних з поняттям теоретичного мінімуму утворення відходів як фізичної характеристики технологічного процесу. З посиланнями на класичні праці І. Пригожина, Л. Онсегера, М. Фейгенбаума показані граничні межі, що накладаються на термодинамічні умови, які забезпечують в технологічному процесі не тільки виробництво основного товарного продукту, але і відходів. Показано, що умовою мінімізації відходів у межах джерела їх виникнення – технологічного процесу, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності, є достатність додаткової зовнішньої енергії E_w заданої якості, та в розрахунковому обсязі не менше 62% від базової енергії, що використовується в технологічному процесі. На розрахунково-експериментальних прикладах показано, що входження термодинамічної нерівноважної системи в зону парної біфуркації, за вихідними параметрами феноменологічного рівняння Л. Онсагера, різко знижує можливості технологічного процесу щодо досягнення теоретичного мінімуму утворення відходів. Обґрунтоване порівняння параметрів технологічного процесу в їх термодинамічному аспекті з механізмами фейгенбаумського хаосу, пов'язаного з різноманітними невизначеностями, які присутні в будь-якому виробництві товарної продукції, через такі механізми, побічно, призводять до лавиноподібних процесів утворення відходів.

Ключові слова: термодинамічна нерівноважність, промислові відходи, фізична сутність, теоретичний мінімум утворення відходів, зовнішня енергія, ентропія, термодинамічна двоєдиність.

1. Вступ

Глибоке розуміння фізичного сенсу маловідходності та безвідходності будь-якого виробництва дозволяє знаходити ефективніші способи та методи мінімізації відходів,

забезпечувати захист довкілля від безмежного накопичення промислових відходів, що визначає актуальність роботи. У статті [1, с. 25-26] вказано на принцип термодинамічної двоєдності, як механізму створення відходів в технологічному процесі, а також в роботах [2, с. 85; 1, с. 33-34] запропонована, і проілюстрована на багатьох прикладах методика оцінки такого показника, як теоретичний мінімум відходоутворення, як конкретна фізична величина для будь-якого технологічного процесу, заснована на термодинамічних властивостях об'єкта. Подібні схеми для різноманітних технологічних процесів включають зіставлення двох графіків: залежностей, які описуються феноменологічним рівнянням Л.А. Онсагера для визначення зміни ентропії в системах зі слабкою термодинамічної нерівноважністю і кривою, що показує залежність термодинамічних сил X_i , завдяки яким здійснюється технологічний процес, від параметричного коефіцієнта $\lambda = (\Delta X_i)/X_i$ [1, с. 33]. Проте механізми, і навіть параметричні значення граничних умов такого явища, виявлені не були. Зокрема, неочевидним було питання про граничні значення шуканого мінімуму відходоутворення, його умови та причини появи. Не враховано умови, за яких такі системи переходили до стану невизначеності, що робило їх некерованими. Як маємо з останніх робіт І. Пригожина [3, р. 37; 4, р. 141-142], такі залежності виходили з розуміння умов термодинамічної нерівноважності, незворотності та можливих умов стійкості таких систем.

2. Постановка проблеми

Як показали дослідження, невизначені стани можуть стати причинами глибокої недосяжності теоретичного 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 сировини, використовуваної енергії та визначає свій вектор у протилежному напрямку ефективної переробки сировини [5, р. 108-109]. У такому контексті залишається актуальним питання: наскільки досяжним є фізично обґрунтований теоретичний мінімум відходів у технологічному процесі і від чого він залежить.

Мета роботи: привернувши увагу до принципу термодинамічної двоєдності, як механізму створення відходів у технологічному процесі, виявити параметричні показники цього явища, у межах умов досягнення теоретично обґрунтованого мінімального об'єму таких відходів, як фізичної характеристики технологічного процесу.

3. Основні результати

Основна частина досліджень. Представимо технологічний процес, як певні фізичні, хімічні та ін. явища, спрямовані на отримання готової корисної продукції (p) та утворення при цьому деякого відходу (w). Реалізація цього технологічного процесу здійснюється в рамках деякої виробничої системи, що забезпечує потоки сировини, енергії та ін. Для такого технологічного процесу інтерпретація першого закону термодинаміки здійснюється у вигляді $E_0 = \Delta U + (A_{op} + A_{ow})$, де E_0 – підведена зовнішня енергія; ΔU – внутрішня енергія системи; A_{op} – корисна робота системи, спрямовану отримання товарної продукції; A_{ow} – робота системи, спрямовану отримання відходу.

Згідно принципу термодинамічної двоєдності [1, с. 26] та з метою мінімізації відходів усередині джерела виникнення – самого технологічного процесу, вимагатимемо присутності додаткового джерела зовнішньої енергії ΔE_w . Для такої

системи перший закон термодинаміки може бути записаний у наступному вигляді: $E_0 + \Delta E_w = \Delta U^* + (A_{op} + A_w)$, де: $A_w \gg A_{ow}$ - робота, що здійснюється для впорядкованого перетворення на продукцію тієї частини сировини J_w , яка у звичайному вигляді переходить у відходи (рис. 1); ΔU^* – внутрішня енергія впорядкованої системи.

