

УДК 628:66.01:536

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359940

УМОВИ ПОДОЛАННЯ ПРИНЦИПУ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ДВОЄДИНОСТІ, ЯК МЕХАНІЗМУ СТВОРЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ**Волошин В.С.***д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: vsvlshn52@gmail.com;***Бурко В.А.***канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>, e-mail: burko_v_a@pstu.edu*

На підставі попередніх досліджень в галузі мінімізації промислових відходів, а саме, знань про механізми існування принципу термодинамічної двоєдності в технологічному процесі, як основи створення відходів, показано, що така мінімізація в середині самого технологічного процесу спирається на два показники – відношення компонентів сировини до термодинамічної нерівноважності стосовно використаного джерела енергії, а також від спроможності енергії певної якості та кількості впливати на всі компоненти сировинної бази технологічного процесу. Розроблено методика дослідження стану технологічного процесу від основних його показників, що впливають на процеси відходоутворення. Враховуючи, що особливості будь-якого технологічного процесу мають бути неспівставними відносно основних показників поза межами нормального розподілу, запропоновано оцінювати їх за допомогою непараметричного U -критерія Манна-Уїтні, у вигляді єдиної вибірки для порівнюваних залежностей. Дослідженню, за загальною методикою, підлягало майже 200 сучасних технологічних процесів та їх модифікацій, що надало можливостей аналізувати певний узагальнений технологічний процес відносно його відходоутворювальних можливостей. В якості критерія для аналізу спроможності технологічного процесу створювати умови для цілеспрямованої переробки сировинної бази технологічного процесу прийнятий умовний термодинамічний показник, що відображає відношення сумарної роботи відносно переробки всіх компонентів сировини в товарну продукцію до базового значення енергії, що використовується в цьому технологічному процесі. Розрахунково-експериментальні дані показали, що для створення можливостей для подолання принципу термодинамічної двоєдності потрібні умови для додаткового джерела енергії певної якості в кількості не менш 62% від базової енергії. При цьому різке перевищення цієї межі веде до відходу від області термодинамічної нерівноважності, незапланованих спонтанних процесів парної, а потім і множинної парної біфуркації та подальшого термодинамічного хаосу відносно цілеспрямованої переробки не тільки самого потенційного відходу, а й планової товарної продукції. Показані певні обмеження для можливостей виробничої системи щодо її переведення повністю у стан термодинамічної нерівноважності в межах заявленого показника від 0,7 до 4,06. Поза межами цих значень виробнича система не спроможна до будь-якої мінімізації відходів в самому технологічному процесі.

Ключові слова: промислові відходи, структура сировини, термодинамічні обмеження, ентропія, біфуркація, хаос.

Постановка проблеми

Одним з сучасних методів мінімізації відходів поступово стає керований процес впливу на сировинну базу технологічного процесу з метою зменшення кількості відходів в межах самого технологічного процесу. Такі методи стикаються з проблемами приведення всієї сировинної бази до стану термодинамічної нерівноважності відносно енергії, що впливає на них. Як правило, додаткові джерела енергії в будь-якому технологічному процесі здібні вивести цей процес з стійкого стану, що завадить виконанню основного завдання цієї системи – отримання товарної продукції. Потрібні знання про параметричні межі існування такого втручання в виробничу систему.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У дослідженнях накопичено достатній досвід, що ілюструє принцип термодинамічної двоєдності як основи механізмів утворення відходів у технологічних процесах [1-3]. Показано, що мінімізація відходів у самому джерелі їх виникнення – технологічному процесі

– залежить, перш за все, від стану термодинамічної нерівноважності компонентів сировини по відношенню до джерела енергії, що використовується в технологічному процесі. При певних умовах щодо використання зовнішньої енергії, виробнича система здатна переходити не тільки з рівноважного стану в нерівноважний, але і випробує стан невизначеності і навіть хаосу щодо мінливих енергетичних умов технологічного процесу [4]. Механізм переходу виробничої системи з додатковими джерелами енергії, спрямованими на мінімізацію відходів всередині самої системи, зі стану парної біфуркації і відповідного їй стану термодинамічної нерівноважності в стан біфуркаційної парної множинності і далі до хаосу, стає тим самим теоретичним обмеженням технологічного процесу, що перешкоджає подоланню принципу термодинамічної подвійності.

