

ЕКОЛОГІЯ

УДК 629.341

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.160

АНАЛІЗ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ АСПЕКТІВ УТВОРЕННЯ
ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ

Волошин В. С, Бурко В. А.

Приазовський державний технічний університет

Анотація. У статті наведено дослідження концепції теоретичного мінімуму утворення відходів, що розглянута як фундаментальна фізична характеристика технологічного процесу. Основою для роботи є класичні наукові праці таких видатних вчених, як І. Пригожін, Л. Онсагер та М. Фейгенбаум, зокрема аналізується взаємозв'язок між виробництвом основного товарного продукту та неминучим утворенням відходів. У дослідженні зазначено, що досягнення мінімального рівня відходів у межах самого технологічного процесу вимагає не тільки стану сильної термодинамічної нерівноваги, але й наявності достатньої кількості додаткової зовнішньої енергії певної якості. Обґрунтовано, що розрахунковий обсяг цієї енергії має становити не менше ніж 62,5 % від базової енергії, що використовується в технологічному процесі. Для підтвердження теоретичних висновків здійснено розрахункові й експериментальні дослідження, що демонструють вплив різних факторів на утворення відходів. Зокрема зазначено, що входження термодинамічної системи до зони парної біфуркації, визначеної параметрами феноменологічного рівняння Л. Онсагера, суттєво зменшує можливості технологічного процесу щодо досягнення його теоретичного мінімуму утворення відходів. Цей факт вказує на критичну функцію стійкості процесу та його чутливості до внутрішніх змін. Крім того, стаття містить обґрунтування порівняння технологічного процесу з його термодинамічною динамікою з механізмами фейгенбаумського хаосу. Зазначено, що різноманіття невизначеностей, що завжди наявне в будь-якому виробництві товарної продукції, через такі механізми може опосередковано призводити до лавиноподібного збільшення утворення відходів. Це підкреслює важливість врахування нелінійної динаміки та управління невизначеностями для мінімізації відходів. Таким чином, дослідження пропонує комплексний підхід до аналізу та мінімізації відходів, поєднуючи принципи термодинаміки, енергетики та теорії хаосу. Результати роботи мають важливе практичне значення для розроблення більш ефективних та екологічно чистих технологій виробництва.

Ключові слова: мінімізація промислових відходів, термодинамічна нерівноважність, теоретичний мінімум утворення відходів, зовнішня енергія, ентропія, термодинамічна двоєдиність, екологічна стійкість.

Вступ

Проблема утворення відходів є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності. Збільшення виробництва та споживання призводить до накопичення величезних обсягів відходів, що негативно впливають на довкілля та здоров'я людини. У зв'язку з цим пошук способів мінімізації утворення відходів є важливим завданням для науковців, інженерів і технологів. Дослідження можливості досягнення теоретичного мінімуму утворення відходів у технологічних процесах з погляду фізичних явищ, що лежать в їхній основі, є актуальним та не дослідженим явищем. Будь-який технологічний процес, незалежно від його призначення, супроводжується перетворенням енергії та/або речовини. Згідно із законами збере-

ження енергії та маси, у процесі перетворень неможливо досягти 100 % ефективності. Частина вихідної речовини або енергії неминуче перетворюється на побічні продукти, які і стають відходами. Концепція теоретичного мінімуму утворення відходів ґрунтується на ідеї існування ідеального технологічного процесу, в якому всі вихідні речовини та енергія перетворюються на цільовий продукт без утворення побічних. Такий процес є ідеалізацією і в реальності недосяжний, оскільки він суперечить законам термодинаміки. Проте розуміння концепції теоретичного мінімуму дозволяє нам визначити граничні можливості для мінімізації відходів у реальних процесах. Цей теоретичний мінімум визначається фізичними законами, що лежать в основі конкретного технологічного процесу.

Утворення відходів можна розглядати як незворотний процес, що пов'язаний зі збільшенням ентропії системи. Ентропія є мірою безладу в системі, і, згідно з другим законом термодинаміки, у замкнутій системі ентропія з часом тільки збільшується. Таким чином, у будь-якому реальному технологічному процесі частина енергії або речовини неминуче переходить у форму, що не піддається корисному використанню, тобто стає відходом. Глибоке розуміння фізичного сенсу маловідходності та безвідходності будь-якого виробництва дозволяє знаходити більш ефективні способи та методи мінімізації відходів, забезпечувати захист довкілля від безмежного накопичення промислових відходів, що визначає актуальність роботи.

