

УДК 536.7:628.4

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2024-2-2>**В'ячеслав ВОЛОШИН**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», вул. Гоголя, 29, м. Дніпро, Україна, 49044

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-6809-6779>

SCOPUS-AUTHOR ID: 57201116674

Бібліографічний опис статті: Волошин, В. (2024). Про одну особливість принципу термодинамічної двоєдності як причини появи промислових відходів. *Фізика та освітні технології*, 2, 12–18, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2024-2-2>

ПРО ОДНУ ОСОБЛИВІСТЬ ПРИНЦИПУ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ДВОЄДИНОСТІ ЯК ПРИЧИНИ ПОЯВИ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ

Принцип термодинамічної двоєдності в прикладному сенсі дозволяє знаходити специфічні механізми мінімізації відходів у джерелі їх виникнення, в технологічному процесі, доказ чого є метою статті. В роботі розглянуто умови перерозподілу енергії та ентропії в системах з різним рівнем нерівноважності таким чином, що дозволяє збільшити цю нерівноважність відносно максимально можливої частини сировинних матеріалів. Існує методологічна аргументація, викладена І. Пригожиним, притаманна для цієї роботи, про те, що у відкритих термодинамічних системах ентропія може мати спроможність не збільшуватися у результаті енергетичних змін в цій системі, шляхом своєї емісії в надсистему, і таким чином, звільняючи поле для тієї частини енергії, що йде на здійснення корисної роботи в цій системі. Другий закон об'єктивно охоплює не тільки дисипативні, але і зворотні репаративні процеси концентрації енергії і речовини, задля виникнення і розвитку складних відкритих систем у живій і неживій природі шляхом запозичення енергії у надсистеми. Посилаючись на це зроблено спробу перенести такі закономірності на процеси відходоутворення в виробничих системах. Показана поступова взаємна залежність між термодинамічними процесами, пов'язаними з технологіями виробництва готової продукції, та їх відходами, з одного боку, і дисипативно-репаративними взаємодіями як всередині системи, так і поза неї, з другого. Показано, що для створення умов для мінімізації відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі, необхідно забезпечити перерозподіл ентропії між компонентами сировинної бази таким чином, щоб закладена в готовий продукт негентронія збільшувалась за рахунок зростання ентропії іншої матеріальної частини системи, і розповсюджувалась, в першу чергу, на ту частину сировини, якій приписуються властивості відходів. Це складає один з головних елементів наукової новизни в прикладному сенсі роботи. На прикладах надано опис процесів, для яких притаманні перерозподіли ентропії і протилежні їм процеси запозичення енергії з надсистеми в систему, що дозволяє забезпечити її синергізм відносно відходів.

Ключові слова: другий закон термодинаміки, термодинамічна двоєдність, емісія ентропії, технологічний процес.

Vyacheslav VOLOSHYN

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Labor Protection and Environmental Protection, State Higher Education Institution "Pryazovskyi State Technical University", 29 Hoholia str., Dnipro, Ukraine, 49044

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-6809-6779>

SCOPUS-AUTHOR ID: 57201116674

To cite this article: Voloshyn, V. (2024). Pro odnu osoblyvist printsipy termodinamichnoi dvoedinosti yak prichyny poyavlennia promislovykh vidchodiv [On One Peculiarity of the Principle of Thermodynamic Duality as a Cause of Industrial Waste]. *Physics and Educational Technology*, 2, 12–18, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2024-2-2>

ON ONE PECULIARITY OF THE PRINCIPLE OF THERMODYNAMIC DUALITY AS A CAUSE OF INDUSTRIAL WASTE

The principle of thermodynamic duality in the applied sense allows finding specific mechanisms for minimizing waste at the source of their origin, in the technological process, the proof of which is the purpose of the article. The paper considers

