

---

## ПРИНЦИП ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ДВОЄДИНОСТІ ЯК ОСНОВА СТВОРЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

---

**Волошин В. С., Бурко В. А.**

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-511-2-2>

### **ВСТУП**

Промислові відходи стали невід'ємною частиною антропогенного впливу на планету, створюючи безпрецедентне навантаження на екосистеми. Масштаб проблеми характеризується високим рівнем токсичності, багатофакторним впливом на компоненти довкілля, значним перевищенням природної здатності до самовідновлення та недостатністю ефективності існуючих технологій переробки. Все це робить проблему промислових фактично нерозв'язаною, незважаючи на численні позитивні приклади в цій сфері. Статистика свідчить, що з десятків мільярдів тонн накопичених відходів, навіть в найбільш розвинених країнах, утилізується не більше 20% всіх раніше накопичених промислових відходів, в той час як сучасна промисловість на кожен тону вже перероблених відходів створює 5-7 тонн нових відходів. Ці відходи з'являються в результаті роботи величезної кількості промислових підприємств, нескінченної кількості відомих і нових технологічних процесів, які дають нові потоки відходів, часом абсолютно нової якості і кількості. Тому будь-які принципово нові методи мінімізації відходів отримують об'єктивну підтримку як в науковому, так і в промисловому середовищі. Ідея мінімізації відходів у джерелі їх виникнення, технологічному процесі, не викликає суттєвих нарікань. Однак механізм цього явища не міг би відбутися без конструктивного знання самого принципу появи відходів в технологічному процесі. Відоме правило в менеджменті: «не знаючи суті процесу, неможливо ефективно ним керувати», покладено в основу пропонованого дослідження. Їх суть полягає в тому, що механізм утворення відходів заснований на двох правилах:

- структурування сировинної бази за окремими компонентами;
- визначення умов термодинамічної нерівноважності для системи взаємодії сировини і енергії, присутніх в системі, і пошук шляхів впливу цієї або іншої енергії на всі без винятку компоненти сировинної бази.

В основі таких міркувань лежить принцип термодинамічної двоєдності в будь-якому технологічному процесі, що є складовою частиною більш загального принципу термодинамічного дуалізму<sup>1</sup>, як концепції, що передбачає співіснування двох різних, але взаємопов'язаних аспектів у термодинамічних системах, які існують сумісно для опису поведінки системи. Можна показати, що цей принцип відіграє значну роль у величезній кількості існуючих технологічних процесів, зокрема, будучи відповідальним за появу промислових відходів, за значне забруднення навколишнього середовища, що робить його вивчення надзвичайно актуальним<sup>2</sup>. Принцип термодинамічної двоєдності встановлює фундаментальний зв'язок між процесами перетворення речовини та енергії у виробничих системах. Відповідно до цього принципу, будь-який технологічний процес характеризується:

- неминучістю втрат енергії у формі розсіювання тепла;
- обов'язковістю утворенням відходів як наслідком другого закону термодинаміки;

В основі принципу термодинамічної двоєдності, який відповідає за механізми утворення відходів в будь-яких технологічних процесах, знаходиться розуміння того, що один і той же технологічний процес по відношенню до певної частини компонентів сировини проявляє себе як сильно нерівноважна система і функціонує за законами нелінійної термодинаміки і, в той же час, по відношенню до іншої частини сировини проявляє себе як слабо нерівноважна, або така, що знаходиться в стані термодинамічної рівноваги, і підкоряється законам лінійної термодинаміки. В результаті ми отримуємо, відповідно, готову продукцію і відходи.

Друга проблема, вирішенню якій присвячена дана робота, спрямована на оцінку певного теоретичного мінімуму утворення відходів в технологічних процесах, як актуальний показник будь якого технологічного процесу, якщо при цьому врахувати і витратні механізми подолання існуючого техногенного навантаження на екосистему. Для цього пропонується використання принципу термодинамічної двоєдності, який відповідає за появу відходів в технологічному процесі, а також розраховані залежності на основі цього принципу, що пов'язують утворення відходів з умовами термодинамічної нерівноважності по відношенню до різних компонентів сировини.

---

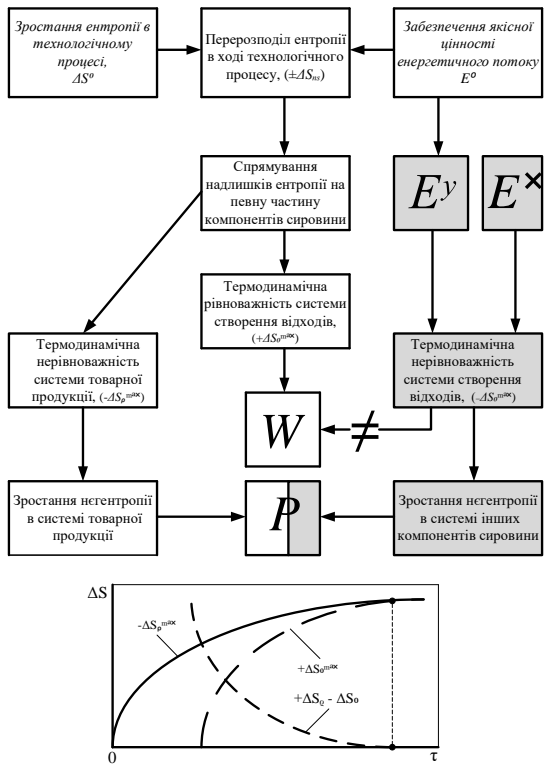
<sup>1</sup> Prigogine, I. – “The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature”. Free Press, 1997 – 228 p.

<sup>2</sup> Волошин В. С. Відходи та їх природа. Київ-Маріуполь, 2024. – 630 с.

# 1. Про одну особливість принципу термодинамічної двоєдності, як причини появи промислових відходів

Принцип термодинамічного двоєдності є фундаментальною концепцією, що пов'язує матеріальні та енергетичні перетворення в будь-яких виробничих процесах. Цей принцип стверджує нерозривний зв'язок між процесами перетворення речовини та енергії, що має прямі наслідки для утворення промислових відходів.

Особливістю традиційного технологічного процесу є перерозподіл використаної енергії за якістю і її резервування для переробки тільки тієї частини сировини, з якої потім отримується товарний продукт (рис. 1). Але водночас, в результаті такого запозичення якісної енергії, витраченої на виробництво корисних продуктів, зростає частка ентропії  $\Delta S_0$ , що осідає в спонтанно переробленій, але «непотрібній» матеріальній частині виробництва – відходах.



**Рис. 1. Умови перерозподілу ентропії і негентропії в процесі виробництва корисних продуктів та її графічна інтерпретація**

В результаті такого запозичення якісної енергії, витраченої на виробництво корисних продуктів, зазвичай, зростає частка ентропії, що осідає в якось переробленій, але «непотрібній» матеріальній частині виробництва – відходах.