Аналіз публікацій

У роботах автора [1, 2] запропонована і проілюстрована на багатьох прикладах методика визначення 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 містять зіставлення двох графіків: залежностей, що описані феноменологічним рівнянням Л. А. Онсагера для визначення зміни ентропії у системах зі слабкою термодинамічною нерівноважністю та кривою, що демонструє залежність термодинамічних сил X_i , завдяки яким здійснюється технологічний процес, від параметричного коефіцієнта $\lambda = (\Delta X_i) / X_i$ [2]. Проте механізми, а також параметричні значення граничних умов такого явища виявлені не були. Зокрема не було вирішено питання про граничні значення іскомого мінімуму, його умови та причини появи, не враховано умови, за яких такі системи переходили до стану невизначеності, що робило їх некерованими. Як зазначено в роботах І. Пригожина [3,4], такі залежності впливали з розуміння умов термодинамічної нерівноважності, незворотності та можливих умов стаціонарності таких систем.

Згідно з дослідженнями, невизначені стани можуть стати причинами недосяжності теоретичного мінімуму відходоутворення для певних класів технологічних процесів, зокрема, зміна (збільшення) ентропії у відходоутворювальних системах як показник мінімізації відходоутворювальних матеріальних потоків є закономірною величиною, яка залежить від якості сировини, використову-

ваної енергії та визначає свій вектор у протилежному напрямку ефективного перероблення сировини [5]. У такому контексті залишаються актуальним такі питання: наскільки досяжним є фізично обґрунтований теоретичний мінімум відходів у технологічному процесі і від чого він залежить.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є дослідження впливу додаткової зовнішньої енергії E_w на мінімізацію відходів у технологічних процесах, що перебувають у стані сильної термодинамічної нерівності важності, підтвердження або спростування гіпотези про необхідність введення додаткової енергії для переведення сировини в стан слабкої нерівноважності з метою зменшення відходів, дослідження впливу проходження технологічним процесом точок парної біфуркації на можливість досягнення теоретичного мінімуму відходоутворення, виявлення й аналіз механізмів переходу виробничих систем від стану біфуркаційної нерівноважності до хаосу щодо їх впливу на досягнення теоретичного мінімуму відходів, дослідження взаємозв'язку між механізмами хаосу Фейгенбаума та лавиноподібним утворенням відходів у технологічних процесах.

Виклад основного матеріалу

Подано технологічний процес, який спрямований на отримання готової корисної продукції (p) та утворення деяких відходів (w). Реалізація цього технологічного процесу здійснюється в межах деякої виробничої системи, що забезпечує потоки сировини, енергії тощо. З метою мінімізації відходів усередині джерела виникнення, тобто самого технологічного процесу, вимагатимемо присутності додаткового джерела зовнішньої енергії ΔE_w . Тоді перший закон термодинаміки може бути записаний так:

$$E_0 + \Delta E_w = \Delta U^* + (A_{0p} + A_{0w}),$$

де A_w – робота, що здійснюється для впорядкованого перетворення на продукцію тієї частини сировини J_w , яка у звичайному вигляді переходить на відходи; E_0 – зовнішня енергія; ΔU^* – внутрішня енергія системи; A_{0p} – корисна робота системи, спрямована на отримання продукції; A_{0w} – робота системи, спрямована на отримання відходів.

Оскільки система змінюватиметься так, що робота з перетворення тієї частини сировини, з якої маємо відходи, $A_{0w} \rightarrow 0$. Це означає, що

відходи в системі матимуть максимальне значення. Частина роботи в системі, що витрачається на перетворення тієї частини сировини J_w , яка раніше була відходами, $A_{0w} \neq 0$ і збільшуватиметься в процесі підведення додаткової зовнішньої енергії певної якості. Частина цієї енергії знову сприятиме збільшенню внутрішньої енергії ΔU^* , а інша частина у вигляді роботи $A_{0w} + A_w > 0$ витратиться на перетворення зазначеної раніше частини сировини J_w . Але цей «відхід» матиме дещо інші якості, які роблять його більш корисним. Тут реалізується принцип, який зазначений у відомій теоремі І. Пригожина, згідно з яким, для таких систем є можливості для емісії ентропії у надсистему та зворотних процесів енергетичної інтервенції з надсистеми до систему, що кореспондується з принципом термодинамічної двоєдності, розглянутої у роботі [6], а також із роботами авторів [7, 8].