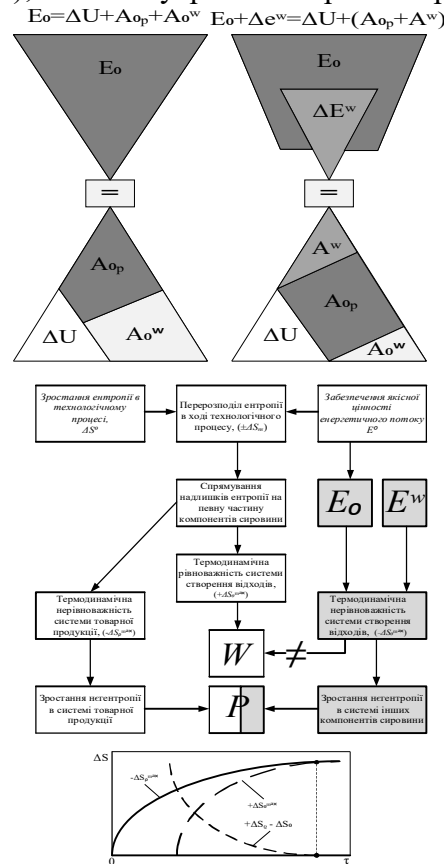


Рис. 1. Енергетичний баланс і умови перерозподілу ентропії і негентропії в процесі виробництва корисних продуктів і відходів та їх графічна інтерпретація для умов першого та другого законів термодинаміки (позначення в тексті)

Припустимо, що система змінюватиметься таким чином, щоб робота з перетворення тієї частини сировини, з якої потім виходить відхід $A_{ow} \rightarrow 0$. Це означає, що частина J_w початкової сировини не переробляється і відходи в системі матимуть максимальне первинне значення. Припустимо тепер, що робота A_w в системі, що витрачається на перетворення тієї частини сировини J_w , з якої раніше виходив відхід, зростатиме в результаті підведення додаткової зовнішньої енергії E_w певної якості. Частина цієї енергії знову піде на збільшення внутрішньої енергії ΔU^* , а інша частина у вигляді роботи $A_{ow} + A_w > 0$ – 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, на що вказує механізм (див. рис. 1). Якщо об'єктом аналізу вектору зміни ентропії є нерівноважна неізольована система, в якій протікають як дисипативні, так і впорядковані, репаративні процеси перетворення енергії та речовини, то другий закон для інтегральної ентропії можна записати у вигляді $\Delta S = \sum_q \Delta S_q^\pm \geq 0$, де ΔS_q^\pm відноситься до тієї з q -їх властивостей, які в даній системі змінюються в дисипативному ($\Delta S_q^\pm > 0$) або репаративному ($\Delta S_q^\pm \leq 0$) напрямках. Така схема реалізує принцип, який відбувається у відомій теоремі І. Пригожина та з яким кореспондується

принцип термодинамічної двоєдності, описані в роботі [6, с. 259], а також із роботами авторів [7, р. 141, р. 228; 8, р. 338].

Щодо нашого випадку, доречним буде розгляд рівняння Л. Онсагера для отримання ентропії в термодинамічно близьких до рівноваги системах з врахуванням уточнення [1, с. 34] у вигляді $\Delta[S] = (J_0 X_0 + J_w X_w) \lambda (1 - \lambda)$. Тут X_0 і X_w відповідно, термодинамічні сили, спрямовані на перетворення частини матеріального потоку (сировини) J_0 в готову продукцію, та матеріального потоку J_w для частини сировини, яка раніше потрапляла у відхід, а тепер – в незаплановану товарну продукцію. $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$ - деякий феноменологічний коефіцієнт, що визначає відношення докладання шуканих сил X_0 і X_w на відповідні матеріальні потоки сировини і виконану при цьому роботу A_0 і A_w . Співвіднесемо обидві частини цього виразу з базовою енергією E_0 , що призначена на одержання товарної продукції

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

та запишемо у наступному вигляді

$$\lambda_s = r \lambda (1 - \lambda), \quad (2)$$

де обидві частини виразу мають власний сенс, що відображає їх роль у феноменологічній кривій. Зокрема, $\lambda_s = \frac{\Delta[S]}{E_0}$ - наведений показник зміни ентропії всієї виробничої системи до базової частини зовнішньої енергії E_0 .

А $r = \frac{(J_0 X_0 + J_w X_w)}{E_0}$ термодинамічний показник, що відображає відношення сумарної роботи з перетворення всієї сировини ($J_0 + J_w$) на корисну товарну продукцію до базового значення енергії E_0 , але вже з *урахуванням додаткової енергії E_w* . Саме такий показник пов'язує теоретичний мінімум відходуотворення виробничих систем з якісними та кількісними характеристиками зовнішньої енергії, що підводиться до системи.

Представимо вираз (1) у вигляді логістичного відображення детермінованої функції з характерними для неї властивостями [9, р. 459-460],

$$(\lambda_s)_n = r \lambda_{n-1} (1 - \lambda_{n-1}) \quad (3)$$

Для цього рівняння вимагатимемо виконання наступних умов.

1. Послідовність ітерації повинна дотримуватись за умови сумісності параметрів $\lambda_s = \frac{\Delta[S]}{E_0}$ і $\lambda = \frac{J_0}{J_0 + J_w}$ (у повній відповідності до принципу взаємності Л. Онсагера), в одному і тому ж часовому інтервалі, позначеному як Δn .

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 термодинамічними характеристиками системи.

Перша умова може бути здійсненою у разі, якщо в ній будуть враховані можливості для інтервальної ітерації, що вимагає її розгляду через порівняні значення відповідних потужностей \dot{A}_i як властивостей існуючої термодинамічної системи

$$\lambda_s \cong \lambda \text{ або } \frac{\Delta[S]}{A_0} \Delta n \cong \frac{X_0}{X_0 + X_w} \text{ або } \Delta[S] = \lambda \frac{A_0}{\Delta n}. \quad (4)$$

Останнє означає, що умовою логістичного стану формули (1) є пряма залежність зміни ентропії такої системи від роботи, яку вдається виконати завдяки базовій 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.