Мета статті

На підставі системних досліджень термодинамічних характеристик технологічних процесів запропонувати параметричні обмеження, що лімітують

реалізацію принципу термодинамічної двоєдності та надають виробничим системам максимально унеможливити появу промислових відходів в межах самого технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу

Для обґрунтування таких висновків у статті наведено результати розрахунково-експериментальних даних, отриманих під час вивчення репрезентативної вибірки існуючих технологічних процесів.

Методика дослідження.

Запишемо рівняння Л. Онсагера для обчислення зміни ентропії в слабонерівноважних системах для наших цілей у такому вигляді: $\Delta S/E_0 = r\lambda(1 - \lambda)$, де: $\lambda = \frac{X_p}{X_p + X_w}$ – певний феноменологічний коефіцієнт, що визначає співвідношення термодинамічних сил, що беруть участь у виробництві товарної продукції X_p і в появленні відхода X_w [2]; $r = (J_0 X_0 + J_w X_w)/E_0$ – термодинамічний показник, що відображає співвідношення сумарної роботи по перетворенню всієї сировини $(J_0 + J_w)$ в товарну продукцію до базового значення енергії E_0 .

Методика досліджень включала виявлення значень коефіцієнтів r у послідовності технологій, що визначаються величиною ΔS_{max} на феноменологічних кривих Л. Онсагера. Ці точки зазначені 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. 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;
 - величину додаткової зовнішньої енергії $E_w \leq 0,62E_0$ обраної якості, яка може дозволити вивести матеріальний потік E_0 зі стану, близького до термодинамічної рівноваги, до нерівноважного стану;
 - значення термодинамічного параметра $0 < r \leq 4,6$ 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 максимально можливої корисної продукції;

- зміна ентропії системи, залежно від стану її нерівноважності, відповідно до відомих рівнянь Л. Онсагера, теоремі І. Пригожина та ін., залежно від змісту та закономірностей самого технологічного процесу;

- зміна наведеної ентропії системи $\Delta S/E_0$ залежно від феноменологічного коефіцієнта $\lambda = \frac{X_w}{X_0 + X_w}$ 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)*. Достовірність розрізняваності однойменних показників в незалежних вибірках показників в умовах відсутності нормального розподілу оцінювалась за допомогою непараметричного *U-критерія Манна-Уїтні* [5], у вигляді єдиної 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 $U_{1,2} = \min$ показує на їх непорівнянність. Тут: $R_{1,2}$ – сума рангів для відповідної виборки; $n_{1,2}$ – розмір кожної з вибірок.

Підсумки дослідження залежності типу $\frac{\Delta S}{E_0} = f(r)$

для різних технологій представлені на рис. 1 у вигляді окремих точок початкових значень зміни ентропії (у вигляді відповідних *U-критерію Манна-Уїтні* і середньоквадратичної похибки $\pm \sigma_{\Delta S}$ її математичного очікування $M_{\Delta S}$). З урахуванням похибок, отриманих при обробці експериментальних даних (в залежності від потужності, типу технічної системи, її продуктивності, якості сировини і кількості кінцевих відходів виробництва), цифри на графіку в області подвоєння результатів можуть бути приблизно порівнянні з закономірностями, викладеними в роботі [6].

Значення показника r у послідовності технологій опосередковано визначаються розміром ΔS_{max} при $\lambda \approx 0,5$ на феноменологічних кривих Л. Онсагера. Ці точки відзначені в координатах «зміна ентропії – ваговий коефіцієнт λ » для досліджуваних технологічних процесів та їх модифікацій, наприклад, як показано в [2]. У переважній більшості технологій присутня базова або модифікована *теплова* енергія (69%), з дуже малою тепловою ефективністю і високою ентропією процесу. У 14% досліджуваних технологічних процесів використовується *електрична* енергія, але тільки 5% з них це чисто електричні та електролітичні процеси, а решта – їх електротермічні модифікації, ККД яких також вкрай низький при високих значеннях ентропії. Трохи більше 15% від загальної вибірки технологічних процесів пов'язані з використанням інших типів енергії (механічної, пневматичної та гідравлічної та ін.).