Для аналізу можливості зменшення відходів у виробничих процесах можна застосувати підхід, що ґрунтується на рівнянні Л. Л. Онсагера для ентропії в системах, наближених до рівноваги. У цьому підході розглядаються дві термодинамічні сили: X_0 , що спрямована на перетворення основної частини сировини на готовий продукт; X_w , що спрямована на перетворення тієї частини сировини, яка раніше була відходами, на додаткову товарну продукцію.

Аналізуючи інтервали, в яких відображається співвідношення параметрів системи до термодинамічної рівноваги, можна дійти висновку, що умовою мінімізації відходів усередині джерела їх виникнення, тобто в 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 утворюються відходи, зі стану термодинамічної рівноваги та перевести її у вихідний стан слабкої нерівноважності.

Подібні висновки достатньо корелюються з результатами розрахунково-експериментальних даних дослідження багатьох традиційних технологічних процесів. Розглянемо деякі з них.

Усього досліджено 34 технологічні процеси та 90 їхніх модифікацій, зокрема експериментальних технологій (рис. 1). Вихідними даними для кожного з розглянутих технологічних процесів є такі:

- величина зовнішньої енергії E_0 , що надходить до конкретного технологічного процесу для переробки сировини;

- температурні параметри T_i власне технологічного процесу та зовнішнього середовища T_0 для розрахування зміни ентропії;

- параметри сировини, яка підлягає переробці в конкретному технологічному процесі, а саме:

- параметр матеріального потоку J_0 , який витрачається на отримання основної товарної продукції;

- параметр матеріального потоку J_w , який є первісним обсягом сировини у своїй відходоутворювальній частині;

- величина додаткової зовнішньої енергії $E_w \leq 0,625E_0$ вибраної якості, яка може дозволити вивести матеріальний потік E_0 зі стану, подібного до термодинамічної рівноваги, до нерівноважного;

- значення термодинамічного параметра $0 < r \leq 4,6$ залежно від розрахункових значень зміни ентропії, де r – термодинамічний показник, що визначає співвідношення загальної роботи з перетворення всієї сировини на товарну продукцію до базової енергії E_0 . Саме показник r визначає зв'язок між теоретичним мінімумом утворення відходів у виробничих системах та характеристиками зовнішньої енергії, що використовується.

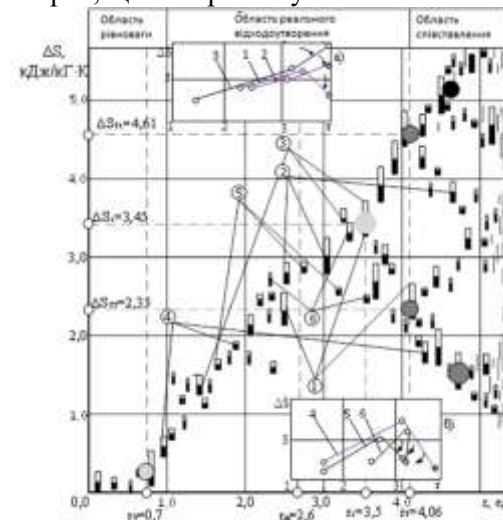


Рис.1. Розрахункові дані для виробництва ентропії в рівнянні Л. А. Онсагера для різних технологічних процесів: а – група технологічних процесів, для яких $0,75 < r \leq 2,6$; б – група технологічних процесів, для яких $2,6 < r \leq 3,5$

Необхідно розрахувати такі показники:

- величину термодинамічної сили X_0 , що забезпечує цілеспрямовану зміну матеріального потоку J_0 до стану товарної продукції;

- величину необхідної термодинамічної сили X_w , яка здатна змінити матеріальний

потік J_w до максимально можливої корисної продукції;

- зміну ентропії системи, залежно від стану її нерівноважності, відповідно до рівнянь Л. Онсагера, теореми І. Пригожина тощо залежно від змісту та закономірностей самого технологічного процесу;

- зміну наведеної ентропії системи $\Delta S / E_0$ залежно від феноменологічного коефіцієнта

$$\lambda = \frac{x_w}{x_0 + x_w} \text{ з подальшим визначенням пара-}$$

метра r на кожному наступному n -му етапі ітерації.