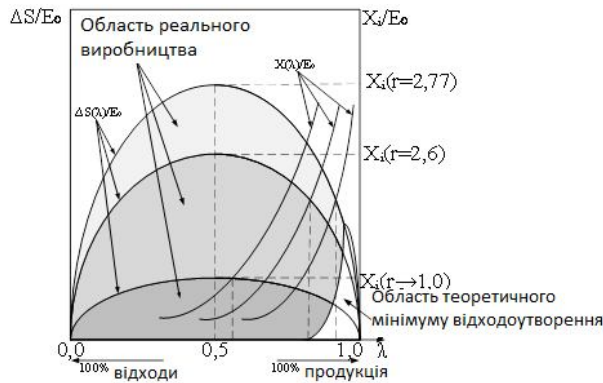


Рис. 2. Феноменологічна залежність для області розрахункового, теоретично обґрунтованого мінімуму відходоутворення у технологічному процесі

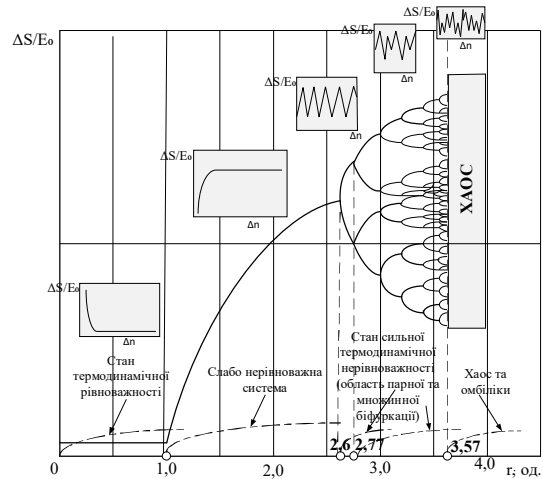


Рис. 3. Залежність зміни ентропії у технологічному процесі від показника його термодинамічного стану

Заради згладжування ітерації цю діаграму слід розглядати в порівнянні з іншим графіком (рис. 3), що відображає результати розрахунку залежності $\lambda_s(r)$ у класичному для таких логістичних рівнянь вигляді і наведені для умов певної технологічної відходоутворюючої системи. Слід відзначити, що зростаючі значення показника r в цих графіках можуть бути тільки умовними, гіпотетичними у вказаних межах, в залежності від вихідних параметрів E_w та $X_w J_w$, що задаються, і про що буде показано на практичних результатах нижче. Для нас важливими є інтервали, в яких відображається відношення параметрів системи до термодинамічної рівноваги (див. рис. 3).

1. Умова, коли $0 \leq r < 1,0$ (область реальних технологічних процесів) відображає область термодинамічної рівноваги для всієї виробничої системи. Усі траєкторії системи прагнуть нуля. Тут виконується умова $J_w X_w = 0$ або $A_w = 0$, коли технологічний процес взагалі не пов'язаний з цілеспрямованим перетворенням потенційної відходоутворювальної сировини. Або коли нерівнозначні термодинамічні сили, спрямовані на виробництво товарної продукції та відходу, розділені і перебувають у стані, близькому до термодинамічної двоєдності [2, с. 47].

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

3. Гіпотетична умова $r \geq 2,6$, при якому $J_w X_w \sim k E_0$, відображає ту k – ту частку додаткової зовнішньої енергії, якої буде достатньо, щоб термодинамічні сили X_w , що реалізуються в сильно нерівноважній системі, були здатні до перетворення матеріального потоку J_w у напрямку його суттєво інших якостей наприклад, споживчої цінності.

4. В той же час, при первинній недостатності додаткової зовнішньої енергії $J_w X_w < k E_0$ відбувається перехід системи до періодичної поведінки щодо параметра r .

Зокрема, при дотриманні умови термодинамічної нерівноважності в системі, наприклад, при гіпотетичному $r \geq 2,77$ коли $J_w X_w \ll k E_0$ вона є об'єктом парної біфуркації, а при $2,77 < r < 3,57$ або $J_w X_w > k E_0$ – виявляє ознаки вже множинності парних біфуркацій, що робить таку систему малокерованою щодо цікавого для нас матеріального потоку J_w .

5. Далі, за умови $r \geq 3,57$ або $J_w X_w \ll k E_0$, тобто, за подальшої недостатності енергії, що вводиться (оцінково менше певного абстрактного k від базової енергії, необхідної для забезпечення основного технологічного процесу), система теоретично здатна переходити у стан повного хаосу, з відсутністю чутливості до початкових умов щодо можливостей не тільки для переробки потенційних відходів (w), але і для реалізації основної мети системи – виробництва товарної продукції (p), коли біфуркаційне множення періодів робить виробничу систему зі штучною додатковою зовнішньою енергією E_w енергетично некерованою в найближчому діапазоні зміни термодинамічного параметра r .

З викладеного слідує 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, для того щоб вивести ту частину сировини, з якої зазвичай виходить відхід зі стану термодинамічної рівноваги та перевести її у вихідний стан слабкої нерівноважності.

Подібні висновки достатньо корелюються з результатами розрахунково-експериментальних даних, одержаних при дослідженні певної кількості традиційних технологічних процесів. Розглянемо деякі з них.

Методика дослідження. Методика досліджень включала виявлення значень коефіцієнтів r у послідовності технологій, що визначаються величиною ΔS_{max} на феноменологічних кривих Л. Онсагера. Ці точки визначені в координатах « $\Delta S/E_0 - \lambda$ » для технологічних процесів, що підлягали аналізу, у галузях гірничодобувної, металургійної, машинобудівної, енергетичної промисловості та інших виробництвах. Усього досліджено 90 технологічних процесів та 103 їх модифікації, включаючи експериментальні технології. Достовірність фрагментації однойменних показників в незалежних вибірках в умовах відсутності нормального розподілу для різноманіття технологічних процесів, оцінювалась за допомогою непараметричного *U-критерія* Манна-Уїтні [10 р. 50-60], у вигляді єдиної генеральної вибірки для порівнюваних залежностей $U_1 = R_1 - 0,5n_1(1 + n_1) \leftrightarrow U_2 = R_2 - 0,5n_2(1 + n_2)$, таким чином, що тільки за умовою $U_{1,2} = \min$ показує на їх непорівнянність. Тут: $R_{1,2}$ – сума рангів для відповідної вибірки; $n_{1,2}$ – розмір кожної з вибірок. Така репрезентативність вибірки при співставлених уніфікованих параметрах дозволяє розраховувати на об'єктивні результати дослідження.

Вихідними даними для кожного з розглянутих технологічних процесів є статистична звітність про:

- величину зовнішньої енергії E_0 , що надходить у конкретний 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;

- значення термодинамічного параметра $0 < r \leq 4,06$ залежно від розрахункових значень зміни ентропії на кожному n -му етапі ітерації.