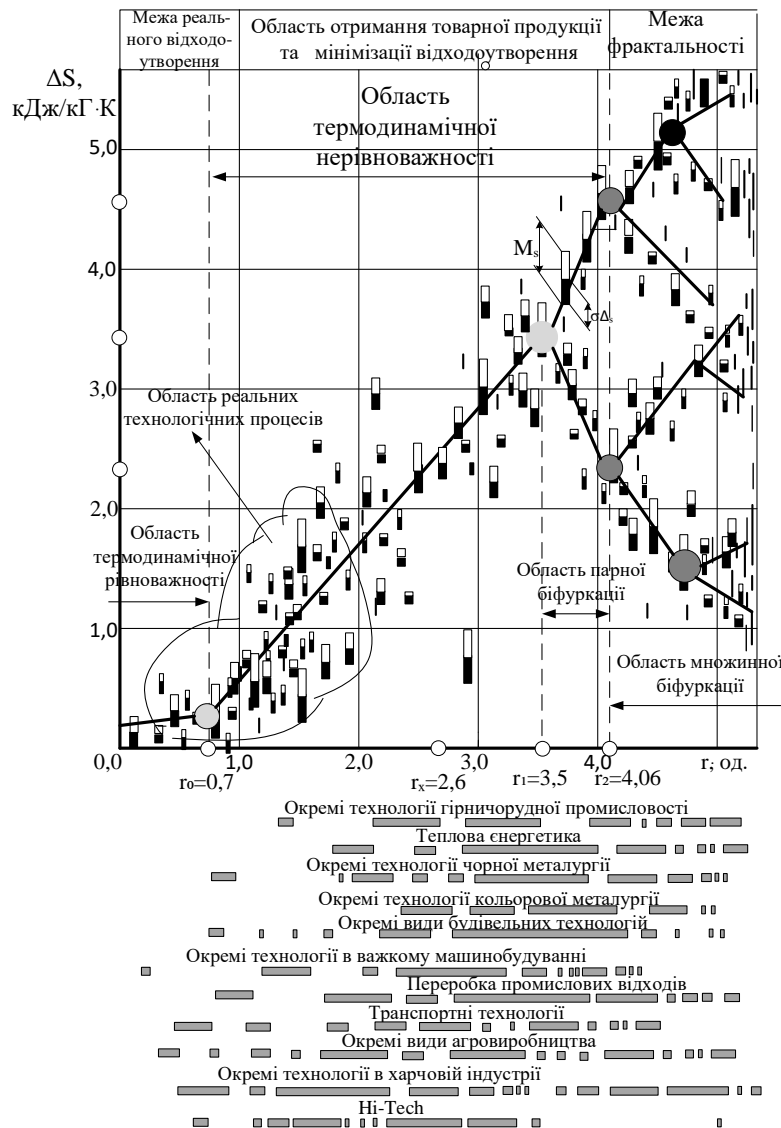


Рис. 1 – Розрахункові дані для оцінки межі термодинамічної нерівноважності та хаосу для різних технологічних процесів (окремо виділена область для реальних технологічних процесів та область гіпотетичних розрахункових даних)

Для мети цієї роботи важливими є інтервали, в яких відображається відношення параметрів системи до стану термодинамічної рівноваги. Вони досить чітко відрізняють чотири акцентні області (див. рис. 1).

1. Умова, коли $0 \leq r < 0,7$, відображає область термодинамічної рівноваги для всієї виробничої системи. Усі траєкторії системи прагнуть нуля. Як правило, тут виконується умова $J_w X_w = 0$ або $A_w = 0$, коли технологічний процес взагалі пов'язаний з цілеспрямованим утворенням потенційних відходів (w). Або коли нерівнозначні термодинамічні сили, що спрямовані на виробництво товарної продукції (p) та відходу (w), розділені і перебувають у стані термодинамічної двоєдності [2].