Як приклад розглянемо технології перероблення залізної руди. Дослідженню підлягали технології одержання агломерату, технологія виробництва окатишів і пелетизація гранул зі збагаченої руди з величезним початковим об'ємом відходів і з порівняння за параметрами $\Delta S_{\text{агл}}$ і $\Delta S_{\text{окат}}$ і $\Delta S_{\text{пел}}$ (рис. 1) [10–16]. Порівняємо їх із технологіями отримання кольорових та важких металів.

З погляду досяжності теоретичного мінімуму розділимо такі технології на дві групи (рис. 1, а та б). До першої належать ті, для яких показник $0,75 < r \leq 2,6$ (наприклад біологічне вилуговування або цементация кольорових і важких металів, а також пелетизація збагачених руд), а до другої ті, для яких показник може досягати величини $1,0 < r \leq 3,5$, а іноді й більше (аглодоменне виробництво та отримання окатишів або аміачне вилуговування кольорових металів). Під час зіставлення таких груп технологій (рис. 1) стає очевидною істотна залежність стану відходоутворення від параметра r в межах гладкої термодинамічної нерівноважності, коли $1,0 < r \leq 2,6$, навіть за умови $2,6 \leq r \leq 3,5$ (область парної біфуркації). Але стає очевидна і явна невизначеність у системі, коли параметр $r \geq 4,06$ та система перебуває в стані некерованого хаосу. 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 недостатності енергії, як порівняти з сумарним матеріальним потоком, $(J_0 + J_w)$ це неможливо.

Для нелінійних систем, що розглядаються, умови переходу від термодинамічної нерівноважності до хаосу в інтервалах до біфуркаційного подвоєння періоду пов'язанні з константою Фейгенбаума [26] $Fu \approx 4,669$, а станам з інтервалами множинного біфуркаційного подвоєння, що переходить у хаос,

відповідає $Fu \approx 2,502$. Константа Фейгенбаума відображає зменшення відстаней між попередніми та наступними біфуркаціями в напрямку їхньої множинності до області хаосу (рис. 2)

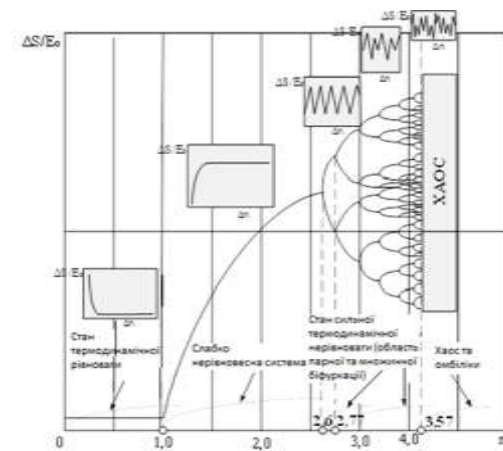


Рис. 2. Залежність зміни ентропії у технологічному процесі від показника його термодинамічного стану

Загалом для періоду першого подвоєння на графіку (рис. 1) отримаємо співвідношення, яке впливає з практичних результатів

$$Fu_r = \frac{r_2 - r_0}{r_2 - r_1} = \frac{3,45 - 0,71}{4,06 - 3,45} = 4,49, \text{ що для цього}$$

періоду можна порівняти з першою константою Фейгенбаума, умовно позначеною тут як Fu_r , яка дорівнює 4,669. Розкид із експериментальними даними становить 3,98 %, що є задовільним результатом. Отримане з графіка співвідношення Фейгенбаума, умовно позначене як $Fu_{\Delta S} = \frac{\sigma_1[S] - \sigma_0[S]}{\sigma_2[S] - \sigma_1[S]}$;

$$Fu_{\Delta S} = \frac{3,45 - 0,01}{4,61 - 3,45}; \quad Fu_{\Delta S} = \frac{3,45 - 0,01}{3,45 - 2,37} = 3,127$$

з певною похибкою можна зіставити зі значенням другої константи Фейгенбаума, тобто $Fu_{\Delta S} = 2,502$. Похибка в цьому випадку знаходиться в діапазоні $18,26 \div 24,9$ %, що є слабо порівняним результатом на відміну від теоретичних даних відповідно до тих припущень, які були запропоновані раніше. Проте отримані значення таких властивостей систем, як Fu_r і $Fu_{\Delta S}$, демонструють, що об'єкти нашого дослідження можуть відповідати закономірності 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, зокрема в разі штучного підведення до неї додаткової енергії $E_w \ll 0,625E_0$, опосередковано призводять до лавиноподібних процесів виробництва частини сировинного матеріального потоку, з якого передбачалося отримання товарної продукції. Цей стан не є системним і більшою мірою нагадує некерований хаос. Порівнюємо ці дослідження з прикладними результатами для технологій у галузі одного з найбільш забруднювальних виробництв – металургійного.