the conditions of redistribution of energy and entropy in systems with different levels of non-equilibrium in such a way that allows to increase this non-equilibrium relative to the maximum possible part of raw materials. There is a methodological argument set forth by I. Prigozhin, inherent in this work, that in open thermodynamic systems, entropy may not be able to increase as a result of energy changes in this system, by emission to the supersystem, and thus freeing up the field for that part of the energy that goes to carry out useful work in this system. The second law objectively embraces not only dissipative, but also inverse reparative processes of concentration of energy and matter; for the emergence and development of complex open systems in animate and inanimate nature by borrowing energy from supersystems. Referring to this, an attempt is made to transfer such regularities to the processes of waste generation in production systems. The gradual mutual dependence between thermodynamic processes associated with technologies for the production of finished products and their waste, on the one hand, and dissipative-reparative interactions both inside and outside the system, on the other, is shown. It is shown that in order to create conditions for minimizing waste in the source of their origin – the technological process, it is necessary to ensure the redistribution of entropy between the components of the raw material base in such a way that the negentropy embedded in the finished product increases due to the increase in the entropy of the other material part of the system, and spreads, first of all, to that part of the raw material to which the properties of waste are attributed. This is one of the main elements of scientific novelty in the applied sense of the work. Using examples, a description of the processes characterized by redistributions of entropy and the opposite processes of borrowing energy from the supersystem to the system is provided, which allows to ensure its synergy with respect to waste.

Key words: *second law of thermodynamics, thermodynamic duality, entropy emission, technological process.*

Актуальність проблеми. Очевидна взаємна залежність між термодинамічними процесами, пов'язаними з технологіями виробництва готової продукції, та отриманням відходів, з одного боку, дисипативно-репаративними взаємодіями як всередині системи, так і поза неї (в надсистемі), а з другого, може бути основою для певної кількості засобів мінімізації відходів у виробничих системах. Актуальною для інженерної екології є спроба показати цю залежність як значущу в відношенні до сировинних матеріалів для певної кількості технологічних процесів, що може означати отримання чергового підтвердження принципу термодинамічної двоєдності як основи механізму утворення відходів у виробничих системах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Принцип термодинамічної двоєдності є складовою частиною більш загального принципу термодинамічного дуалізму [1, с. 155, с. 158], 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 [2, с. 37].

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 [2, с. 396]. В результаті ми отримуємо, відповідно, готову продукцію і відходи. Такий принцип повинен повністю відповідати умовам другого закону термодинаміки, що має робити його легітимним в для будь-яких технологічних процесів. В роботі [3] запропоновано спосіб мінімізації відходів у джерелах їх походження, в технологічному процесі, що, може стати одним з актуальних методів управління відходами, може стати орієнтиром для створення технологій, що наближені до безвідходних. Доречно буде звернутися на давні роботи групи І. Р. Пригожина [4, с. 11, 5, с. 4591] та сучасні роботи [3, с. 326, 6, с. 22] про важливу, але не завжди враховану інтерпретацію другого закону термодинаміки. Вона полягає в тому, що, як закон природи, другий закон об'єктивно охоплює не тільки дисипативні, але і зворотні репаративні процеси концентрації енергії і речовини, виникнення і розвиток складних відкритих систем у живій і неживій природі, які здійснюються шляхом *запозичення енергії у надсистемі*. Підкреслюється дисипативно-репаративне сполучення енергетичних перетворень, що приводить до конструктивного результату, спрямованого на зниження ентропії системи таким чином, що $dS_v = dS_f^+ + dS_i^+ + dS_p^+ \geq 0$, де індекси «*f*», «*i*», «*p*» позначають складові ентропії відкритої системи, а саме визначають її форму, інтенсивність

і щільність, а знак (\pm) позначає вектор зміни відповідної ентропії дисипативного і репаративного напрямків відповідно [4, с. 21].

Мета дослідження. Надати аргументацію на користь використання принципу термодинамічної двоєдності, як основи для механізму виникнення відходів у технологічному процесі, а саме, за рахунок емісії ентропії та забезпечення зустрічного запозичення енергії, спроможної по іншому впливати на ту сировину, яка в рівноважному стані становляться потенційними відходами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Особливістю традиційного технологічного процесу є перерозподіл використовуваної 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 ΔS_o , що осідає в спонтанно перероблений, але «непотрібний» матеріальній частині виробництва – відходах.