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;

- 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;

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

Статистична обробка результатів дослідження виконана за допомогою *програмного пакету Statistica 6.0. (StatSoft, Inc., США)* у повній відповідності до *U-критерію* Mann-Whitney.

Результати дослідження. У методичному плані, дані досліджень залежності $\frac{\Delta S}{E_0} = f(r)$ для різних технологій представлені на рис. 4 у вигляді відокремлених точок вихідних значень зміни ентропії (її математичного очікування $M_{\Delta S}$ та середньоквадратичної помилки $\pm \sigma_{\Delta S}$). З урахуванням похибок, отриманих шляхом обробки статистичних даних (залежно від вихідних даних для різних типів технологій), цифри на графіку в області подвоєння результатів можуть бути приблизно порівнянними з закономірностями, викладеними у роботі [9, с. 462]. У своєму різноманітті будь-яких технологій, ці дані мають певну кореспонденцію з графіками (див. рис. 3).

Розглянемо, наприклад, галузі переробки залізної руди. Дослідженню підлягали технології отримання агломерату (поз. 1), порівняні з нею технологія виробництва окатишів (поз. 2) і пелетизація гранул із збагаченої руди (поз. 3) з величезним початковим об'ємом відходів, і в порівнянні за параметрами $\Delta S_{\text{агл}}$ і $\Delta S_{\text{окат}}$ і $\Delta S_{\text{пел}}$ (рис. 4) відповідно. Порівняємо їх із технологіями отримання кольорових та важких металів (табл. 1), поз. 4-6.

З точки зору досяжності теоретичного мінімуму розділимо такі технології на дві групи. До першої віднесемо ті, для яких показник $0,7 < r \leq 2,6$ (наприклад, біологічне вилуговування або пелетизація збагачених руд), а до другої ті, для яких показник може досягати величини $r \leq 4,53$, а іноді і більше (тут, аглодоменне виробництво та отримання окатишів або аміачне вилуговування кольорових металів). При зіставленні таких груп технологій (рис. 4), стає очевидним істотна залежність стану відходоутворення від параметра r в межах гладкої термодинамічної нерівноважності, коли $0,7 < r \leq 2,6$. На це вказує і діапазон змін ентропії в межах $(0,41 \div 1,91)$ кДж/(кг · К). Але стає ясною і явна невизначеність у системі, коли розрахунковий параметр перевищує $r > 2,6$, і навіть якщо теоретично $r > 3,5$ - система здатна йти у стан некерованого хаосу, про що свідчать дані про різке збільшення зміни ентропії $\Delta S > (0,55 \div 4,86)$ кДж/(кг · К). Якщо для технологій першої групи існує гіпотетична можливість «наближення» до теоретично обґрунтованої межі з відходоутворення, то для другої групи, через термодинамічні особливості технологічних процесів, а саме, надмірності, або навпаки, недостатності

енергії ($E_0 + E_w$) в порівнянні з сумарним матеріальним потоком ($J_0 + J_w$), це неможливо.