На сьогодні ми маємо достатній досвід у технологіях виробництва сталі. Її загальний річний обсяг виробництва у світі становить 1,888 млрд. дол. тонн. А загальна світова металомісткість у різних об'єктах, які створювала людина, у різних галузях промисловості і конструкціях досягає 35 млрд. тонн оборотного металу, включно зі сталлю, що знаходиться на етапі вторинної переробки (брухт). Всього в історії сталеплавильного виробництва було створено кілька десятків технологі-

чних процесів, основні з яких, що знайшли практичне застосування, прийняті до уваги в цих дослідженнях (табл. 1)

Кожен з цих технологічних процесів пов'язаний з різними за потужністю та якістю джерелами енергії E_0 і має свою специфічну номенклатуру відходів. Одним із головних завдань, які вирішуються під час цих процесів, полягає в максимально можливій мінімізації відходів.

Про це свідчить хоча б динаміка відходоутворювальних втрат для кожної технології в міру зростання її енергонасиченості та специфіки сировини. Водночас кількість відходів, що зводиться до одиниці одержуваної товарної продукції, залежно від кількості та якості зовнішньої енергії, специфіки самого технологічного процесу (умови протікання фізико-хімічних реакцій), дає умовну систему зміни ентропії ΔS відповідно до заданих значень термодинамічних коефіцієнтів r і λ і поведінки самої системи (рис. 3).

Таблиця 1 – Характеристика основних технологічних процесів отримання сталі та їхніх 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 крізь дно конвертера, що дозволяє видалити домішки, зокрема фосфор. Це економічно доцільний метод, він використовується для переробки залізняку з високим вмістом фосфору. Відходи: шлак, пил, металевий брухт.
II	Безсермієвський процес	Складається з процесів продування повітря крізь 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 різноманітних видів сировини та ретельний контроль хімічного складу сталі. Відходи: шлак, пил, метал, брухт, шлак.
IV	Киснево-конвертерний процес	Заснований на продуванні рідкого чавуну чистим киснем, що забезпечує більш швидке та ефективне видалення домішок. Технологія є однією з найпоширеніших у сучасному сталеплавильному виробництві завдяки своїй енергоефективності. Відходи: лак, пил, окалина.
V	Технологія прямого відновлення заліза	Відновлення залізної руди до заліза у твердому стані з використанням природного газу або вугілля за температурі 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 залізрудних матеріалів. Метод дає високу якість сталі та широко використовується для спеціальних сталей. Відходи: шлак, пил, відпрацьовані вогнетриви, металевий брухт.

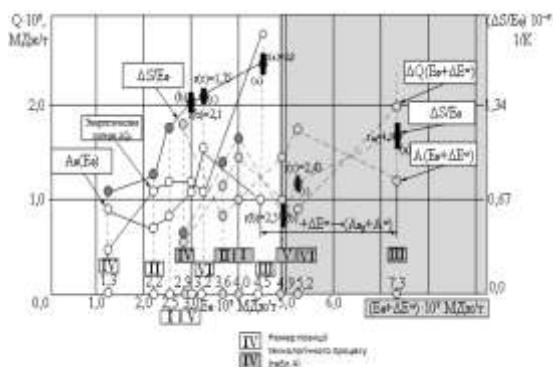


Рис. 3. – Енергетичні та ентропійні залежності для визначення області термодинамічної нерівності як показника досяжності теоретичного мінімуму відходоутворення в технологіях отримання сталі: I – томасівський; II – бесемерівський; III – мартенівський; IV – киснево-конвертерний; V – пряме відновлення заліза; VI – електросталеплавильний процес (затінений графік – область взаємодії з додатковою енергією в системі)

Наприклад, додаткова енергія для відходоутворювального мартенівського процесу (точки «а») з параметром $r_a = 4,5$ здатна привести систему в деякий хаотичний стан, в якому не існує певного термодинамічного нерівноважного стану. Водночас технології прямого відновлення заліза й електродугового переплавлення (точки «b» і «с») дають відповідні параметри $r_B = 2,5$ і $r_C = 2,43$, тобто вказують на досяжність стану термодинамічної нерівноважності в таких технологіях у разі підведення до них енергії іншої якості з розрахунку $\Delta E_w \approx 0,625E_0$. У цьому випадку системи не переходять у стан множинних біфуркацій та подальшого хаосу, що перешкоджає якісному впливу на потенційну відходоутворювальну сировину.