2. Умова перетину системи з рівноважного стану до стану слабкої термодинамічної нерівноважності

відноситься до області з $r \geq 0,7$ (див. рис. 1). У такому стані система прагне фіксованої точки значення ΔS 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 $J_0 X_0 \geq 0$ явно замало для цілеспрямованого перетворення другої частини матеріальних потоків J_w , які довільним чином переходять у відходи. Виникає необхідність у деякому $X_w \neq 0$, що, в свою чергу, накладає обмеження на об'єми сумарної зовнішньої енергії.

3. Цікава умова $r \leq 3,5$, при якій розрахункові $J_w X_w \sim 0,62E_0$. Вона співвідноситься з тією часткою 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. Підкреслимо гіпотетичний характер цієї залежності.

4. В той же час, при первинній недостатності додаткової зовнішньої енергії, за умовою $J_w \cdot X_w < 0,62E_0$ відбувається перехід системи до періодичної поведінки щодо параметра r . Зокрема, при дотриманні умови термодинамічної нерівноважності в системі, наприклад, при $r > 3,5$ коли існують розрахункові $J_w X_w \leq 0,56E_0$, вона може стати об'єктом парної біфуркації, тобто невизначеності, а при $r \approx 4,06$ – виявляти ознаки вже множинності парних біфуркацій, тобто сильної невизначеності, яка ставить під сумнів можливість енергетичного впливу на J_w .

5. Далі, за умови розрахункових $r \geq 4,06$ та відповідних вже $J_w X_w \leq 0,39E_0$, тобто за подальшої недостатності енергії, що вводиться (оцінково менше 39% від початкової, необхідної для забезпечення основного технологічного процесу), система переходить 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 – продукції (p). Тут біфуркаційне множення періодів робить виробничу систему з додатковою, але недостатньою, 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* та одночасна *не перебільшеність* додаткової зовнішньої енергії E_w заданої якості, для того, щоб вивести ту частину сировини, якої зазвичай виходить відхід зі стану термодинамічної рівноваги та перевести її у вихідний стан слабкої нерівноважності.

Порівняємо ці дослідження з прикладними результатами для існуючих технологій в області однієї з найбільш забруднюючих галузей – металургії. Наукою і практикою накопичено достатній досвід в технологіях виробництва сталі, одного з найбільш технологічних матеріалів сучасності. Загальне щорічне виробництво сталі у світі становить 1,888 млрд тонн. А загальна кількість сталі, що міститься в самих різних предметах, створених людиною і в самих різних галузях і спорудах, досягає 35 млрд тонн переробленого металу, в тому числі і сталі, що знаходиться на стадії переробки (брухту) [7, 8]. Всього за всю історію сталеплавильного виробництва було створено кілька десятків технологічних процесів, деякі, що знайшли практичне застосування, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Загальна характеристика основних технологічних процесів отримання сталі та її відходів, зведених до одиниці товарної продукції

№№ п/п	Найменування технології	Короткий опис технологічного процесу та його відходи	Кількість відходів, т/т
Технології прямого напрямку			
I	Томасівський процес	Він полягає в продуванні розплавленого чавуну повітрям через дно конвертера, який видаляє домішки, такі як фосфор. Метод був економічним і підходив для переробки залізної руди з високим вмістом фосфору. Відходи: шлак, пил, металобрухт	0,3–0,5
II	Бессемерівський процес	Передбачає продування збагаченого повітря через розплавлений чавун в конвертері. Процес дуже швидкий, але чутливий до складу металу, що подається, зокрема вмісту фосфору та сірки. Відходи: шлак, пил	0,15–0,3
III	Мартенівський процес	Заснований на нагріванні рідкого чавуну і металобрухту у великому агрегаті регенеративної мартенівської печі. Перевагами методу є можливість використання різних видів сировини і ретельний контроль хімічного складу сталі. Відходи: шлак, пила, металобрухт, шлам	0,2–0,4
IV	Киснево-конвертерний процес	Заснований на продуванні рідкого заліза чистим киснем, що забезпечує більш швидке і ефективне видалення домішок. Технологія є однією з найпоширеніших у сучасному сталеплавильному виробництві завдяки своїй енергоефективності. Відходи: шлак, пила, окалина	0,1–0,2
V	Технологія прямого відновлення заліза	Відновлення залізної руди до стану залізного напівфабрикату в твердому стані з використанням природного газу або вугілля при температурі 800–1200°C. Залізо може використовуватися в електропечах для виробництва сталі. Відходи: металічна окалина, пил, залишки вуглецевих матеріалів.	0,05–0,15
VI	Електросталеплавильний процес	Використовується електрична енергія для розплаву металічного брухту та залізорудних матеріалів. Метод надає високу якість сталі та широко використовується для спеціальних сталей. Відходи: шлак, пил, відпрацьована цегла, металічний брухт	0,1–0,25

