
УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ

УДК 504.05:628.4:662.997

ЩОДО ПИТАННЯ ПРО ДРУГИЙ ДОСТАТНІЙ ПОКАЗНИК У МЕТОДОЛОГІЇ МІНІМІЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ У ДжЕРЕЛІ ЇХ ВИНИКНЕННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ

Волошин В.С., Бурко В.А.

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»
вул. Дм. Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро,
vsvlshn52@gmail.com, burko_v_a@pstu.edu

В роботі надані результати досліджень, що стосуються нових відношень до методології мінімізації промислових відходів в межах самого технологічного процесу. За основу прийнятий принцип термодинамічної двоєдності, як механізм появи промислових відходів в певній низці технологічних процесів і виробничих систем. Останні дослідження показали недостатність умов подолання тільки цього принципу заради досягнення мінімізації більшої частини вихідної сировини з подальшим отриманням максимально можливих об'ємів товарної продукції у межах самого технологічного процесу. Практика показує, що метод надання в технологічний процес нового додаткового джерела енергії, за певних умов її кількості та якості, може призвести як до недосягнення потрібного результату, так і до його перебільшення шляхом введення технологічного процесу у некерований стан. Як результат досліджень для майже 200 технологічних процесів та їх модифікацій, отримані дані, які складають основу положення про те, що другою умовою мінімізації відходів усередині джерела їх виникнення – технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності, є достатність та одночасна не перебільшеність додаткової зовнішньої енергії E_w^0 заданої якості, для того щоб вивести ту частину сировини, з якої зазвичай виходить відхід зі стану термодинамічної рівноваги та перевести її у вихідний стан, принаймні, слабкої нерівноважності. Дослідження показали, що, принаймні для семи сучасних виробництв, що розглянуті, існує природний ліміт на можливості введення в технологічний процес додаткової енергії, здатної мінімізувати відходи, що створюються в цьому технологічному процесі. Встановлено чисельне значення коефіцієнта пропорційності, що стосується співвідношення додаткової та базової енергій, наданих до технологічного процесу з метою подолання принципу термодинамічної двоєдності в розмірі $k = E_w^0 / E_0 \leq 0,62$, з похибками до 7,2%. Це поки не обов'язкова величина, яка має бути відміткою для деяких з розглянутих виробництв, але вона є підставою для додаткових та цілеспрямованих експериментальних досліджень в цієї області. *Ключові слова:* промислові відходи, технологічний процес, термодинамічна двоєдність, додаткова енергія, ентропія, енергетичні обмеження.

Additional energy conditions within the principle of thermodynamic duality as a mechanism for creating industrial waste and their minimization in the technological process. Voloshyn V., Burko V.

The paper presents the results of research related to new attitudes to the methodology of minimizing industrial waste within the technological process itself. The principle of thermodynamic duality is taken as a basis as a mechanism for the appearance of industrial waste in a certain number of technological processes and production systems. Recent studies have shown the insufficiency of the condition for overcoming only this principle in order to achieve minimization of most of the raw materials with the subsequent obtaining of the maximum possible volumes of marketable products within the technological process itself. Practice shows that the method of providing a new additional source of energy to the technological process, under certain conditions of its quantity and quality, can lead both to the failure to achieve the desired result and to its exaggeration by introducing the technological process into an uncontrolled state. As a result of research for almost 200 technological processes and their modifications, data have been obtained that form the basis of the provision that the second condition for minimizing wastes inside the source of their occurrence – the technological process, in addition to the state of strong thermodynamic disequilibrium, is the sufficiency and simultaneous non-exaggeration of additional external energy E_w^0 of a given quality, in order to remove that part of the raw material from which the departure from the state of thermodynamic equilibrium usually comes out and transfer it to the initial state, at least of weak disequilibrium. Studies have shown that, for at least seven modern industries, considered, there is a natural limit on the possibility of introducing additional energy into the technological process that can minimize the waste generated in this technological process. A numerical value of the proportionality coefficient has been established, which refers to the ratio of additional and base energy provided to the technological process in order to overcome the principle of thermodynamic duality in size $k = E_w^0 / E_0 \leq 0,62$, with errors of up to 7.2%. This is not yet a mandatory value, which should be a mark for some of the industries under consideration, but it is the basis for additional and purposeful experimental research in this area. *Key words:* industrial waste, technological process, thermodynamic duality, additional energy, entropy, energy constraints.

Постановка проблеми. Потребує аргументів механізм переходу виробничої системи з додатковими джерелами енергії, спрямованими на мінімізацію відходів всередині самої системи, зі стану

стійкості та парної біфуркації і відповідного їй стану термодинамічної нерівноважності в стан біфуркаційної парної множинності і далі до хаосу. У відповідності до такої аргументації, може існувати такий

стан невизначеності системи, який стає саме тим теоретичним обмеженням технологічного процесу, що перешкоджає подоланню принципу термодинамічної подвійності, як причини появи промислових відходів.