Висновки

1. Для мінімізації відходів безпосередньо в джерелі їх утворення, крім того, що технологічний процес має перебувати в стані значної термодинамічної нерівноваги, ще необхідна достатня кількість додаткової зовнішньої енергії E_w з певними характеристиками її якості.

2. Щоб перевести частину сировини, яка зазвичай стає відходами, зі стану термодинамічної рівноваги до стану, де є невелика нерівновага, необхідно додати до системи енергію, обсяг якої має становити не менше ніж 62,5 % від енергії, що вже використовуватися в цьому технологічному процесі.

3. Коли термодинамічна система досягає зони парної біфуркації (тобто стану, де можуть відбутися два різні процеси розвитку), це не зменшує можливості технологічного процесу досягнення мінімально можливого рівня утворення відходів.

4. Обмеженням для досягнення теоретично мінімального рівня відходоутворення є перехід виробничої системи з додатковою енергією від стану парної біфуркації через стан термодинамічної нерівноваги до стану, де можлива множинність варіантів розвитку (біфуркаційна парна множинність), а згодом і до хаосу. Саме цей процес є розрахунковим обмеженням.

5. Причиною виникнення лавиноподібного утворення відходів може бути те, що параметри реального технологічного процесу з погляду термодинаміки подібні до механізмів хаосу, описані Фейгенбаумом. Ці механізми, пов'язані з різними видами невизначеностей, які неявно присутні в будь-якому виробництві, можуть створювати ефект ланцюгової реакції утворення відходів.

Література

1. Волошин В. С. Про деякі закономірності щодо мінімізації відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі. Екологічні науки. 2024. № 55. С. 84–89.
2. Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. Київ: ФОП Самченко, 2024. 80 с.
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. Oktan Print s.r.o. Prague, 2019. P.108–120
6. Волошин В. С. Відходи та їх природа. Київ, ФОП Самченко. 2024. 630 с.
7. Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics. 2016. 746 p.
8. Moran M. J., Shapiro, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc. Chichester, West Sussex, England. 2014. 847 p.
9. May R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature. 261(5560). P. 459–467.
10. 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.

11. Fuerstenau M. C., Jamison G., Yoon R.-H. Froth Flotation: A Century of Innovation. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. Colorado. 2007. 891 p.
12. Dutta S. K. Direct Reduction of Iron Ore: Principles and Practice. CRC Press. 2020. 27 p.
13. Gupta C. K., Mukherjee T. K. Hydrometallurgy in Extraction Processes, CRC Press. 1990. Volume 1. Science. 248 p.
14. Habashi, F. Principles of Extractive Metallurgy. Hydrometallurgy. Routledge. CRC Press CRC Press. 1999. 494 p.
15. Brierley C. L. A perspective on developments in biohydrometallurgy. Hydrometallurgy. 2008. 94(1). P. 2–7.
16. Dreisinger D. Copper leaching technologies. Hydrometallurgy. 2006. 83(1–4). P.10–20.
17. Feigenbaum, M. J. Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. Journal of Statistical Physics. 198. 19(1). P. 25–52.