Кожен з цих технологічних процесів пов'язаний з джерелами енергії різної потужності і якості, кожен має свій певний асортимент відходів. І одно з головних завдань, яке в них вирішується, полягає в отриманні максимальної кількості якісної товарної продукції. А ми затребуємо водночас ще й максимально мінімізувати відходи в самому технологічному процесі. Це вимагає, як мінімум, динаміка втрат від утворення відходів за кожною технологією в міру її енергетичного насичення і коливання специфіки сировини. Причому кількість відходів, що виносяться на одиницю одержуваного товарного продукту, в залежності від кількості і якості базової зовнішньої енергії E_0 , специфіки самого технологічного процесу (умов фізико-хімічних реакцій), дає умовну лінію зміни наведеної ентропії $\Delta S/E_0$ в залежності від заданих значень термодинамічних коефіцієнтів r і λ і поведінки самої системи (рис. 2).

Два показника, що впливають на мінімізацію відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі, це термодинамічна нерівноважність, як залежність від запропонованого термодинамічного показника r , і енергетична насиченість технологічного процесу, що забезпечує переробку не тільки основного потоку сировини J_0 в корисні продукти, але і тієї частини сировини J_w , яка в звичайній системі відправляється у відходи. Для цього на графіках (див. рис. 2) показана крива зміни ентропії, що приведена до базової енергії системи E_0 . Її аналіз дає уявлення про існування (чи ні) суттєвого резерву для мінімізації відходів у таких технологічних процесах, наближаючи їх до теоретично

обґрунтованого рівня. Наприклад, додаткова енергія E_w для високовідходного мартенівського процесу (точка «а») здібна змінювати параметр r_a більш, ніж втричі: $r_a = 1,8 \div 5,5$, у порівнянні з класичною технологією, виводячи його умовну сумісну роботу ($J_0X_0 + J_wX_w$) за межі спроможності самого технологічного процесу ($E_0 + E_w \gg 1,62$ від базової енергії), чим здатна привести систему в явно нестійкий і, навіть, хаотичний стан, в якому немає бути специфічної термодинамічної нерівноважності. І, в той же час, технології прямого відновлення заліза і електродугового переплаву (див. точки «b» і «c» відповідно) дають діапазон зміни параметру в декілька процентів: $r_b = 2,1 \div 2,5$ і $r_c = 1,95 \div 2,23$, тобто показують на досяжність стійкості системи і стану термодинамічної нерівноважності в таких технологіях, коли на них подається додаткова енергія іншої якості з розрахунку $E_0 + E_w \sim 1,62$ від базової енергії. У другому та третьому випадках системи не переходять в стан множинних біфуркації і подальшого хаосу, який перешкоджає якісному впливу на потенційну відходоутворюючу сировину (див. рис. 2).

Такий аналіз може бути виконаний і для інших технологічних процесів шляхом вказівки конкретних енергетичних параметрів з подальшим розрахунком відновленої ентропії і визначенням термодинамічного коефіцієнта. Отримані результати можуть бути використані при прогнозуванні розвитку сучасних технологій, а також в якості подальших досліджень.