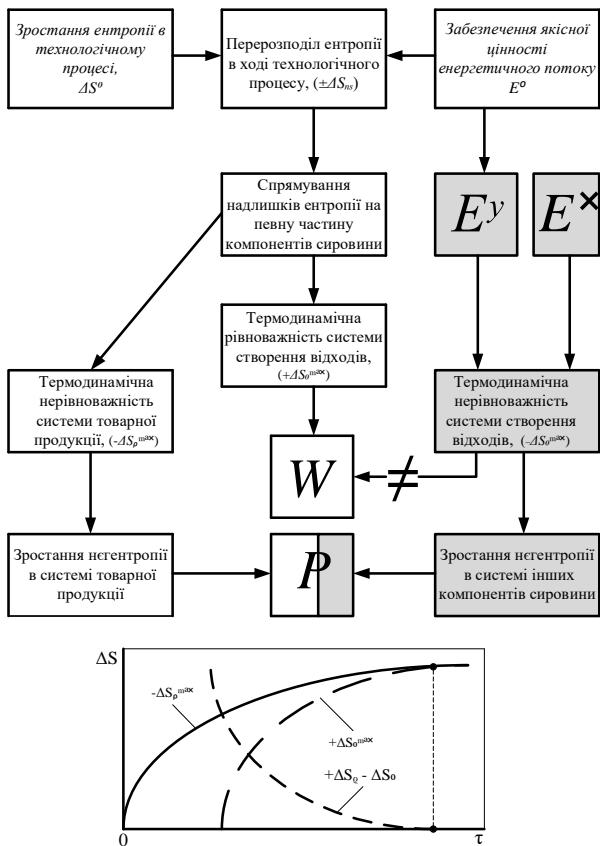


Рис. 1. Умови перерозподілу ентропії і негентропії в процесі виробництва корисних продуктів та її графічна інтерпретація

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

Якщо об'єктом аналізу енергетичної ентропії є нерівноважна неізольована система, в якій протікають як дисипативні, так і впорядковані, репаративні процеси перетворення енергії і речовини, то другий закон для інтегральної ентропії можна записати у вигляді $\Delta S_k = \sum \Delta S_k^{\pm} \geq 0$, де ΔS_k^{\pm} відноситься до тієї з k -их властивостей, які в даній системі змінюються в дисипативному ($\Delta S_k^+ > 0$) або репаративному ($\Delta S_k^+ \leq 0$) напрямках.

Таблиця 1

Принцип термодинамічної двоєдності 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
Вихідна енергія: - від зовнішнього джерела - від внутрішнього джерела	E_{i+1}^o $E^x = \Delta E_1^x + \Delta E_2^x$	$E_i^o = E_{i-1}^o + E_{i-2}^o$ $E_i^o + E^x$ $E^y = \Delta E_1^y + \Delta E_2^y$	E_{i-1}^o $E_{i-1}^o + \Delta E_1^x$ $E_{i-1}^o + \Delta E_1^y$	E_{i-2}^o $E_{i-2}^o + \Delta E_2^x$ $E_{i-2}^o + \Delta E_2^y$
Вихідна ентропія: 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}^o $S_{i+1}^o + \Delta S_{i-2}$	S_i^o $S_i^o + \Delta S_{i-2}$ S_i^o або $(S^o + \Delta S_{i-1} + \Delta S_{i-2})$	S_{i-1}^o $S_{i-1}^o + \Delta S_{i-2}$ $S_{i-1}^o - \Delta S_{i-1}$	S_{i-2}^o $S_{i-2}^o - \Delta S_{i-2}$ $S_{i-2}^o - \Delta S_{i-2}$
Сировина, матеріали - для традиційної технології - для системи в сильній термодинамічній нерівноважності	C_{i+1}^o C_i^o	C^o C_{i-1}^o C_{i-2}^o $W_{i-1} - C_{i-1}^o$ $W_{i-1} + P_{i-1}$	C_{i-1}^o C_{i-2}^o $P_{i-2} - C_{i-2}^o$ C_{i-2}^o	C_{i-2}^o P_{i-2}

Таке розуміння слідства з другого закону термодинаміки дозволяє зробити висновки, які раніше не використовувалися для опису механізмів утворення відходів у виробничих системах. А саме. Якщо говорити про те, що другий закон тільки в замкнутій системі відображає зниження якості енергії в потоках, і ці потоки також описують матеріальні компоненти

системи, то слід вважати, що в результаті реалізації технологічного процесу, здійснюваного в термодинамічно нерівноважній неізолюваній системі, відбувається наступна, вже знайома нам, 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).

А саме: якщо ми прийнемо за основу ($i+1$)-ту надсистему, до якої належить певна i -та система, то для такої надсистеми загальна кількість ентропії ($S_{i+1}^0 + \Delta S_{i-2}$), згідно з другим законом, збільшується. Водночас відбувається перерозподіл ентропії між складовими компонентами виробничої системи, а саме: між тими, 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 індексам підсистем; ΔE_1^x та ΔE_2^x – часткові долі зовнішньої енергії в двох підсистемах основної системи. Як правило, перерозподіл ентропії між компонентами матеріальної бази типової виробничої системи відбувається таким чином, що *закладена нами в готовий товарний продукт негентропія збільшується за рахунок зростання ентропії решти матеріальної частини системи, і в першу чергу, тієї, якій приписуються властивості відходів* (див. рис. 1). Це ще раз підтверджує існування термодинамічної двоєдності 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 ΔS_{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.