При аналізі енергетичної ентропії як нерівноважної неізольованої системи, в якій протікають як дисипативні, так і впорядковані, репаративні процеси перетворення енергії і речовини, другий закон для інтегральної ентропії можна записати у вигляді  $\Delta S_k = \sum_k \Delta S_k^\pm \geq 0$ , де  $\Delta S_k^\pm$  відноситься до тієї з  $k$ -их властивостей, які в даній системі змінюються в дисипативному ( $\Delta S_k^+ > 0$ ) або репаративному ( $\Delta S_k^\pm \leq 0$ ) напрямках.

Таблиця 1

**Принцип термодинамічної двосидності та управління ентропією в нерівноважних системах, що відносяться до технологічних процесів (тіньові області відносяться до умов термодинамічної нерівноважності)**

Параметр	Надсистема			
	i+1	i	Підсистема i-1	Підсистема i-2
<b>Вихідна енергія:</b> - від зовнішнього джерела - від внутрішнього джерела	$E_{i+1}^0$ $E^x = \Delta E_1^x + \Delta E_2^x$ —	$E_i^0 = E_{i-1}^0 + E_{i-2}^0$ $E_i^0 + E^x$ $E^y = \Delta E_1^y + \Delta E_2^y$	$E_{i-1}^0$ $E_{i-1}^0 + \Delta E_1^x$ $E_{i-1}^0 + \Delta E_1^y$	$E_{i-2}^0$ $E_{i-2}^0 + \Delta E_2^x$ $E_{i-2}^0 + \Delta E_2^y$
<b>Вихідна ентропія:</b> Перехід ентропії з підсистеми (i-2) до надсистеми (i+1) Перехід ентропії з підсистеми (i-2) до системи (i) Перехід ентропії з підсистеми (i-2) та підсистеми (i-1) до надсистеми (i+1)	$S_{i+1}^0$ $S_{i+1}^0 + \Delta S_{i-2}$ $S_{i+1}^0$ $S_{i+1}^0 + \Delta S_{i-1} + \Delta S_{i-2}$	$S_i^0$ $S_i^0 + \Delta S_{i-2}$ $S_i^0$ або $(S_i^0 + \Delta S_{i-1} + \Delta S_{i-2})$	$S_{i-1}^0$ $\frac{S_{i-1}^0 - \Delta S_{i-1}}{P}$	$S_{i-2}^0$ $\frac{S_{i-2}^0 - \Delta S_{i-2}}{P}$ $\frac{S_{i-2}^0 - \Delta S_{i-2}}{P}$ $\frac{S_{i-2}^0 - \Delta S_{i-2}}{P}$
<b>Сировина, матеріали</b> - для традиційної технології - для системи в сильній термодинамічній нерівноважності	$C_{i+1}^0$ — —	$C_i^0$ $C_i^0$	$C_{i-1}^0$ $\frac{C_{i-1}^0 C}{W_{i-1} - C_{i-1}^0} + \frac{C_{i-2}^0 C}{P_{i-2} - C_{i-2}^0}$ $\frac{W_{i-1}}{W} + \frac{C_{i-2}^0}{P}$	$C_{i-2}^0$ $\frac{C_{i-2}^0 C}{P_{i-2} - C_{i-2}^0}$ $\frac{C_{i-2}^0}{P}$

Якщо так розуміти другий закон термодинаміки, то ми можемо зробити нові висновки щодо утворення відходів у виробничих системах. Другий закон тільки в замкнутій системі відображає зниження якості енергії в потоках, і ці потоки також описують матеріальні компоненти системи, тому, в результаті реалізації технологічного процесу, здійснюваного в термодинамічно нерівноважній неізольованій системі, відбувається наступна, узагальнююча реструктуризація до якої належить певна  $i$ -та система, яка сама має дві підсистеми ( $i - 1$ ) – виробництво відходів та ( $i - 2$ ) -виробництво корисної продукції, ентропії (табл. 1).

Якщо прийняти за основу ( $i + 1$ ) – ту надсистему, до якої належить певна  $i$  –та система, то для такої надсистеми загальна кількість ентропії ( $S_{i+1}^0 + \Delta S_{i-2}$ ), збільшується. При цьому проходить процес перерозподілу ентропії між складовими компонентами виробничої системи. Це ті компоненти системи, що споживають енергією ( $E_{i-2}^0 + \Delta E_2^x$ ) на перетворення «корисної» частини сировини у продукцію, з одного боку, і енергію ( $E_{i-1}^0 + \Delta E_1^x$ ) для «непотрібної» частин матеріального потоку сировинної бази з другого. Тут  $E^0$  – базова енергія відповідних індексів підсистем;  $\Delta E_1^x$  та  $\Delta E_2^x$  – часткові долі зовнішньої енергії в двох підсистемах основної системи. Коли ми щось виробляємо, відбувається певний баланс порядку і хаосу (ентропії) в системі. Під час виробництва ми намагаємось створити більш впорядкований кінцевий продукт (тобто зменшити його ентропію або збільшити негентропію). Але згідно з законами термодинаміки, цей порядок у готовому продукті досягається за рахунок того, що інші частини виробничої системи стають більш хаотичними (їх ентропія зростає). Особливо це помітно у відходах виробництва – вони стають найбільш неупорядкованою частиною системи.

Це явище показує, що виробничі системи мають подвійну термодинамічну природу – створення порядку в одному місці (готовому продукті) неминуче призводить до виникнення безладу в іншому (відходах та інших компонентах системи) (див. рис. 1). Це ще раз підтверджує існування термодинамічної двосидності для певних виробничих систем.

Якщо в системі є така внутрішня енергія ( $E^y$ ) або вона запозичується ззовні ( $E^x$ ) з надсистеми, яка здатна перевести залишкову частину сировини по відношенню до себе в термодинамічно сильно нерівноважний стан (див. табл. 1), то можна говорити про умовну емісію частки ентропії  $\Delta S_{i-2}$  з цієї системи в надсистему, з якої ця енергія вийшла. В цьому випадку в системі з'являється робота, здатна перевести розглянуту частину сировини зі складу відходів до складу товарного продукту.

Ентропія надсистеми збільшується принаймні на емісійну величину ентропії відходів самої системи. За певних умов емісія ентропії з системи перевищує межу ентропії самої системи, і тоді в цій системі можуть спостерігатися синергетичні ефекти. Це саме той випадок, який належить принципу термодинамічної двоєдності, і який існує не супротив другого закону термодинаміки, коли в системі з'являється додаткова або існуюча, але модифікована енергія, яка може змінити стан тих компонентів, які при традиційних умовах перетворюються в відходи. У нашому випадку умовна робота, що виконується цією запозиченою енергією, буде більше, ніж в традиційному технологічному процесі, умовно на величину не збільшення ентропії в підсистемі  $(i - 1)$ , пов'язаної з утворенням відходів і її емісії в надсистему.

Модифікована або додаткова зовнішня енергія  $E^x = \Delta E_1^x + \Delta E_2^x$  у вигляді своїх частин  $\Delta E_1^x$  і  $\Delta E_2^x$  в певній пропорції витрачається на дві підсистеми –  $(i - 1)$  та  $(i - 2)$  (див. табл. 1). Можливий варіант, коли модифікація джерела енергії здійснюється за рахунок внутрішньої енергії такої системи  $E^y = \Delta E_1^y + \Delta E_2^y$  також у певній пропорції для вказаних двох підсистем.