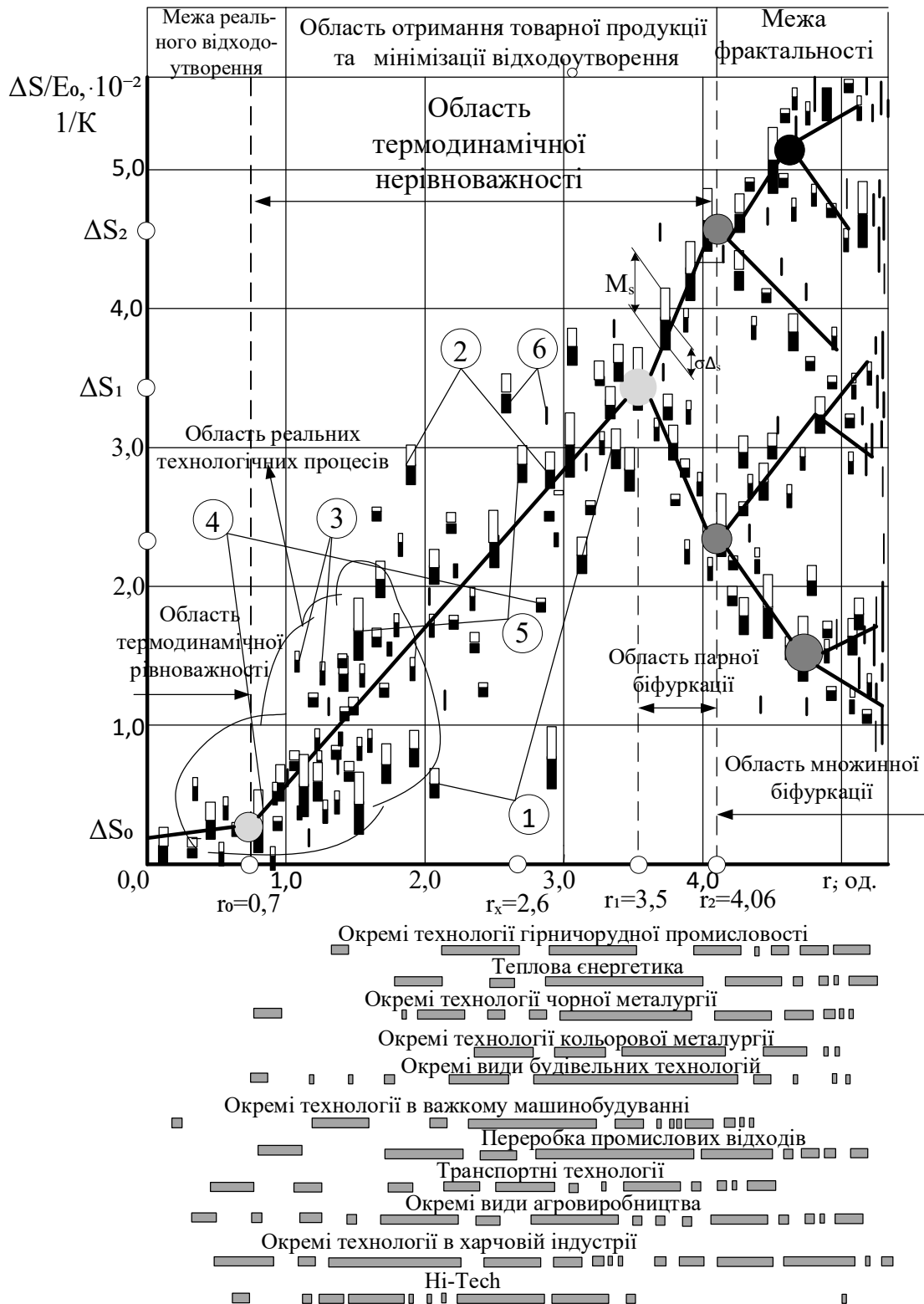


Рис. 4. Розрахункові дані для виробництва ентропії в рівнянні Л. Онсагер для різних технологічних процесів. а) група технологічних процесів, для яких $0,7 < r \leq 2,6$; б) група технологічних процесів, для яких гіпотетична $2,6 < r \leq 3,5$. Означення 1-6 відповідають поз., див. табл. 1

Таблиця 1. Порівняльні статистичні та розрахункові дані для деяких технологічних процесів, здатних претендувати на мінімальне відходоутворення (за даними робіт [11, р.р. 1012, 1027, 12, р. р. 323-325, 13, р.р. 9-13, 17- 18; 14, р.р. 188-189; 15, р.р. 187-189, 331, 327; 16, р.р.3-5; 17, р.р.11-12, 14-16]).

№№ поз.	Найменування технологічного процесу	Продуктивність, тонн на рік	Енерговитрати, ГДж/т	Об'єми відходів, м ³ /т	Зміна ентропії	
					r	ΔS
1	Агломераційне Виробництво	5,4 · 10 ⁶	4,0-6,0	газ: 1000 пил: 11,0 кг/т	2,69 3,40 4,11	0,65 2,95 3,61
2	Виробництво окатишів для технології прямого відновлення заліза	2,2 · 10 ⁶	3,0-5,0	газ: 600 пил: 5,0 кг/т	2,90 3,10 4,53	2,91 3,15 4,86
3	Пелетизація гранул із збагаченої руди	6 · 10 ⁶	0,7-1,0	залишки шламу: 5кг/т	1,44 1,29 1,05	1,35 1,45 1,19
4	Аміачне вилуговування міді.	50000	1,5-2,0	1,0-2,0	0,88 2,91 3,65	0,55 3,85 4,79
5	Біологічне вилуговування міді	10000	1,0	0,5-1,0	1,66 1,75 1,26	1,62 1,91 0,41
6	Цементация із заміщенням більше активними металами	10000	0,5	0,3-0,7	2,65 2,91 3,45	3,41 3,25 4,38

У такому вигляді відходоутворювальна система здатна працювати як кластерно структурована одиниця наближена до самоподібності на межі фрактальності. Кластерна система технологічного процесу, окрім енергетичного кластеру, передбачає дві нерівнозначні структури – компонентна сировина, що складає основу товарної продукції та утворюється з первинних компонентів, і частина сировини, що складає основу відходу та має свої компоненти.

Щоб визначити такі, здавалося б на перший погляд, штучні межі та обмеження, розглянемо графіки (рис. 4) з погляду їх співвідносності. Для нелінійних систем, що розглядаються, умови переходу від термодинамічної нерівноважності до умовного хаосу в інтервалах до біфуркаційного подвоєння періоду, зв'язуються константою Фейгенбаума $Fu \approx 4,669$, а станам з інтервалами множинного біфуркаційного подвоєння, що переходить в хаос відповідає $Fu \approx 2,502$ [18]. Константа Фейгенбаума відображає зменшення відстаней між попередніми та наступними біфуркаціями у напрямку їх множинності і, в кінцевому результаті, до області хаосу.

У цілому, для періоду першого подвоєння на графіку запишемо наступне відношення, що виходить з практичних результатів: $Fu_r = \frac{r_1 - r_0}{r_2 - r_1} = \frac{3,45 - 0,71}{4,06 - 3,45} = 4,49$, що для цього періоду можна порівняти з першою константою Фейгенбаума, умовно позначеною тут як Fu_r , і рівною 4,669. Розкид із експериментальними даними становив 3,98 %, що цілком задовільно. У свою чергу, отримане з графіка відношення Фейгенбаума, умовно позначене як $Fu_{\Delta S} = \frac{[\Delta S_1] - [\Delta S_0]}{[\Delta S_2] - [\Delta S_1]}$, $Fu_{\Delta S} = \frac{3,45 - 0,01}{4,61 - 3,45} = 2,96$, з певною похибкою можна зіставити зі значенням другої константи Фейгенбаума $Fu_{\Delta S}$, що дорівнює 2,502. Похибка в даному випадку складає 18,26% і навіть може досягти 25%,

що є слабо порівнянним результатом з теоретичними даними. Це й не дивно, якщо взяти до уваги ті припущення, які були запропоновані для узгодження виразів (1) та (3). Проте, отримані значення таких властивостей систем, як Fu_r і $Fu_{\Delta S}$, показують, що об'єкти нашого дослідження можуть підпадати під закономірність невизначеності біфуркаційних систем. Можна висловити припущення, що саме такі механізми множинної біфуркації та хаосу, пов'язаного з різноманіттям довільностей, які присутні в будь-якому технологічному процесі, особливо при штучному підведенні до неї додаткової енергії $E_w < kE_0$, або $E_w \gg kE_0$ здатні опосередковано спричинити лавиноподібні процеси непередбачуваної переробки, навіть частини сировинного матеріального потоку, з якого передбачалося отримання товарної продукції (у виробництві це називається «брак»), свідками якого ми є. Цей стан дуже далекий від системного, і тим більше нагадує некерований хаос.