Додаткова або модифікована зовнішня енергія $E^x = \Delta E_1^x + \Delta E_2^x$ у вигляді своїх частин ΔE_1^x і ΔE_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 ΔS_{i-1} та ΔS_{i-2} . Та й ентропія самої i -ї системи, принаймні, не збільшується. Хоча б, в кінцевому результаті, може й зменшитися на величину ($\Delta S_{i-1} + \Delta S_{i-2}$). Різниця між підведеною енергією та функціями ($f(\Delta S_{i-1})$ і $\phi(\Delta S_{i-2})$), що нас цікавлять, її втрати у вигляді ентропії такої, що $(E^x + E^y) \rightarrow [f(\Delta S_{i-1}) + \phi(\Delta S_{i-2})]$, 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.

Якісне поліпшення енергії в цій частині має бути пов'язане в першу чергу з її впорядкуванням у структурі вироблених корисних продуктів за рахунок цілеспрямованої технології перетворення сировини. Продукцію, що випускається, можна розглядати як підсистему, в структуру якої закладена якісна енергія даної виробничої системи.

На перший погляд, такі висновки слід застосувати і до перетворення іншої частини сировини, яка потім перетворюється у відходи. Однак це не так. Порядок переробки сировини,

особливості фізичних, хімічних, механічних 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. Таким чином, у цю матеріальну частину системи закладається максимально можлива ентропія всього виробничого процесу (пов'язана з втратами як теплової енергії, так і неструктурованої речовини). Тому відмінною рисою системи, що відповідає за отримання відходів, може бути її термодинамічна рівноважність із максимальною ентропією (див. рис. 1).

Таким чином, основною властивістю відходів різного типу є не тільки їх низька споживча привабливість, але і те, що, потрапляючи в навколишнє середовище, вони є продуктами 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 [6, с. 14]. Ми глибоко переконані, що саме вони є основою механізмів утворення відходів.

Резюмуючи вищесказане, можна зупинитися на деяких ознаках, які можна прийняти стосовно принципу термодинамічної двоєдності які відповідні до другого закону термодинаміки і впливають з нього (табл. 2).

Як впливає з такого співвідношення, 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.

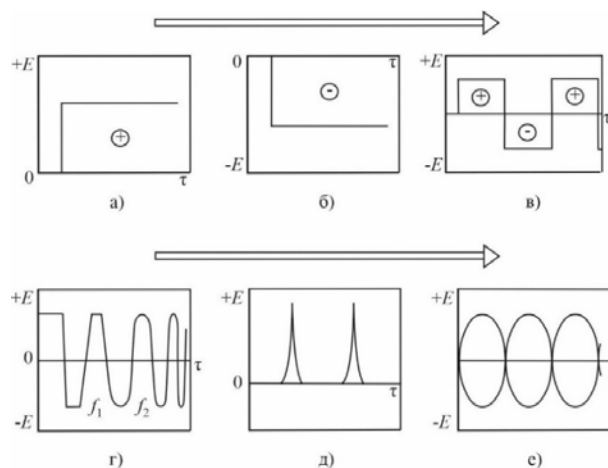


Рис. 2. Лінія розвитку характеристик енергетичного поля, що бере участь у технологічному процесі:

- 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**

В якості нового джерела енергії, крім основного, що бере участь в даному технологічному процесі, може виступати накладене енергетичне поле 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.

Таблиця 2

Відповідність деяких ознак принципу термодинамічної двоєдності виробничої системи другому закону термодинаміки для відкритих систем

№.№ з/п	Ознака	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

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

Далеко не кожна нова енергія, задіяна в технологічному процесі, дозволяє мінімізувати одержувані відходи. Наприклад, відома в металургії практика модернізації мартенівських печей в 70-х роках минулого століття продувкою пічної ванни киснем і поява нового джерела теплової енергії – теплоти екзотермічних реакцій в зоні продувки ніяк не вплинули на необхідну якісну зміну складу і структури мартенівського шлаку, хоча і сприяли зниженню кількості чавуну, що подавалася в піч. Шлакова частина в печі, як і раніше, остаються лише інструментарієм для підвищення якості одержуваної сталі нових марок і, як і раніше, відходами. Причому 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.