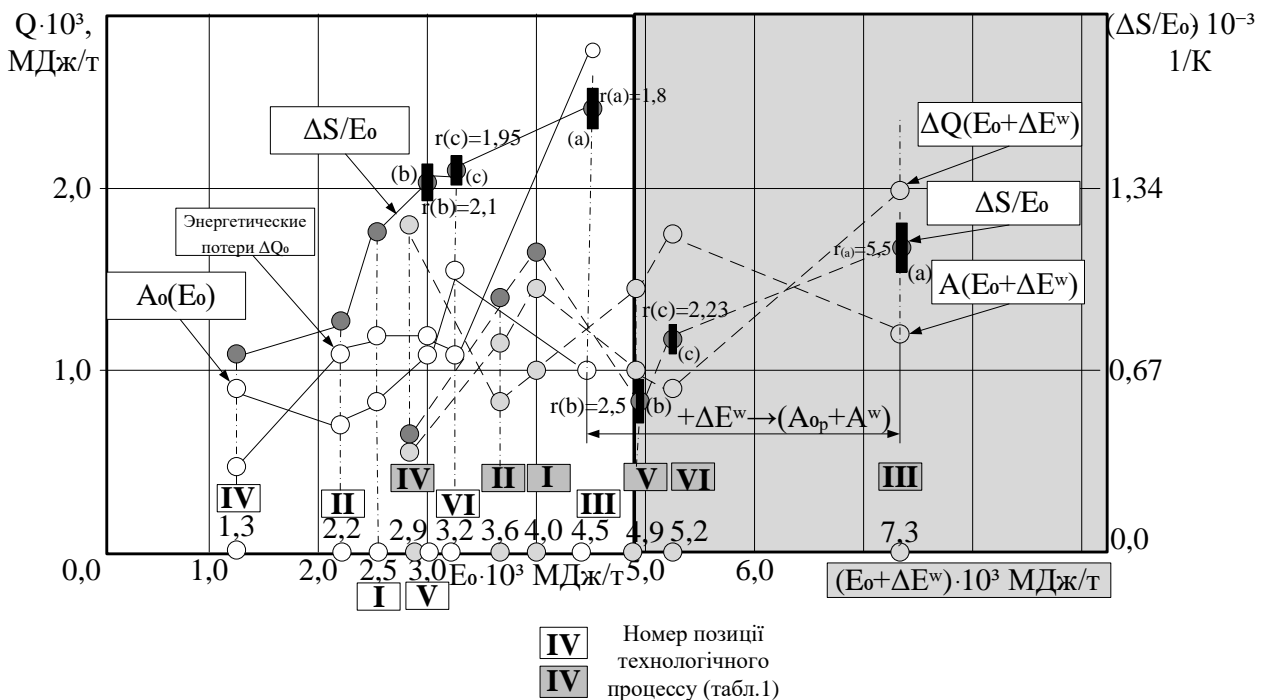


Рис. 2 – Енергоентропійні залежності для визначення області термодинамічної нерівноважності як показника досяжності теоретичного мінімуму утворення відходів у технологіях виробництва сталі

Висновки

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

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

3. Входження термодинамічної системи в зону парної біфуркації за параметрами феноменологічного рівняння не зменшує можливостей для технологічного процесу щодо досягнення розрахункового теоретичного мінімуму утворення відходів.

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

Перелік використаних джерел

[1] Волошин В. С. Відходи та їх природа. К. : СПД Самченко, 2024. 630 с.

- [2] Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. К. : СПД Самченко, 2024. 80 с.
- [3] Волошин В. С. Щодо питання про методологію мінімізації відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі. *Екологічні науки*. 2024. № 2(53). С. 114-122. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.17>.
- [4] Волошин В. С. Чи варто шукати «золоті пропорції» Фібоначчі в процесах утворення відходів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2022. Вип. 44. С. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.32782/2225-6733.44.2022.6>.
- [5] Mann H. B., Whitney D. R. On a Test of Whether One of Two Random Variables Is Stochastically Larger Than the Other. *Annals of Mathematical Statistics*. 1947. № 18(1). Pp. 50-60. DOI: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>.
- [6] May R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*. 1976. Vol. 261(5560). Pp. 459-467. DOI: <https://doi.org/10.1038/261459a0>.
- [7] World Steel in Figures 2023. Brussels : World Steel Association, 2023. 36 p.
- [8] The Global Steel Industry in Figures. OECD Publishing. Paris, 2022. 72 p.

