

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Бурко В. А., канд. техн. наук, доц

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

ЩОДО ЕНЕРГЕТИЧНИХ УМОВ ДЛЯ ПОДОЛАННЯ ПРИНЦИПУ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ДВОЄДНОСТІ, ЯК МЕХАНІЗМУ СТВОРЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ

У дослідженнях накопичено достатній досвід, що ілюструє принцип термодинамічної двоєдності як основи механізмів утворення відходів у технологічних процесах [1, 2]. 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 [3]. 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.

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

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 [4].

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 типових видів енергії (механічної, пневматичної та гідравлічної та ін.).

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 $J_w X_w \sim 0,62 E_0$. 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.

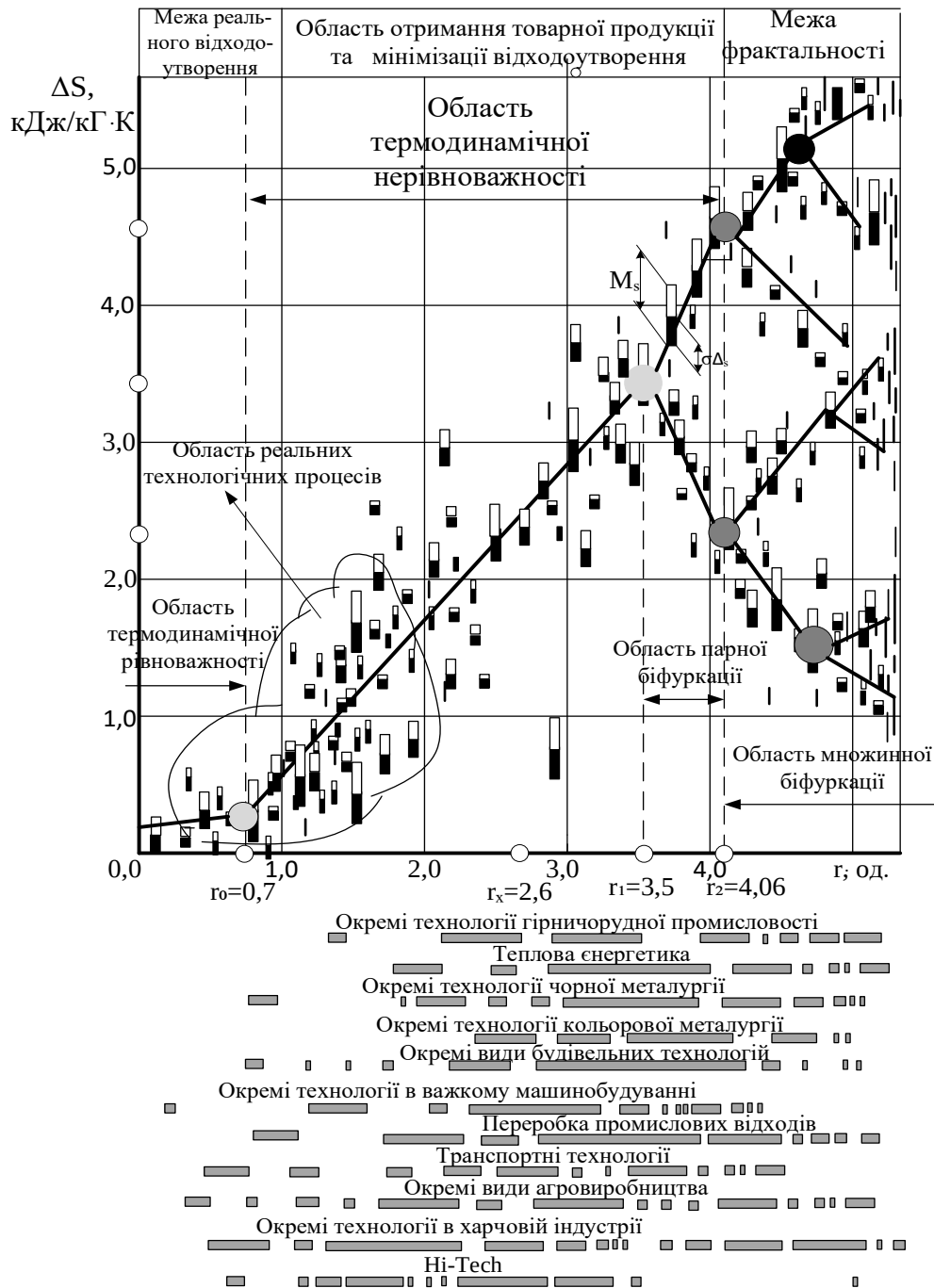


Рисунок 1 – Розрахункові дані для оцінки межі термодинамічної нерівноважності та хаосу для різних технологічних процесів. (Окремо виділена область для реальних технологічних процесів та область гіпотетичних розрахункових даних).