References

1. Voloshyn, V. S. (2024). About some regularities regarding the minimization of waste in the source of their occurrence – the technological process. Environmental Sciences. №55. Pp. 84–89. (in Ukrainian).
2. Voloshyn, V. S. (2024). Waste and thermodynamics. Kyiv, FOP Samchenko. 80 p. (in Ukrainian).
3. Prigogine, I. (1961). Thermodynamics of Irreversible Processes. Wiley-Interscience. 119 p.
4. Nicolis, G., Prigogine, I. (1977). Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations. Wiley. 491 p.
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. Pp. 108–120
6. Voloshyn, V. S. (2024). Waste and Their Nature. Kyiv, FOP Samchenko. 630 p. (in Ukrainian).
7. Bejan, A. (2016). Advanced Engineering Thermodynamics. 746 p.
8. Moran, M. J., Shapiro, H. N. (2014). Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc. Chichester, West Sussex, England. 847 p.
9. May, R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature. 261(5560). Pp. 459–467.
10. Cheng, Hu, Zhendong, Yang, Miao, He et al. (2024). From Waste to Wealth: Current Advances in Recycling Technologies for Metal Recovery from Vanadium-Titanium Magnetite Tailings. Journal of Sustainable Metallurgy. № 3. Pp. 1007–1035.
11. Fuerstenau, M. C., Jamison, G., Yoon, R.-H. (2000). Froth Flotation: A Century of Innovation. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. Colorado. 891 p.
12. Dutta, S. K. (2020). Direct Reduction of Iron Ore: Principles and Practice. CRC Press. 27 p.
13. Gupta, C. K., Mukherjee, T. K. (1990). Hydrometallurgy in Extraction Processes. CRC Press. Volume 1. Science. 248 p.
14. Habashi, F. (1999). Principles of Extractive Metallurgy. Hydrometallurgy. Routledge. CRC Press CRC Press. 494 p.
15. Brierley, C. L. (2008). A perspective on developments in biohydrometallurgy. Hydrometallurgy. 94(1). Pp. 2–7.
16. Dreisinger, D. (2006). Copper leaching technologies. Hydrometallurgy. 83(1–4). Pp.10–20.
17. Feigenbaum, M. J. (1978). Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. Journal of Statistical Physics. 19(1). Pp. 25–52.

Волошин В'ячеслав Степанович, д.т.н., проф. каф. охорони праці та навколишнього середовища, vsvlshn52@gmail.com, тел. +380680601321,
Бурко Вадим Анатолійович, к.т.н., доц. каф. охорони праці та навколишнього середовища, тел. +380965091366, burko_v_a@pstu.edu.ua
 ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7/49044, м. Маріуполь, 87555, вул. Гоголя, 29, м. Дніпро, Україна.

Analysis of thermodynamical aspects of industrial waste generation

Abstract. The article presents a study of the concept of the theoretical minimum of waste generation, considered as a fundamental physical characteristic of the technological process. The work is based on the classical scientific works of prominent scientists such as I. Prigogine, L. Onsager and M. Feigenbaum. In particular, the relationship between the production of the main commercial product and the inevitable generation of waste is analyzed. The study shows that achieving the minimum level of waste within the technological process itself requires not only a state of strong thermodynamic disequilibrium, but also the presence of a sufficient amount of additional external energy of a certain quality. It is substantiated that the calculated amount of this energy should be at least 62.5 % of the basic energy used in the technological process. To confirm the theoretical conclusions, computational and experimental studies were conducted demonstrating the influence of various factors on waste generation. In particular, it was found that the entry of a thermodynamic system into the zone of pair bifurcation, defined by the parameters of the phenomenological equation of L. Onsager, significantly reduces the ability of the technological process to achieve its theoretical minimum of waste generation. This fact indicates the critical role of process stability and its sensitivity to internal changes. In addition, the article contains a justification for comparing the technological process with its thermodynamic dynamics with the mechanisms of Feigen-Baum chaos. It is shown that the variety of uncertainties that are always

present in any production of commercial products, through such mechanisms, can indirectly lead to an avalanche-like increase in waste generation. This emphasizes the importance of taking into account nonlinear dynamics and uncertainty management for waste minimization. Thus, the study offers a comprehensive approach to waste analysis and minimization, combining the principles of thermodynamics, energy and chaos theory. The results of the work have important practical significance for the development of more efficient and environmentally friendly production technologies.

Key words: *minimization of industrial waste, thermodynamic disequilibrium, theoretical minimum of waste generation, external energy, entropy, thermodynamic duality, ecological sustainability.*

Voloshyn Vyacheslav Stepanovych, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Labor Protection and the Environment, vsvlshn52@gmail.com, tel. +380680601321,

Burko Vadym Anatoliyovych, Ph.D., Associate Professor, Department of Occupational and Environmental Safety, tel. +380965091366, burko_v_a@pstu.edu

State Higher Educational Institution "Pryazovsky State Technical University", 87555, Ukraine, Mariupol, 7 Universytetska St./ 49044, Ukraine, Dnipro, 29 Gogolya St.