Виявлення чисельного значення коефіцієнта пропорційності між базовою та додатковою енергіями (k). Зіставимо вказані вище дослідження з прикладними результатами для існуючих технологій у галузі одного з найбільш забруднюючих виробництв – металургійного.

Наука та практика накопичила достатній досвід у технологіях виробництва сталі, одного з найтехнологічніших матеріалів сучасності. Загальний річний обсяг виробництва сталі у світі становить 1,888 млрд. тон. А загальна світова металомісткість по сталі, що міститься в різних об'єктах, які створювала людина, в різних галузях промисловості і конструкціях досягає 35 млрд. тон оборотного металу, включаючи сталь, що знаходиться на етапі вторинної переробки (брухт). Всього в історії сталеплавильного виробництва було створено кілька десятків технологічних процесів, основні з таких (табл. 2), що знайшли практичне застосування, прийняті до уваги у цих дослідженнях (рис. 5), що виконані за методикою, визначеною вище.

Таблиця 2. Скорочена характеристика основних технологічних процесів одержання сталі та їх відходів, наведених до одиниці товарної продукції.

№№ п/п	Найменування технології	Короткий опис технологічного процесу
Технології прямої спрямованості		
I	Томасівський процес	Полягає у продуванні розплавленого чавуну повітрям через дно конвертера, що дозволяє видалити домішки, такі як фосфор. Метод був економічний і підходив для переробки залізняку з високим вмістом фосфору. Відходи: шлак, пил, металевий брухт
II	Безсемерівський процес	Включає продування повітря через розплавлений чавун у конвертері. Процес відрізняється високою швидкістю, але чутливий до складу вихідного металу, зокрема до вмісту фосфору та сірки. Відходи: шлак, пил
III	Мартенівський процес	Заснований на нагріванні чавуну та залізного брухту у великому регенеративному мартенівському пічному агрегаті. Перевагами методу є можливість використання різних видів сировини та ретельний контроль хімічного складу сталі. Відходи: шлак, пил, металобрухт, шлам
IV	Киснево-конвертерний процес	Заснований на продуванні рідкого чавуну чистим киснем, що забезпечує більш швидке та ефективно видалення домішок. Технологія є однією з

		найпоширеніших у сучасному сталеплавильному виробництві завдяки своїй енергоефективності. Відходи: шлак, пил, окалина
V	Технологія прямого відновлення заліза	Відновлення залізної руди до заліза у твердому стані з використанням природного газу або вугілля при температурі близько 800–1200°C. Отримане залізо може бути використане в електропечах для виробництва сталі. Відходи: металева окалина, пил, залишки вуглецевих матеріалів.
VI	Електросталеплавильний процес	Використовується електрична енергія для плавки металевих брухту та залізорудних матеріалів. Метод дає високу якість сталі та широко використовується для спеціальних сталей. Відходи: шлак, пил, відпрацьовані вогнетриви, металевий брухт

Кожен з цих технологічних процесів пов'язаний з різними за потужністю та якістю джерелами енергії E_0 , кожен з них має свою специфічну номенклатуру відходів. І одним із суттєвих завдань, які треба вирішувати в них, полягає у максимально можливій мінімізації відходів у межах самого технологічного процесу. Про це свідчить хоча б динаміка відходоутворюючих втрат для кожної технології в міру зростання її енергонасиченості та специфіки сировини. Причому кількість відходів, що приводиться до одиниці одержуваної товарної продукції, залежно від кількості та якості зовнішньої енергії, специфіки самого технологічного процесу (умови протікання фізико-хімічних реакцій), дає умовну лінійку зміни ентропії ΔS залежно від заданих значень термодинамічних коефіцієнтів r і λ та поведінки самої системи, а саме, від співвідношення E_w/E_0 (рис. 5).

По-перше, відмітимо, що зсув вправо від стандартного значення кожної величини в цих залежностях складає, наприклад, $7,3:4,5=1,62$ частки від сумарної енергії, яку технологічний процес спроможний поглинути, без перекидання в хаотичний стан. Або $4,79:2,95=1,62$ - частки від зміни ентропії системи приведеної до базової енергії системи, що вказує на незмінність внутрішньої енергії суто технологічного процесу в межах такої енергетичної інтервенції. З цього виходить існування класичного співвідношення

$$E_0 + E_w \rightarrow 1,62 \text{ або } E_w \sim kE_0, \text{ де } k = 0,62. \quad (5)$$

кількісне значення якого дійсне, принаймні, для металургійних технологій.

Два показники, що впливають на мінімізацію відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі, це термодинамічна нерівноважність, як залежність від представленого термодинамічного коефіцієнта r і енергонасиченість технологічного процесу, що забезпечує цілеспрямовану переробку не тільки основного сировинного потоку J_0 в корисну продукцію, але й тій частини сировини J_w , яка у звичайній системі прямує у відхід. Для цього на графіках (рис. 5) показано криву зміни ентропії, наведеної до вихідної енергії системи. Її аналіз спільно з графіком (рис. 3) дає уявлення про ті технологічні процеси, які мають суттєвий резерв для мінімізації відходів, наближаючи його до теоретично обґрунтованого рівня.