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 $J_w X_w \leq 0,56 E_o$, 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 $J_w X_w \leq 0,39 E_o$, 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. 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 залізрудних 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 одне 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. Про 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.

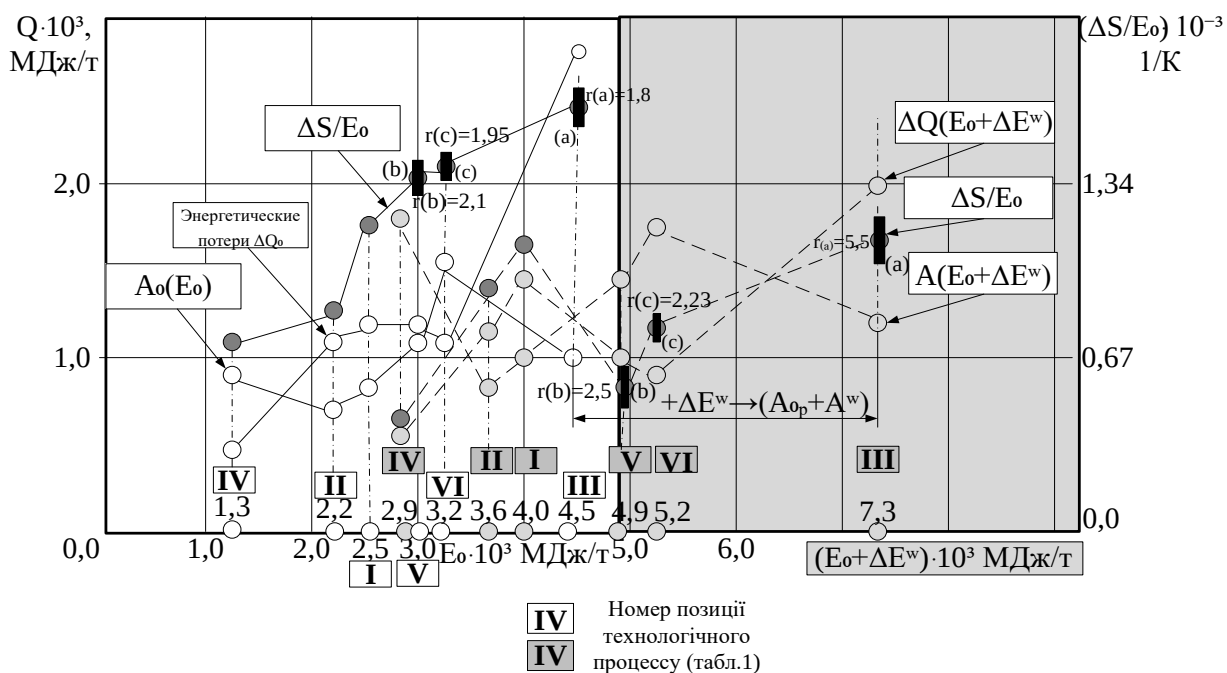


Рисунок 2 – Енергоентропійні залежності для визначення області термодинамічної нерівноважності як показника досягнення теоретичного мінімуму утворення відходів у технологіях виробництва сталі.

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 $(J_0 X_0 + J_w X_w)$ за межі спроможності самого технологічного процесу ($E_0 + E_w \gg 1,62$ від базової енергії), чим здатна привести систему в явно не стійкий 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.

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. Вхідження 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.

Література

1. Волошин В. С. Відходи та їх природа. Маріуполь-Київ. Вид. СПД Самченко. 2024., 630 с.
2. Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. Київ. Вид. СПД Самченко. 2024. 80 с.
3. Волошин В. С. Чи варто шукати «золоті пропорції» Фібоначчі в процесах утворення відходів. Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки зб. наук. праць. 2022. Вип. 44. Дніпро: С. 43-53.
4. May, R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature, 261(5560), P. 459-467.