Актуальність дослідження пов'язана із фактичним радикальним не вирішенням проблеми мінімізації як накопичених раніше, так і сучасних промислових відходів, зростання яких має майже геометричну прогресію. Існуючі засоби утилізації та переробки більшої частини таких відходів, незважаючи на широку палітру методів та технічних рішень, не в змозі справитися з їх об'ємами. Практика потребує нових, аргументованих підходів щодо цієї проблеми, одними з яких є механізми мінімізації відходів в межах самого технологічного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У дослідженнях накопичено достатній досвід, що ілюструє принцип термодинамічної двоєдності як основи механізмів утворення відходів у технологічних процесах [1, 2, 3]. Показано, що мінімізація відходів у самому джерелі їх виникнення – технологічному процесі залежить, перш за все, від стану термодинамічної нерівноважності компонентів сировини по відношенню до джерела енергії, та самої енергії, що використовується в технологічному процесі. При певних умовах, щодо використання зовнішньої базової енергії E_0 , можна передбачити, що виробнича система здатна переходити не тільки з рівноважного стану в нерівноважний, але й випробує стан невизначеності і навіть хаосу щодо мінливих енергетичних умов технологічного процесу [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Останні дослідження в галузі мінімізації промислових відходів в межах технологічного процесу, що їх створює, показує на недостатність тільки подолання умови принципу термодинамічної двоєдності, щодо різних компонентів сировинної бази. Свого дослідження чекає проблема якості та кількості додаткової енергії, що спроможна мінімізувати відхідну частину сировини в межах самого технологічного процесу.

Новизна та загальнонаукове значення. В роботі вперше показані кількісні обмеження, що мають існувати відносно додаткової енергії, яка привноситься в технологічний процес для впливу на сировинні компоненти, таким чином, щоб зберегти технологічну цілісність системи. С методичному плані це розширює межі використання метода подолання принципу термодинамічної двоєдності для мінімізації промислових відходів у більшості галузей промисловості.

Викладення основного матеріалу.

Методика дослідження. Для дослідження принципу термодинамічної двоєдності простішим за все має бути посилання на рівняння Л. Онсагера для обчислення зміни ентропії в слабо нерівноваж-

них системах. Для наших цілей рівняння має вигляд $\Delta S / E_0 = r\lambda(1 - \lambda)$, де: $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$ певний погоджувальний до феноменологічного, коефіцієнт, що визначає співвідношення термодинамічних сил, що беруть участь у виробництві товарної продукції X_0 і в появленні відхода X_w [5]; $r = (J_0 X_0 + J_w X_w^0) / E_0$ – термодинамічний показник, що відображає співвідношення сумарній роботі по перетворенню всієї сировини $((J_0 + J_w) \cdot$ в товарну продукцію, наведеної до базового значення енергії E_0 .

Методика досліджень включала виявлення значень коефіцієнтів r у послідовності технологій, що визначаються величиною ΔS_{max} и $\lambda \approx 0,5$ на феноменологічних кривих Л. Онсагера. Ці точки зазначені в координатах « $\Delta S / E_0 = f(\lambda)$ » для технологічних процесів, що підлягали аналізу, наприклад, як показано в [5], у галузях гірничодобувної, металургійної, машинобудівної, енергетичної промисловості та інших виробництвах. Усього досліджено 90 технологічних процесів та 103 їх модифікації, включаючи експериментальні технології. Вихідними даними для кожного з розглянутих технологічних процесів є статистична звітність підприємств, а також результати літературних досліджень в різних галузях.

Складнощі з приведенням різних технологічних процесів до однакових показників, а також з уніфікацією вихідних даних, згідно зі статистичними звітностями на різних підприємствах, не могли не позначитися на точності одержуваних результатів. Тому в подальших аналізах ми схильні більше зосереджуватися на кількісно-оцінковій, ніж на чисто кількісній стороні результатів. Принаймні там, де статистичні похибки виходять за межі логіки. Статистична обробка результатів дослідження виконана за допомогою *програмного пакету Statistica 6.0. (StatSoft, Inc., США)*.

Враховуючи неоднозначність та розрізненість однойменних показників в незалежних вибірках показників для різних виробничих систем, достовірність в умовах відсутності нормального розподілу оцінювалась за допомогою непараметричного U – критерія Манна-Уїтні [6] у вигляді єдиної вибірки для порівнюваних залежностей $U_1 = R_1 - 0,5n_1(1 + n_1) \leftrightarrow U_2 = R_2 - 0,5n_2(1 + n_2)$, таким чином, що тільки $U_{1,2} = \min$ показує на їх непорівнянність. Тут: $R_{1,2}$ – сума рангів для відповідної вибірки; $n_{1,2}$ – розмір кожної з вибірок.