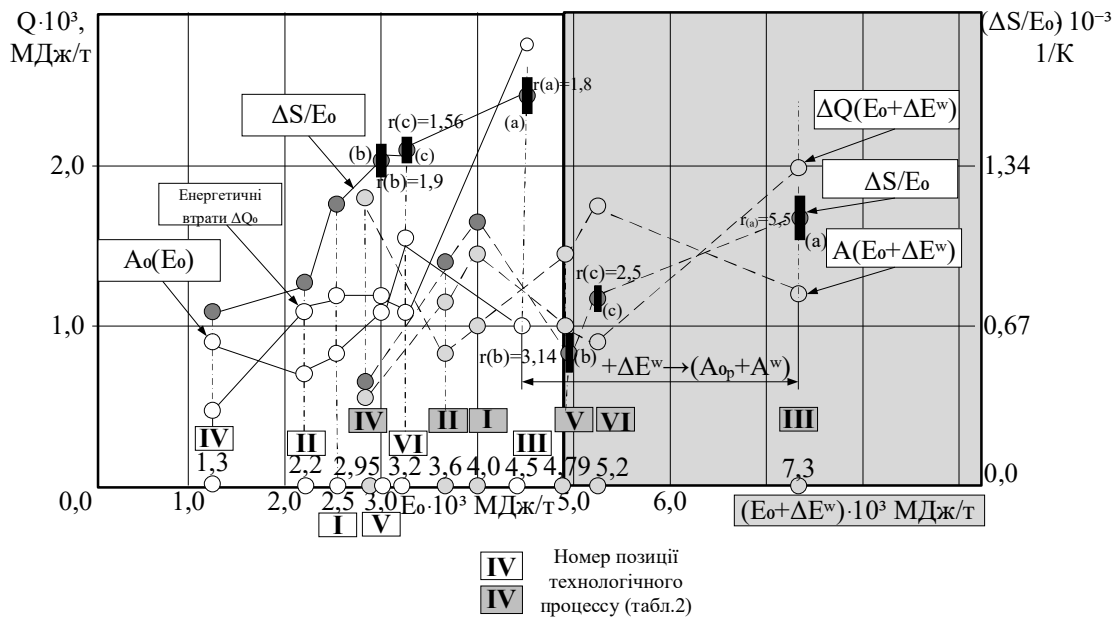


Рис. 5. Енергетичні та ентропійні залежності для визначення області термодинамічної нерівноважності, як показника досяжності теоретичного мінімуму відходоутворення в технологіях отримання сталі: I-томасівський, II - безсемерівський, III - мартенівський, IV - киснево-конвертерний, V - пряме відновлення заліза, VI - електросталеплавильний процес. (Затінена частина та пунктирний графік відносяться до області взаємодії з додатковою енергією E_w в системі)

Наприклад, додаткова енергія ΔE_w для відходоутворюючого мартенівського процесу (точки «a») зі співвідношенням параметрів r_a в межах $5,5:1,8 = 3,05 \gg 1,62$ здатна привести систему в деякий нестійкий стан, в якому не існує певної термодинамічної нерівноважності. І, водночас, технології прямого відновлення заліза та електродугового переплаву (див. точки «b» і «c» відповідно) дають співвідношення параметрів r_b ($3,14:1,9=1,65$) та r_c ($2,5:1,56=1,60$) відповідно, тобто вказують на досяжність стану термодинамічної нерівноважності в таких технологіях при підведенні до них енергії іншої якості з розрахунку (6) $E_w \sim 0,62E_0$. При цьому системи не йдуть у стан множинних біфуркацій та подальшого хаосу, що перешкоджають якісному впливу на потенційну відходоутворюючу сировину.

Співвідношення потрібної додаткової та базової енергії в системі у розмірі 0,62, як збіг обставин, дуже близьке до так званого «Золотого перетину» - 0,618, відомого, як основа краси та гармонії в багатьох природних та антропогенних явищах. Залишимо цей факт як цікаве, але недоказане співпадіння. Принаймні, розрахункові значення вищенаведеного коефіцієнта, близького до числа 0,618, як умова мінімізації утворення відходів у джерелі утворення відходів – технологічному процесі, можуть свідчити про наближення до ідеального кінцевого результату і потребують додаткових досліджень. Подібний аналіз легко здійснити і для інших технологічних процесів, вказавши конкретні енергетичні параметри з подальшим розрахунком наведеної ентропії та визначення термодинамічного коефіцієнта, заради співвідношення $k = E_w/E_0$. Результати можуть знайти застосування при прогнозуванні розвитку сучасних технологій, а також як подальше дослідження.

Висновки та перспективи подальших досліджень. 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 базової енергії, що використовується, принаймні в металургійних процесах.

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 теоретичного мінімуму відходоутворення, що заявляється.

5. Причини існуючих лавиноподібних процесів виробництва відходів у виробництві можна шукати в порівнянні параметрів реального технологічного процесу в його термодинамічному аспекті на межі з механізмами хаосу Фейгенбаума, пов'язаного з різноманітним невизначеностями, які, через такі механізми, опосередковано присутні в будь-якому виробництві товарної продукції.

6. Розуміння процесів виникнення відходів та межі їх мінімізації в джерелі виникнення – технологічному процесі, як відходоутворюючої системи, лежить у властивостях кластерної структури матеріальних потоків її сировини та енергії на межі фрактальності всієї системи.

Конфлікт інтересів і етика. Автори заявляють, що не мають конфліктів інтересів. Автори також заявляють про повне дотримання всіх правил етики журнальних досліджень.

Подяки. Автори заявляють про відсутність спеціального фінансування цієї роботи.

Список використаних джерел

1. Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. Київ: ФОП Самченко, 2024. 80 с.
2. Волошин В. С. Про деякі закономірності щодо мінімізації відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі. *Екологічні науки*. 2024. №55. С. 84-89.
3. Prigogine I. Thermodynamics of Irreversible Processes. Wiley-Interscience, 1961. 119 p.
4. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations. Wiley, 1977. 491 p.
5. 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. Prague: Oktan Print s.r.o., 2019. P. 108-120.
6. Волошин В. С. Відходи та їх природа. Київ: ФОП Самченко, 2024. 630 с.
7. Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons, Inc., 2016. 746 p.
8. Moran M. J., Shapiro H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 8th Edition. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, Inc., 2014. 847 p.
9. May R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*. 1976. Vol. 261 (5560). P. 459-467. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/261459a0>
10. Mann H. B., Whitney D. R. On a Test of Whether One of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1947. Vol. 18, № 1. P. 50-60. DOI: <http://dx.doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
11. Cheng Hu, Zhendong Yang, Miao He act. From Waste to Wealth: Current Advances in Recycling Technologies for Metal Recovery from Vanadium-Titanium Magnetite Tailings. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2024. № 3. P. 1007-1035. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40831-024-00847-w>