Умовою отримання такої додаткової енергії  $E^x + E^y$  є емісія ентропії з кожної з двох підсистем шляхом «транзиту» в надсистему  $(i + 1)$  зі збільшенням її сумарної ентропії на величину  $(\Delta S_{i-1} + \Delta S_{i-2})$ . Але при цьому ентропія двох наших підсистем  $(i - 1)$  і  $(i - 2)$  сумарно зменшується, відповідно, на  $\Delta S_{i-1}$  та  $\Delta S_{i-2}$ . Та й ентропія самої  $i$ -ї системи, принаймні, не збільшується. Хоча б, в кінцевому результаті, може й зменшитися на величину  $(f(\Delta S_{i-1}) + \varphi(\Delta S_{i-2}))$ , що нас цікавлять, її втрати у вигляді ентропії такої, що  $(E^x + E^y) \rightarrow [f(\Delta S_{i-1}) + \varphi(\Delta S_{i-2})]$ , це й є додаткова робота, що здійснюється в підсистемах, що отримали сильну нерівноважність. У нашому випадку це робота щодо перетворення компонентів однієї з підсистем (наприклад, відходи – підсистема  $(i - 1)$ ) в корисні продукти.

Упорядкування енергії у структурі вироблених корисних продуктів за рахунок цілеспрямованої технології перетворення сировини, дає нам якісне поліпшення енергії в цій частині. Продукцію, що випускається, можна розглядати як підсистему, в структуру якої закладена якісна енергія даної виробничої системи.

Однак, до частини енергії, що перетворюється на відходи такі висновки застосовувати не можна. Порядок переробки сировини, особливості механічних, , хімічних, фізичних та інших процесів, що лежать в основі тієї чи іншої технології, найчастіше не сприяють використанню енергії певного типу, запозиченої ззовні, для впорядкування елементів тієї частини сировинної бази, яка стає відходами. Якість енергії, використовуваної в процесі виробництва для

перетворення цієї другої частини сировини, практично ніколи не відповідає її структурі та якості, і мало впливає на якість її перетворення. Тому, у цю матеріальну частину системи закладається максимально допустима ентропія всього технологічного процесу. Отже відмінною рисою системи, що створює відходи, може бути її термодинамічна рівноважність із максимальною ентропією (див. рис. 1).

В результаті, основною властивістю відходів різного типу є не тільки їх низька споживча привабливість, але і те, що, потрапляючи в навколишнє середовище, вони є продуктами-носіями збільшення ентропійних процесів у цьому середовищі. У той же час будь-яка виробнича система є яскравою ілюстрацією сполучених дисипативно-репаративних процесів перетворення енергії і речовини <sup>3</sup>. Ми глибоко переконані, що саме вони є основою механізмів утворення відходів.

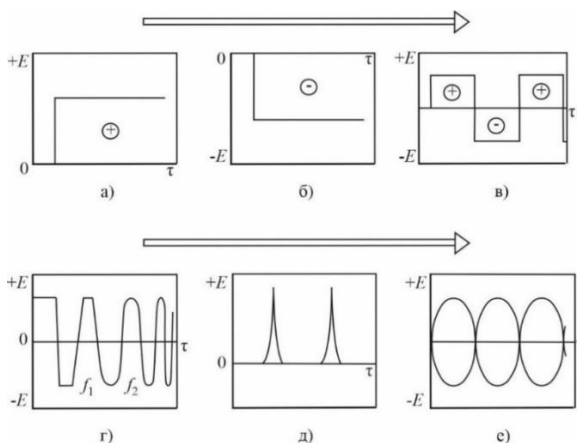
Підсумуючи, окреслимо дві особливості, які можна прийняти по принципу термодинамічної двоєдності, які впливають з другого закону термодинаміки (табл. 2). Тільки сумісна взаємодія на структуру сировини та на якість джерел енергії в технологічному процесі дозволяє досягати можливого результату, а саме, змінити особливості та якість тих компонентів сировини, що раніше потрапляли до стану відходів.

Таблиця 2

**Залежність певних ознак принципу термодинамічної двоєдності виробничої системи до другого закону термодинаміки для технічних систем.**

№.№ п/п	Признак	Другий закон термодинаміки	Відповідність у принципі двоєдності
1	Поводження енергії	Транзит енергії з відкритої системи в підсистему	Потрібність у додатковій енергії для переробки відходів
2	Поводження ентропії	Не збільшення ентропії відкритої системи та її емісія в надсистему	Видалення ентропії з системи з метою мінімізації відходів
3	Дисипативні процеси	Процеси втрати якості енергії при її витрачанні	Процеси переносу ентропії з продукції на відхід
4	Репаративні процеси	Процеси запозичення енергії та мінімізація ентропії в відкритій системі	Додаткова синергія відносно стану компонентів сировини, що відносяться до відходів
5	Дисипативно-репаративні взаємодії	Проява синергізму та максимальне використання якісної енергії в системі	Використання якісної енергії як для продукції, так і для дій щодо мінімізації відходів

<sup>3</sup> Чаленко О. Ю. Самоорганізація, ентропія в природі та економіці / О. Ю. Чаленко // Наука та інновації. Київ, 2013. Т. 9, № 4. – С. 13-24.



**Рис. 2. Пряма що характеризує розвиток даних енергетичного поля, які приймають участь у виробничому процесі**

- а) енергетичне поле постійного знаку; б) поле протилежного знаку; в) змінне енергетичне поле; г) високочастотне змінне поле; д) імпульсне енергетичне поле; е) резонансне частотне поле.

Тут з'являється нове накладене енергетичне поле, яке бере участь в виробничому процесі, що не є основним, та має ознаки різної якості:: синхронізуючий енергетичний сигнал, вторинний енергетичний вплив, енергетична модуляція сильного сигналу більш слабким, резонансний ефект і т. д., зокрема, такі, що представлені на рис. 2.

Для підвищення ефективності енергетичного впливу в виробничому процесі є способи його послідовної модифікації, а саме забезпечення полем протилежного знаку, високочастотним полем тієї ж якості, змінним у часі полем, імпульсним енергетичним полем такої ж якості, як і основне, енергетичне поле резонансного стану по відношенню до початкового, якщо ми маємо справу зі змінними полями. Кожна з цих модифікацій дає виробництву нові можливості впливати на склад вихідної сировинної бази виробничого процесу в напрямку переробки всіх її компонентів.

Але не вся нова енергія, що задіяна в виробничому процесі, дозволяє мінімізувати одержувані відходи. Відома практика модернізації мартенівських печей продувкою пічної ванни киснем і поява нового джерела теплової енергії – теплоти екзотермічних реакцій в зоні продувки, ніяк не вплинули на необхідну якісну зміну структури і складу шлаку, хоча спостерігалось зниження кількості чавуну, що подавалася в піч. Шлакова частина в печі, як і раніше, залишалась лише



засобом для підвищення якості одержуваної стали нових марок і відходами. Тобто, тут ні чого не змінилось. Більшість компонентів, що входили до складу чавуну (Si, Mn, P, S, V, Cr і ін.), підлягали більш інтенсивному окисленню і додатково збільшували кількість шлаку. Однак, при цьому, за рахунок зменшення потреб у чавуні, відходи в паралельній системі можна зменшити, якщо розглядати як таке доменне виробництво (доменний шлак). Але це непрямий результат. Те ж саме, як і зменшення втрат металу при продуванні і пиловидаленні, а також у вигляді корольків у зливному шлаку.