З таких позицій більш раціональним є приклад використання в доменному агрегаті нового покоління такого джерела енергії, як електричний струм і умови високотемпературної електrolітичної дисоціації, при спроможності для

просторого розділу шлаків в нижній частині цього агрегату [2, с. 228]. Безумовно, це потребує додаткових досліджень, але таке джерело здатне, принаймні, цілеспрямовано впливати на структуру доменного шлаку в напрямку мінімізації оксидів і виносі їх з активної зони агрегату.

Ще одним прикладом є технологія розкרוлю листового металу [7], що здатна відійти від відхідної обрізи за рахунок нових джерел енергії, що використовуються в технології. Таких прикладів ще дуже обмаль, зокрема [2, с. 342, 368, 8, с. 86], але вони тим більш 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.

Висновки та перспективи подальшого дослідження:

1. В основі принципу термодинамічної двоєдності, в прикладному сенсі до процесів отримання відходів лежить здатність системи до перерозподілу якісної енергії всередині чи зовні системи та можливість одночасного перерозподілу ентропії в межах структурованої системи.

2. Показано можливості принципу термодинамічної двоєдності як прикладного механізму мінімізації промислових відходів у технологічних процесах.

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

4. Подібна методологія в прикладному сенсі знаходить прихильників як серед фахівців з інженерної екології, так і серед інженерів-технологів, особливо, якщо це стосується нових технологічних процесів.

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. Волошин В. С. Щодо питання про методологію мінімізації відходів у джерелі їх виникнення - технологічному процесі. Київ. *Екологічні науки*. № 2 (53). 2024. С. 114–122.
4. Prigogine I. Etude Thermodynamique des Phenomenes Irreversibles. Paris: Dunon 1947. 77 p.

5. 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.

6. Чаленко О. Ю. Самоорганізація, ентропія в природі та економіці. *Наука та інновації*. Київ, 2013. Т. 9, № 4. С. 13–24.

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

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

REFERENCES:

1. Prigogine, I. (1997). *The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. Free Press.

2. Voloshyn, V. S. (2024). *Vidchody ta ih priroda [Waste and its Naturality]*. Kiev-Mariupol [in Ukrainian].

3. Voloshyn, V. S. (2024). Schodo pytannia pro metodologiu minimizatsii vidchodiv u dzhereli ich viniknennia – technologichnomu protsesi [On the Issue of the Methodology of Waste Minimization in the Source of Their Origin – the Technological Process]. *Ekologichni nauki – Environmental Sciences*. № 2 (53). S.114–122. [in Ukrainian].

4. Prigogine, I. (1947). *Etude Thermodynamique des Phenomenes Irreversibles*. Paris: «Dunon».

5. Prigogine, I., & George, C. (1983). The Second Law as a Selection Principle: The Microscopic Theory of Dissipative Processes in Quantum Systems. *Proceeding of the National Academy of Science*. Vol. 80. P. 4590–4595.

6. Chalenko, O. U. (2013). Samoorganizatsia, entropia v prirode ta ekonomicsi [Self-organization, entropy in nature and economics]. *Nauka ta innovatsii - Science and innovations*. Vol. 9, № 4. S. 13–24 [in Ukrainian].

7. Butenko, E. O., & Voloshyn, V. S. (2023). Suchasni tehnologii ochischennia stichnuh vod promislovyh pidpriemstv [Modern Technologies for Industrial Wastewater Treatment]. V *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsia «Vodopostachannia ta vodovidvedennia: proektuvannia, budivnitstvo, ekspluatatsia, monitoring» - The Five International Scientific and Practical Conference «Water Supply and Sewerage: Design, Construction, Operation, Monitoring»*. Ukraine, Lviv. S. 86–87 [in Ukrainian].

8. Voloshyn, V. S., & Butenko, E. O. (2023). Vidnosno pytannia pro deiaki normativni vimogy schodo pitnoi vody [Regarding the issue of some regulatory requirements for drinking water], Lviv. S. 88–90. V *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsia «Vodopostachannia ta vodovidvedennia: proektuvannia, budivnitstvo, ekspluatatsia, monitoring» – The Five International Scientific and Practical Conference «Water Supply and Sewerage: Design, Construction, Operation, Monitoring»*, Ukraine [in Ukrainian].