CONDITIONS FOR OVERCOMING THE PRINCIPLE OF THERMODYNAMIC DUALITY AS A MECHANISM FOR CREATING INDUSTRIAL WASTE**Voloshyn V.S.***D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: vsvlshn52@gmail.com;***Burko V.A.***PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>, e-mail: burko_v_a@pstu.edu*

On the basis of previous studies in the field of industrial waste minimization, namely, knowledge about the mechanisms of the existence of the principle of thermodynamic duality in the technological process as the basis for waste creation, it is shown that such minimization in the middle of the technological process itself is based on two indicators – the ratio of raw material components to the thermodynamic imbalance in relation to the energy source used, as well as on the ability of energy of a certain quality and quantity to affect all components of the raw material base of the technological process. A methodology for studying the state of the technological process from its main indicators affecting the processes of waste generation has been developed. Taking into account that the features of any technological process should be incomparable with respect to the main indicators outside the normal distribution, it is proposed to evaluate them using the nonparametric Mann-Whitney U-test, in the form of a single sample for the compared dependencies. According to the general method, almost 200 modern technological processes and their modifications were subject to research, which made it possible to analyze a certain generalized technological process relative to its waste-generating capabilities. As a criterion for analyzing the ability of the technological process to create conditions for purposeful processing of the raw material base of the technological process, a conditional thermodynamic indicator is adopted, reflecting the ratio of the total work regarding the processing of all components of raw materials into marketable products to the basic value of energy used in this technological process. Computational and experimental data have shown that in order to create opportunities to overcome the principle of thermodynamic duality, conditions are needed for an additional energy source of a certain quality in the amount of at least 62% of the base energy. At the same time, a sharp excess of this limit leads to a departure from the area of thermodynamic disequilibrium, unplanned spontaneous processes of paired and then multiple pairwise bifurcation and subsequent thermodynamic chaos regarding the purposeful processing of not only the potential waste

itself, but also planned marketable products. Certain limitations on the declared indicator for the capabilities of the production system, regarding its transfer completely into a state of thermodynamic disequilibrium within the declared indicator from 0.7 to 4.06 are shown. Beyond these values, the production system is not capable of any minimization of waste in the technological process itself.

Keywords: industrial waste; structure of raw materials; thermodynamic constraints; entropy; bifurcation; chaos.

References

- [1] V. Voloshyn, *Vidkhody ta yikh pryroda* [Waste and its nature]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [2] V. Voloshyn, *Vidkhody ta termodynamika* [Waste and thermodynamics]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [3] V.S. Voloshyn, «Shchodo pytannia pro metodolohiiu minimizatsii vidkhodiv u dzhhereli yikh vynyknennia - tekhnolohichnomu protsesi» [«On the question of the methodology of waste minimization at the source of occurrence»], *Ekolohichni nauky – Ecological Sciences*, № 2(53), pp. 114-122, 2024. doi: **10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.17**.
- [4] V.S. Voloshyn, «Chy varto shukaty «zoloti proporsii» Fibonachchi v protsesakh utvorennia vidkhodiv» [«Should we look for Fibonacci's «golden ratio» in the processes of waste formation»], *Visnyk Pryazovs'koho Derzhavnogo Tekhnichnogo Universytetu. Seriia: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 44, pp. 43-53, 2022. doi: **10.32782/2225-6733.44.2022.6**.
- [5] H.B. Mann, and D.R. Whitney, «On a Test of Whether One of Two Random Variables Is Stochastically Larger Than the Other», *Annals of Mathematical Statistics*, № 18(1), pp. 50-60, 1947. doi: **10.1214/aoms/1177730491**.
- [6] R.M. May, «Simple mathematical models with very complicated dynamics», *Nature*, vol. 261(5560), pp. 459-467, 1976. doi: **10.1038/261459a0**.
- [7] *World Steel in Figures 2023*. Brussels : World Steel Association, 2023.
- [8] *The Global Steel Industry in Figures*. OECD Publishing. Paris, 2022.
- Стаття надійшла 23.01.2026
Стаття прийнята 25.02.2026
Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Волошин В.С., Азархов О.Ю. Ентропійний фактор у прояві властивостей органічних і неорганічних систем на межі співіснування людини та навколишнього середовища. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 110–116. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359940>.