Було б більш раціональним використання в доменному агрегаті нового покоління такого джерела енергії, як електричний струм і умови високотемпературної електролітичної дисоціації, при спроможності розділу шлаків в нижній частині цього агрегату. Безумовно, це потребує додаткових досліджень, але таке джерело здатне, принаймні, цілеспрямовано впливати на структуру доменного шлаку в напрямку мінімізації оксидів і виносів їх з активної зони агрегату.

Ще одним прикладом є технологія розкрою листового металу<sup>4</sup>, яка дає можливість обійти відхідну обрізь за рахунок нових джерел енергії, що використовуються в технології. Але таких прикладів ще дуже обмаль, тим більше вони важливі в якості аргументації відносно мінімізації відходів у сучасних технологіях. Всі вони виглядають, як проява відомих дисипативно-репаративних процесів, в основі яких лежить емісія ентропії та скриті можливості для мінімізації відходів у певних технологічних процесах.

## **2. Утворення відходів та теоретичний мінімум відходів у виробничому процесі**

На даний час ми маємо десятки мільярдів тонн промислових відходів різної якості і небезпеки, які накоплено та цей процес продовжується. Відходи негативно впливають на природне середовища, людство звернуло увагу на необхідність позбавлення від них. Відходи треба переробляти, переробляти та використовувати повторно<sup>5</sup>. Паралельно треба задуматися про мінімізацію утворення нових промислових відходів, створення маловідходних і навіть безвідходних технологій. Однак, це завдання виявилось дуже складним, і людство відразу

---

<sup>4</sup> Бутенко Е. О., Волошин В. С. Сучасні технології очищення стічних вод промислових підприємств. V Міжнародна науково-технічна конференція «Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг» 2023, Україна, Львів. – С. 86-87.

<sup>5</sup> Волошин В. С., Бутенко Е. Ю. Відносно питання про деякі нормативні вимоги щодо питної води. V Міжнародна науково-практична конференція «Водопостачання та водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг» 2023, Україна, Львів. С. 88-90.

зіткнулося з надзвичайно високою вартістю існуючих методів мінімізації та утилізації відходів. Крім того, на кожну тону перероблених старих промислових відходів до мирової екосистеми припадає 6-8 тонн нових відходів сучасної промисловості, і тільки частка яких, але не всі, перероблюється.

Великі маси виробничих, побутових відходів не просто заповнили екосистему планети. Вони мають бути корисними для більш раціонального використання. Але внаслідок внутрішніх хімічних процесів, вони стали вторинними джерелами теплових виділень і викидів величезних кількостей парникових газів в екосистему. Атмосферні опади, проникаючи через товщу відходів, насичуються кислотними речовинами і важкими металами, отруюючи ґрунт навколо, роблячи підземні води небезпечними для сільського господарства і для питного споживання. Все це навантаження на сучасні екосистеми призводить до негативних та незворотних наслідків.

Промислові відходи – це не тільки непотрібні в технологічному процесі компоненти сировини, які не переробляються належним чином за даною технологією. Це також відпрацьовані парникові та інші гази, пил, що пов'язані з використанням вуглеводневого палива. Це забруднена і неочищена вода, яка використовується в технологічних цілях.

Все це потрапляє в екосистему, та потребує негайної переробки, утилізації, очищення. На сьогодні наука має величезний досвід в області переробки промислових та побутових відходів. Відомо велику кількість методів і засобів для очищення практично всіх видів наявних промислових відходів. Останнім часом стало очевидним, що радикальне вирішення проблеми пов'язане тільки з витратною, фінансовою стороною. Мінімізація промислових відходів вимагає приблизно таких же матеріальних затрат, як і саме виробництво.

Актуальним є існування ще однієї обмежувальної умови для мінімізації промислових (і не тільки) відходів. Процес мінімізації відходів не може бути нескінченно глибоким по відношенню до конкретного технологічного процесу. Безвідходного виробництва бути не може, в принципі і за визначенням. Другий закон термодинаміки і пов'язані з ним втрати енергії різного роду ніхто не відмінює.

Але, як з'ясувалося, не всі компоненти переробленої сировини здатні стати товарною продукцією і вони відбраковуються з виробничої системи як безповоротні відходи. І далеко не кожен промисловий відхід можна використовувати повторно, надаючи йому властивості того чи іншого продукту.

Цілком закономірною виникає питання з кількості існування певного мінімуму, нижче якого не може потрапляти обсяг відходів, що утворюються за конкретний технологічний процес. Якою може бути така мінімальна межа, від чого вона залежить і як її визначити? І наскільки об'єктивною вона буде? Такі питання можуть бути дуже корисними для реалізації будь-яких методів мінімізації утворення

відходів та послідовного збереження навколишнього середовища. Даний розділ присвячений спробі знайти таке рішення. Вище було звернено увагу на принцип термодинамічної двоєдності, коли один і той же технологічний процес по відношенню до певної частини компонентів сировини проявляється як сильно нерівноважна термодинамічна система і функціонує за законами нелінійної термодинаміки і, в той же час, по відношенню до іншої частини сировини проявляється як певною мірою нерівноважна система, або знаходиться в сталому стані термодинамічної рівноваги, і підкоряється законам лінійної термодинаміки. Це твердження повністю відповідає третьому закону енергетичної ентропії, з якого випливає, що ентропія відкритих систем може зменшуватися за рахунок споживання енергії із зовнішніх джерел і її перерозподілу між системою і зовнішнім середовищем на користь першої.

Таким чином, в межах технологічного процесу виникає умовний «термодинамічний прошарок» між станами сильного нерівноважного і слабого нерівноважного, який ближче до рівноважного, стану. Саме у цьому пограниччі, приховано розуміння теоретичного мінімуму утворення відходів у системах, де є певна сировина та енергія для його переробки. Поява або відсутність відходів в повній мірі залежить від компонентності цієї сировини.

У будь-якому виробничому процесі обов'язково перетинаються внутрішня енергія системи, технологічно використовувана для отримання готового продукту та енергія направлена до загальної маси сировини або готової продукції, з одного боку, а також додаткова специфічна енергія, що при певних умовах може увійти до цієї системи зовні.

Якщо перша енергія залежить від перетворення сировини безпосередньо у готову продукцію та відходи, то друга, при певних умовах, може змінити функціональне відношення до тієї частини сировини, яка раніше була відходом. Ця кореляція відбувається у повній відповідності до принципу термодинамічної двоєдності.