12. Fuerstenau M. C., Jamison G., Yoon R.-H. Froth Flotation: A Century of Innovation. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Explorations Inc., 2007. 891 p.
13. Dutta S. K. Direct Reduction of Iron Ore: Principles and Practice. CRC Press. 2020. 27 p.
14. Gupta C. K., Mukherjee T. K. Hydrometallurgy in Extraction Processes. Boca Raton: CRC Press, 1990. Vol. 1. 248 p.
15. Habashi F. Principles of Extractive Metallurgy. London: Routledge, 1986. 494 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203742112>
16. Brierley C. L. A perspective on developments in biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy*. 2008. Vol. 94, № 1. P. 2–7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.014>
17. Dreisinger D. Copper leaching from primary sulfides: Options for biological and chemical extraction of copper. *Hydrometallurgy*. 2006. Vol. 83, № 1–4. P. 10–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.032>
18. Feigenbaum M. J. Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. *Journal of Statistical Physics*. 2006. Vol. 19, № 1. P. 25–52. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01020332>

UDC 523.43

Regarding the question of the attainability of the theoretical minimum of waste generation as a physical phenomenon in technological processes

Vyacheslav Voloshyn, Vadym Burko

Abstract. The article presents the results of research related to the concept of the theoretical minimum of waste generation as a physical characteristic of the technological process. With references to the classic works of I. Prigogin, L. Onsager, M. Feigenbaum, the limit limits imposed on thermodynamic conditions are shown, which ensure in the technological process not only the production of the main marketable product, but also waste. It is shown that the condition for minimizing waste within the source of their occurrence is technological process, in addition to the state of strong thermodynamic disequilibrium, there is the sufficiency of additional external energy E_w of a given quality, in the calculated volume of at least 62% of the energy used in the technological process. On the basis of computational and experimental examples, it is shown that the entry of the thermodynamic system into the zone of paired bifurcation, according to the initial parameters of the phenomenological equation of L. Onsager, sharply reduces the possibilities of the technological process to achieve the theoretical minimum of waste generation. A reasonable comparison of the technological process in its thermodynamic aspect with the mechanisms of the Feigenbaum chaos associated with the variety of uncertainties that are present in any production of marketable products, through such mechanisms, indirectly, lead to avalanche-like processes of waste generation.

Keywords: thermodynamic disequilibrium, industrial waste, physical entity, theoretical minimum of waste generation, external energy, entropy, thermodynamic duality.

References

1. Voloshyn, V. S. (2024). *Waste and thermodynamics*, FOP Samchenko, Kyiv. [in Ukrainian]
2. Voloshyn, V. S. (2024). *About some regularities regarding the minimization of waste in the source of their occurrence - the technological process*, Environmental Sciences, **55**, 84–89. [in Ukrainian]
3. Prigogine, I. (1961). *Thermodynamics of Irreversible Processes*, Wiley-Interscience.
4. Nicolis, G., Prigogine, I. (1977). *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*, Wiley.
5. Voloshyn, V. S. (2019). *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, 108–120.
6. Voloshyn, V. S. (2024). *Waste and Their Nature*, FOP Samchenko, Kyiv. [in Ukrainian]
7. Bejan, A. (2016). *Advanced Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons, Inc.
8. Moran, M. J., Shapiro, H. N. (2014). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 8th Edition*, John Wiley & Sons, Inc., Chichester, West Sussex, England.
9. May, R. M. (1976). *Simple mathematical models with very complicated dynamics*, Nature, **261** (5560), 459–467. <http://dx.doi.org/10.1038/261459a0>
10. Mann, H. B., Whitney, D. R. (1947). *On a Test of Whether One of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other*, The Annals of Mathematical Statistics, **18** (1), 50–60. <http://dx.doi.org/10.1214/aoms/1177730491>

11. Cheng, Hu, Zhendong, Yang, Miao, He act. (2024). *From Waste to Wealth: Current Advances in Recycling Technologies for Metal Recovery from Vanadium-Titanium Magnetite Tailings*, Journal of Sustainable Metallurgy, **3**, 1007-1035. <http://dx.doi.org/10.1007/s40831-024-00847-w>
12. Fuerstenau, M. C., Jamison, G., Yoon, R.-H. (2007). *Froth Flotation: A Century of Innovation*, Society for Mining, Metallurgy and Explorations Inc., Colorado.
13. Dutta, S. K. (2020). *Direct Reduction of Iron Ore: Principles and Practice*, CRC Press.
14. Gupta, C. K., Mukherjee, T. K. (1990). *Hydrometallurgy in Extraction Processes*, CRC Press, Boca Raton, **1**.
15. Habashi, F. (1986). *Principles of Extractive Metallurgy*, Routledge, London. <https://doi.org/10.1201/9780203742112>
16. Brierley, C. L. (2008). *A perspective on developments in biohydrometallurgy*, Hydrometallurgy, **94** (1), 2–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.014>
17. Dreisinger, D. (2006). *Copper leaching from primary sulfides: Options for biological and chemical extraction of copper*, Hydrometallurgy, **83** (1–4), 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.032>
18. Feigenbaum, M. J. (2006). *Quantitative universality for a class of nonlinear transformations*, Journal of Statistical Physics, **19** (1), 25-52. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01020332>

Про авторів / About the authors

В'ячеслав Волошин, доктор технічних наук, професор, кафедра промислових теплоенергетичних установок і теплопостачання, Приазовський державний технічний університет, вул. Гоголя, 29, м. Дніпро, 49044, Україна;

Vyacheslav Voloshyn, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Industrial Thermal Power Plants and Heat Supply, Pryazovsky State Technical University, 29 Gogol Str., Dnipro 49044, Ukraine;

Вадим Бурко, кандидат технічних наук, доцент, кафедра промислових теплоенергетичних установок і теплопостачання, Приазовський державний технічний університет, вул. Гоголя, 29, м. Дніпро, 49044, Україна;

Vadym Burko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Thermal Power Plants and Heat Supply, Pryazovsky State Technical University, 29 Gogol Str., Dnipro 49044, Ukraine.

Отримано / Received 22.01.2025
Прийнято до друку / Accepted 12.02.2025
Опубліковано / Published 21.05.2025