Є потреба розглянути фактори реалізації теореми про мінімум виробництва ентропії в слабонерівноважних системах<sup>6</sup>. Узагальнюючи термодинамічні сили  $X_a$  і матеріальні потоки  $J_a$  в слабонерівноважних системах, зміну локального вироблення ентропії можна записати як  $\sigma[S] = \sum_a X_a J_a$ . Причому співвідношення між силами і матеріальними потоками має бути лінійним за опосередкованістю феноменологічних коефіцієнтів  $L_{xy}$  таким чином, щоб  $J_x = \sum_y L_{xy} X_y$ . Для конкретного випадку, коли відбувається перенесення речовини ( $m$ ) і енергії ( $e$ ) в матеріальних потоках ( $J_a$ ) силами ( $X_a$ ), які їх створюють, локальне виробництво ентропії з урахуванням теореми Онзагера про взаємність, згідно з якою  $L_{me} = L_{em}$ , можна представити наступним чином:

---

<sup>6</sup> Prigogine I. Etude Thermodynamique des Phenomenes Irreversibles. Paris: Dunod 1947. – 77 p.

$$\sigma[S] = J_m X_m + J_e X_e = L_{mm} X_m^2 + 2L_{me} X_m X_e + L_{ee} X_e^2 \quad (1)$$

де перша похідна виразу (1) по  $X_m$  при незмінному значенні  $X_e$  дає

$$\frac{\partial(\sigma[S])}{\partial X_m} = 2(L_{me} X_e + L_{mm} X_m) = 2J_m = 0 \quad (2)$$

У виробництві ми часто маємо справу з потоками, які задаються лінійною функцією. Однак тільки частина сил  $X_{ei}$ , що існують в системі і відповідають за переробку  $i$ -ої частини компонентності сировини, пов'язана з сильною нерівновагою, тобто з виробництвом корисних продуктів. Інша частина сил (позначається як  $X_{ek}$ ), які пов'язані з процесами поблизу стану рівноваги, відносяться до перетворення тієї складової  $k$  матеріального потоку (такого, що  $i + k = N$  в загальній структурі  $N$ -компонентності сировини), яка відправляється у відходи. Спробуємо ввести до формули виробництва ентропії, яка є інваріантною для фізичних явищ, ваговий коефіцієнт  $\lambda = \frac{X'_{ei}}{X_{eN}}$ ,

незалежно від індексу сили. Тут  $X_{eN} = X'_{ei} + X_{ek}$ . Водночас отримуємо  $1 - \lambda = \frac{X_{ek}}{X_{eN}}$ . Тоді

$$\sigma[S] = \sum_i J_i X_i = \sum_{ik} L_{ik} X'_{ei} X_{ek} = \lambda(1 - \lambda) \sum_k L_{ik} X_i X_k. \quad (3)$$

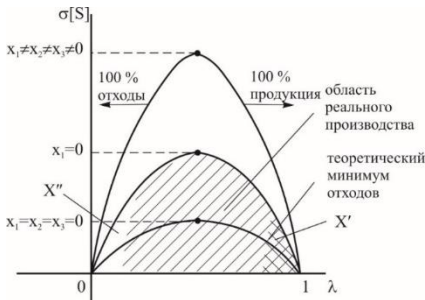
Співвідношення приросту ентропії  $\frac{\partial(\sigma[S])}{\partial x} = 0$  також, фактично повторює вираз (2). З викладеного робимо висновок про те, що якщо виробнича відходоутворююча система не має додаткових обмежень, то вона прямує до мінімуму ентропії при умовах створення механізмів відхилення системи в сторону більшої нерівноважності. При цьому інваріантність в міркуваннях про функцію  $\lambda$  залишається. Чим більш значення вагової функції  $\lambda$ , тим далі від стану рівноважності знаходиться система. І навпаки, сутність умови зростання вагової функції  $\lambda$ , в цій її частині, полягає в тому, що система має потреби в додаткових активних силах  $X'_{ei}$ , які призводили б відповідні ( $k = N - i$ ) – е компоненти сировинної бази в корисний стан.

Звідси маємо ще один висновок, який пов'язаний з мінімізацією утворення відходів у джерелі їх виникнення<sup>7</sup>. Різноманіття термодинамічних сил, що беруть участь в перетворенні матеріальних потоків всередині виробничої системи, повинно бути спрямоване не тільки на перетворення обраних компонентів в корисні продукти ( $X'_{ei}$ ). Структура цих сил ( $X'_{ei} + X''_{ei}$ ) при  $X''_{ei} \sim X''_{ek}$  повинна бути розрахована на перетворення всього спектру сировинних  $N$  – компонентів в корисні продукти.

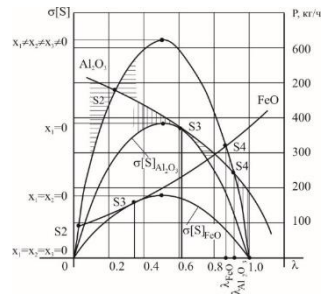
Іншими словами, має бути виконано умова  $X_{ei} = (X'_{ei} + X''_{ei}) \rightarrow X_{eN}$  або  $X_k \rightarrow 0$  при  $i \rightarrow N$ , що сприяло б переходу всієї системи в сильний нерівноважний стан з відповідними наслідками для її більш високої організації. Крива (назвемо її феноменологічною, за назвою

<sup>7</sup> Волошин В. С. Щодо питання про методологію мінімізації відходів у джерелі їх виникнення -технологічному процесі. Київ. Екологічні науки. № 2 (53). 2024. С. 114-122.

коефіцієнтів  $L_{me} = L_{em}$ ), що відображає співвідношення сил, що забезпечують виробництво корисних продуктів і відходів (рис. 1) в застосуванні до виробництва ентропії в системі, дає деяке уявлення про власну область з теоретично досяжним мінімумом втрат сировини у вигляді відходів. Цей мінімум знаходиться в безпосередній близькості від точки  $|\sigma[S]| = 0; \lambda = 1$ . При цьому інтегральна область  $\int \sigma[S] d\lambda$  залежить від розміру тензорної матриці  $\sum_{ik} L_{ik} X'_{ei} X''_{ek}$ . Чим більше цей показник, тим більше інтегральна складова феноменологічної кривої і, відповідно, тим більше розмір теоретично досяжного термодинамічного мінімуму відходів в системі. Якщо прийняти умову, при якій вільний індекс тензора  $k \leq 3$ , то при значенні  $\lambda = 0,5$  максимальна величина виробництва сумарної ентропії в системі залежить тільки від феноменологічних коефіцієнтів  $L_{ik} = L_{ki}$  і не залежить від джерела сили  $X'_{ei}$ . Тому в кінцевому результаті справедливим є співвідношення  $\sigma[S]_{\lambda=0.5} = 0,25 m_i \sum_{k=1}^3 L_k X''_{ek}$ , що дозволяє говорити про такі криві, як про «феноменологічні» і суттєво спрощує їх розрахунок. Звичайно, з трьох феноменологічних кривих ми вважаємо за краще аналізувати ту, для якої виконується умова максимальної ентропії ( $X_1 \neq X_2 \neq X_3 \neq 0$ ). Всі інші випадки, коли одне або декілька джерел сили, що сприяють розвитку дисипативних процесів дорівнюють нулю, є частковими.



**Рис. 1. Феноменологічна крива та її передбачувана область теоретично мінімального утворення відходів у виробничій системі, до якої належить крива**



**Рис. 2. Діаграма розрахунку теоретичного мінімуму пилових відходів оксидів заліза та алюмінію в виробничих системах при виплавці відповідних металів**

Ще звернемося до S-теорема Ю. Л. Клімонтовича. Сенс її полягає в тому, що при поступовому виведенні системи з умовно прийнятими нульовими параметрами управління з рівноважного стану, в разі подальшої зміни цих параметрів від нульового значення, ентропія

системи, зведена до заданого значення середньої енергії, зменшується. Це означає, що така система змінюється в бік більшої організованості. Більш правильно треба казати, що більш організована система готова давати більш систематичний результат (наприклад, виробляти більш якісну продукцію) або давати менш неорганізований результат. До таких результатів можна віднести і зниження втрат (відходів) системи<sup>8</sup>.

Для того щоб показати уніфікацію підходу, як приклад розглянемо роботу однотипних агрегатів для електродугової виплавки металів: заліза і алюмінію. Об'єднаємо відповідні графіки залежності втрат енергії ( $X''$ ) для оксидів алюмінію ( $Al_2O_3$ ) і оксидів заліза (FeO) від продуктивності відповідних плавильних агрегатів з феноменологічною кривою  $\sigma[S] = f(\lambda)$  (рис. 2). Тут перша залежність опосередкована розрахунковою функцією в координатах  $\lambda(P)$ , де в якості силового параметру системи ми беремо продуктивність системи (P, кг/год), як параметр потужності системи. Для таких графіків визначаються стаціонарні стани системи, стійкі щодо як негативних, так і відносно позитивних флуктуацій ( $S_4$ ). Ця сильно нерівноважна область з  $0,85 < \lambda_{FeO}^{(T)} < 1$  і  $0,91 < \lambda_{Al_2O_3}^{(T)} < 1$ , відповідно, може визначити умовний теоретичний рівень мінімального утворення відходів з пилу відповідних оксидів.

В залежності від співвідношення сил і потоків ( $\sum_i X_i J_i$ ) в рівнянні (1) можна отримати граничні параметричні криві  $\sigma[S]_{FeO}$  і  $\sigma[S]_{Al_2O_3}$ , наприклад, при  $X_1 = X_2 = 0$  або при  $X_1 = 0$  відповідно, для яких визначаються їх точки ( $S_3$ )<sub>FeO</sub> і ( $S_3$ )<sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>, також відповідно. В їх околицях стійкість стаціонарного стану гарантується лише відносно, наприклад, до позитивних флуктуацій. У цьому випадку ми маємо реальний рівень утворення відходів  $0,34 < \lambda_{FeO}^{(\Phi)} < 1$  і  $0,61 < \lambda_{Al_2O_3}^{(\Phi)} < 1$ , відповідно.

В перерахунку до параметру  $X'' = (1 - \lambda)X$  отримуємо, що реальний рівень утворення відходів у  $\frac{1-0,34}{1-0,85} = 4,4$  рази перевищує теоретично можливий мінімум для плавильної системи щодо пилу оксиду заліза і в  $\frac{1-0,66}{1-0,91} = 4,33$  разів перевищує мінімальний рівень утворення відходів щодо пилу оксиду алюмінію.

---

<sup>8</sup> Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review / Koen Binnemans [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2015, July. – Vol. 99. – P. 17–38.

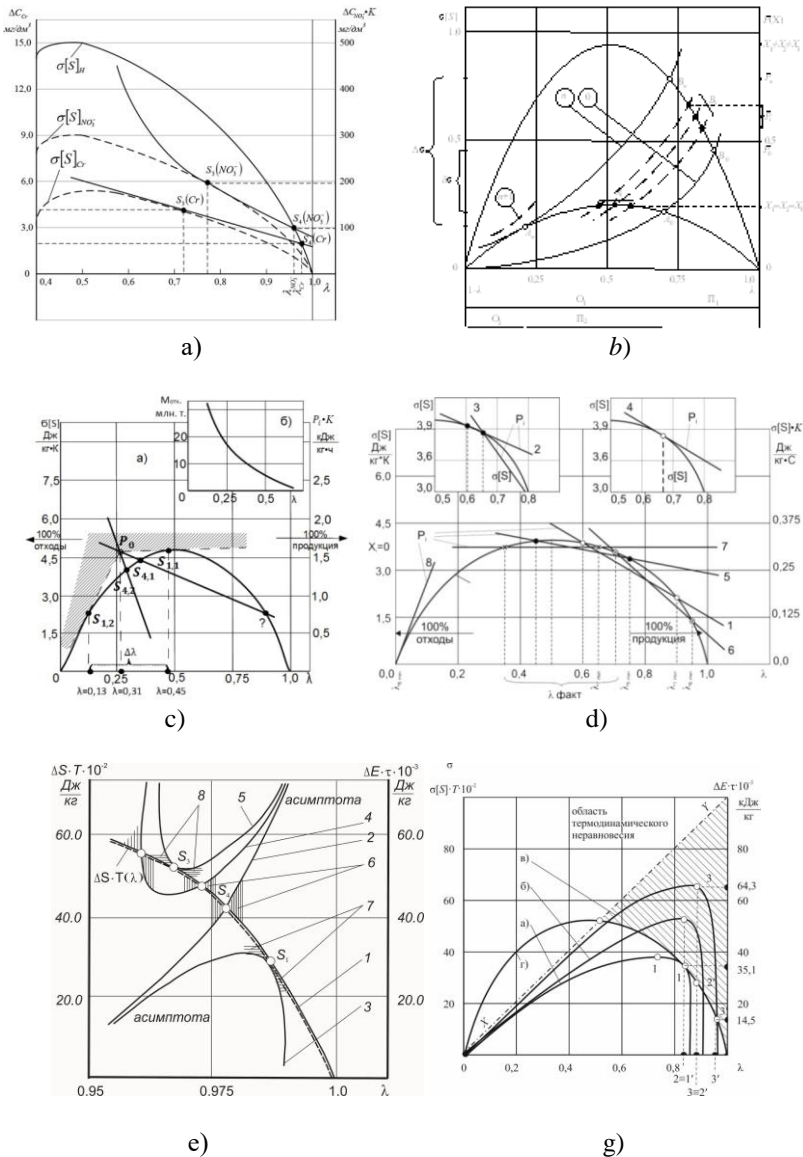


Рис. 3. Діаграми для розрахунку теоретичного мінімуму утворення відходів в наступних технологіях: *а)* – біологічна очистка; *б)* – переробка вторинних відходів; *с)* – будівництво піраміди Хуфу; *д)* – будівництво доріг у Стародавньому Римі; *е)* – очищення питної води; *г)* – метаболічні процеси

Маючи реальний рівень утворення відходів з пилу оксиду заліза в межах  $0,79 \div 1,26$  г/кг розплавленого заліза, за даними І. М. Квашніна, можна спрогнозувати його мінімальний рівень в межах  $0,179 \div 0,288$  г/кг. Для плавки алюмінію такий мінімум може знаходитися в межах  $0,06 \div 0,12$  г/кг розплаву алюмінія (див. рис. 2). Але для цього знадобляться абсолютно нові джерела енергії і деякі зміни в технологічному процесі.

Аналогічні дослідження авторів, опубліковані та обговорені раніше, проілюстровані на рис. 3. Вони дали дуже цікаві результати для оцінки різноманітних технологічних процесів з метою визначення їх теоретичного мінімуму можливих відходів, причому такі результати мали свої проєкції ще в технологіях стародавнього світу. Будь-яке очищення середовища або компонентів від домішок, забруднень можна представити у вигляді технологічного процесу з його продукцією у вигляді чистого середовища або очищених компонентів і, в той же час, відпрацьованої бази у вигляді концентрованих вихідних домішок або забруднень. У строгому сенсі невиділеного відходу в технології мембранної біологічної очистки має місце і залишковий вміст забруднень в постмембранному очищеному середовищі. Наприклад, за умовами одночасних процесів денитрифікації та хроматоредукції в системі біологічної мембранної очистки (див. 3, а) при реальному утворенні відходів до  $195 \text{ мг}/\text{дм}^3$  для нітратів і до  $4,3 \text{ мг}/\text{дм}^3$  для хроматів сильно нерівноважна область феноменологічної кривої знаходиться в межах  $0,94 < \lambda_{\text{NO}_3}^{(T)} < 1$  і  $0,98 < \lambda_{\text{Cr}(6)}^{(T)} < 1$ . Реальний рівень утворення відходів по нітратах  $\frac{(1-0,77)}{(1-0,94)} = 3,8$  рази, а по хроматам у  $\frac{(1-0,72)}{(1-0,98)} = 14$  раз перевищує умовний теоретично можливий рівень відходів в даному технологічному процесі. Цей рівень, що в розрахунковому варіанті складає  $195/3,8 = 51 \text{ мг}/\text{дм}^3$  по нітратам і  $4,3/14 = 0,3 \text{ мг}/\text{дм}^3$  хроматами. Саме така кількість дослідженої речовини теоретично може проникати скрізь мембрану в процесі очищення.

Будь-який з відомих способів вторинної переробки відходів є ще й повноцінним технологічним процесом, в результаті якого виходять і свої відходи, мінімізація яких не менш актуальна. На графіку (див. рис. 3, б) показана область точки  $A_n$ , дотичної до феноменологічної кривої, що обмежує величину наведених зусиль, що витрачаються на отримання готової продукції (в даному випадку в радіоелектронній промисловості) і пов'язані з цим відходи. Лімітована точка  $A_n$  надає нам верхню межу обмеження наведених зусиль, завдяки яким частина відходів "O"<sub>1</sub> переробляється в корисну продукцію вторинної переробки "П"<sub>2</sub> та безповоротні втрати у вигляді "O"<sub>2</sub>. У кількісному відношенні



зусилля по створенню корисних продуктів "П"<sub>2</sub> в системі переробки первинних відходів такі, що близько половину з них можна перетворити в корисні продукти, а третя частина – це безповоротні втрати.<sup>9</sup> Ціна переробки таких відходів полягає в максимальному зростанні ентропії всієї системи. Тут  $\delta\sigma$  – мінімальна зміна ентропії переходу між станами системи, для яких координатні сили  $X_1 = X_2 = X_3 = 0$  і  $X_1 \neq X_2 \neq X_3 \neq 0$ , а  $\Delta\sigma$  – максимальна зміна ентропії переходу між тими ж станами. Тоді  $(\Delta\sigma - \delta\sigma)$ , це досить велика максимально можлива амплітуда зміни ентропії, яка в кінцевому результаті відповідає величині "0"<sub>2</sub> – безповоротним втратам. Точки  $B_i$  для кожної з цих технологій відображає таке максимальне значення ентропії, яке пов'язане з переробкою первинних відходів до певного товарного стану. Це свідчить про дуже високу енергоємність таких процесів утилізації.

Особливий інтерес для вивчення процесів утворення відходів представляє досвід будівництва з античних часів, наприклад, піраміди в Єгипті, будівель, споруд і доріг в Стародавньому Римі і т. д. Область динамічної нестійкості умовного виробничого процесу створення пірамід (див. рис. 3, в) розташовуються в межах двох дотичних ліній  $(P_0S_{1,1}$  і  $P_0S_{1,2})$ . Граничні умови по відношенню  $X'/X$  знаходяться в межах  $0,13 < \lambda \leq 0,45$ . Іншими словами, при наявних на той момент технологіях загальна маса готових кам'яних блоків в тілі піраміди повинна становити не більше 45% від маси видобутого каменю, піску, абразиву. Решта має залишатися у вигляді відходів на ділянках, наближених до будівництва. За рахунковими даними кількість відходів повинна складати  $6,3 \cdot (1 - 0,45)/0,45 = 7,7$  млн тонн. З огляду на, що загальна кількість пірамід, побудованих за різними археологічними джерелами, становить близько 118 одиниць, слідів величезного скупчення промислових відходів (понад 900 млн тонн), пов'язаних з будівництвом пірамід на сьогоднішній день, не залишилося. Судячи з усього, у єгиптян були технології, що дозволяють мінімізувати величезну кількість відходів.

Шляхом порівняння феноменологічної кривої, що відповідає досягнутому термодинамічному мінімуму в координатах  $\sigma[S] = -30(\lambda - \lambda_{0,5})$  і графіках типу  $P_i = \varphi_i(\lambda)$ , що відображають енергетичні витрати при виконанні відповідних будівельних робіт в Стародавньому Римі (див. рис. 3, г), отримано можливий теоретичний мінімум утворення відходів для кожного виду будівельного матеріалу і реальне значення коефіцієнтів  $\lambda$ , які дозволяють визначити передбачувані втрати будівельного виробництва на Апеннінському півострові. Згідно

<sup>9</sup> Prigogine I., George C. The Second Law as a Selection Principle: The Microscopic Theory of Dissipative Processes in Quantum Systems// Proceeding of the National Academy of Science. 1983. Vol.80. P.4590-4595

з аналізом, відходи від будівельних робіт у Стародавньому Римі могли становити 2,5 мільйона тонн щорічно, що важливо для нащадків. При цьому близько 10 тисяч розрахункових тонн були віднесені до небезпечних відходів від плавлення свинцевого матеріалу. Всього за п'ятсот років римського панування повинно було накопичитися всього 1 мільярд тонн будівельного сміття. Але від них на Апеннінському півострові сьогодні не залишилося і сліду. Результати розрахунків за запропонованою методикою показали, що існує велика різниця між розрахунковою і фактичною кількістю відходів, отриманих від будівельних робіт в Стародавньому Римі, на користь меншої, ніж розрахункова кількість відходів, які супроводжували ці роботи. Ми стикаємося з тим ж феноменом: римляни могли створювати свої будівельні шедеври з мінімальними відходами.

Якість питної води залежить від її чистоти по відношенню до розчинених і зважених речовин, що впливають на організм людини. Очевидно, що очищення «водних забруднень» в системі, включаючи очищення води, водопідготовку, можна віднести до технологічних процесів, пов'язаних з мінімізацією утворення відходів. Розрахункові значення стійких рівноважних станів системи " $\text{H}_2\text{O}$  – сторонні включення" (див. рис. 3, е). розташовані на феноменологічній кривій 1 в області  $0,95 < (\lambda = x'_i/x_i) < 1,0$  (спряжені точки  $S_1, S_3, S_4$ , які одночасно належать до розрахункових кривих 3, 4, 5 прийнятого енергетичного параметра водного розчину в заданому діапазоні температур і феноменологічної кривої 1). Спряжені точки перетину феноменологічного графіка і криві структурної витрати енергії в зв'язку з розчиненням певної складової дають уявлення про умови фазових переходів у водних розчинах з позицій їх підпорядкованості. Очевидна асимптотична збіжність кривих структурної енергії системи " $\text{H}_2\text{O}$  – тверде тіло" і " $\text{H}_2\text{O}$  – газ" в систему " $\text{H}_2\text{O}$  – інша рідина", як рівнофазних розчинів.

В околицях точок  $S_1$  і  $S_3$ , що належать до водних розчинів твердих і газоподібних сторонніх компонентів, система має термодинамічну рівноважність, а в околицях точки  $S_4$  ("вода – вода") – відповідну термодинамічну нерівноважність. Це ще раз підтверджує, що в природі дуже складно знайти умови для термодинамічної стабільності абсолютно чистої води, а значить, і для стабільного в часі існування такої абсолютно чистої рідини. Абсолютно чиста вода («безвідходна» система) навіть при переході в стан льоду явно нестійка (крива 4) і прагне до тієї чи іншої рівноваги. Термодинамічно стабільними можуть бути тільки розчини на водній основі, тобто системи, що утворюють відходи.

Навіть людина, як досконала термодинамічна машина, що здатна створювати відходи біологічної діяльності, виявилася здатною знаходити резерви для їх оптимізації. Такі діаграми для людини можна порівняти з діаграмами для води (див. рис. 3, е). Це можливо і правильно, адже людський організм при всьому різноманітті його теплових процесів на 80% складається з води. Для задоволення зростаючих потреб людини в отриманні матеріальних благ спочатку, додатково до власної фізичної праці людини, приєднується енергія тварин, а потім з'явилися штучні технічні системи – джерела енергії зовсім іншої потужності і якості. Постійно розвиваючись і більш енергетично ефективні, такі системи були спрямовані на зміцнення тотальної влади людини в його трудовій діяльності. Найпростіші розрахунки показують (див. рис. 3, ж), що в цьому випадку ентропія системи «людина-машина» зменшується в кілька разів. Тобто ми маємо справу з більш організованою негентропною системою в порівнянні з людським організмом, яка прагне мінімізувати дисипацію.

## **ВИСНОВКИ**

1. Доведені можливості принципу термодинамічної двоєдності як прикладного механізму мінімізації промислових відходів у технологічних процесах, що досягається за рахунок перерозподілу якісної енергії системи та можливістю одночасного перерозподілу ентропії. Досягається це за рахунок забезпечення умов для емісії ентропії до надсистеми та створення зустрічних потоків якісної енергії до самого технологічного процесу.

2. Для того, щоб задовольнити вимогу мінімізації відходів у джерелі їх виникнення, виробничому процесі, необхідно змінити якісну складову використовуваної енергії, мінімізувавши ентропію самого технологічного процесу і забезпечивши її спрямованість в надсистему.

3. Дотримуючись принципу термодинамічної двоєдності, запропоновано методику оцінки теоретично обґрунтованого мінімуму для утворення відходів у виробничих системах. Це дозволяє досягати найбільш об'єктивних результатів в процесах мінімізації відходів, а також в тих, що традиційно пов'язані з поводженням з відходами.

4. Універсальність методу, незважаючи на наведені приклади, все ж потребує доведення, наприклад, для великого класу систем з використанням механічної енергії, окремих видів хімічної енергії тощо.

5. Запропонований підхід до досліджуваної теми дозволяє об'єктивно оцінити напрямок, в якому слід докладати зусиль для розуміння такого явища, як досяжний мінімум утворення відходів в сучасних технологічних та виробничих процесах та системах, як основа для прийняття будь-яких рішень в області мінімізації відходів.

## АНОТАЦІЯ

В роботі представлені ідеї щодо розвитку методології управління відходами в джерелі їх виникнення – технологічному процесі. За основу досліджень прийнято принцип термодинамічної двоєдності, який стосується співвідношення компонентної сировинної бази технологічного процесу та його енергетичних можливостей на межі термодинамічної нерівноважності. Визнаний проміжок параметрів виробничого процесу в рамках якого можливий процес узгодження джерел енергії, що потребується для технологічного процесу, з компонентністю його сировинної бази заради мінімізації відходів. Методика оцінки останнього показника дає можливість об'єктивно оцінити способи цільові модернізації в технологічному процесі. Такий підхід є основним щодо підходу визначення теоретичного мінімуму утворення відходів, що спрямовані до природного середовища з виробничого сектору. В розвиток принципу термодинамічної двоєдності надані методичні основи щодо виявлення такого показника, як теоретичний мінімум відходоутворення в технологічному процесі.

## Література

1. Prigogine, I. – "The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature". Free Press, 1997 – 228 p.
2. Волошин В. С. Відходи та їх природа. Київ-Маріуполь, 2024. – 630 с.
3. Чаленко О. Ю. Самоорганізація, ентропія в природі та економіці / О. Ю. Чаленко // *Наука та інновації*. Київ, 2013. Т. 9, № 4. – С. 13-24.
4. Бутенко Е. О., Волошин В. С. Сучасні технології очищення стічних вод промислових підприємств. V Міжнародна науково-технічна конференція «Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг» 2023, Україна, Львів. – С. 86-87.
5. Волошин В. С., Бутенко Е. Ю. Відносно питання про деякі нормативні вимоги щодо питної води. V Міжнародна науково-практична конференція «Водопостачання та водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг» 2023, Україна, Львів. С. 88-90.
6. Prigogine I. Etude Thermodynamique des Phenomenes Irreversibles. Paris: Dunon 1947. – 77 p.
7. Волошин В. С. Щодо питання про методологію мінімізації відходів у джерелі їх виникнення -технологічному процесі. Київ. *Екологічні науки*. № 2 (53). 2024. С. 114-122.
8. Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review / Koen Binnemans [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2015, July. – Vol. 99. – P. 17–38.

9. Prigogine I., George C. The Second Law as a Selection Principle: The Microscopic Theory of Dissipativ Processes in Quantum Systems// Proceeding of the National Academy of Science. 1983. Vol. 80. P. 4590-4595.

**Information about the authors:**

**Voloshin Vyacheslav Stepanovich,**

Professor at the Department of Occupational Safety and Environment,  
State Higher Education Institution  
«Pryazovskyi State Technical University»  
29, Gogolya str., Dnipro, 49000, Ukraine

**Burko Vadym Anatoliyovych,**

Associate Professor at the Department  
of Industrial Heat Power Engineering Installations and Heat Supply  
State Higher Education Institution  
«Pryazovskyi State Technical University»  
29, Gogolya str., Dnipro, 49000, Ukraine