Підсумки дослідження залежності типу $\frac{\Delta S}{E_0} = f(r)$ я різних технологій систематизовані по даним роботи авторів [7] та представлені на рис. 1 у вигляді окремих точок початкових значень зміни ентропії (у вигляді відповідних U -критерію Манна-Уїтні і середньоквадратичної похибки $\pm \sigma_{\Delta S}$ її математичного очікування $M_{\Delta S}$). З урахуванням похибок, отриманих при обробці експериментальних даних (в залежності від потужності, типу технічної сис-

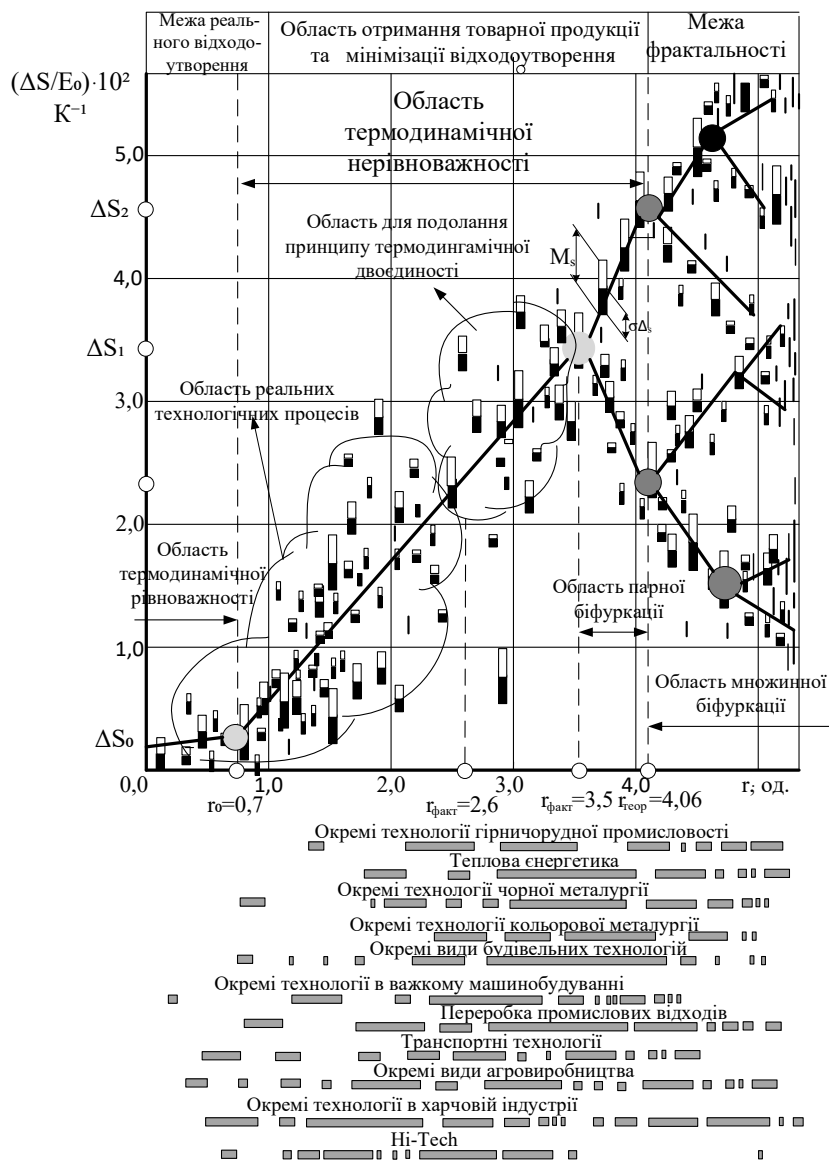


Рис. 1. Розрахункові дані для оцінки межі термодинамічної нерівноважності та хаосу для різних технологічних процесів. (Окремо виділена область для реальних технологічних процесів та область гіпотетичних розрахункових даних)

теми, її продуктивності, якості сировини і кількості кінцевих відходів виробництва), цифри на графіку в області подвоєння результатів можуть бути приблизно порівнянні з закономірностями, викладеними в роботі [8].

У переважній більшості технологій, які підлягали аналізу, присутня базова або модифікована *теплова* енергія, з дуже малою тепловою ефективністю і високою ентропією процесу. Не більш як у 14% досліджуваних технологічних процесах використовується *електрична* енергія, але тільки 5% з них, це чисто електричні та електролітичні процеси, а решта – їх електротермічні модифікації, ККД яких також вкрай низький при високих значеннях ентропії. Трохи більше 15% від загальної вибірки технологічних процесів пов'язані з використанням інших

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

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

1. За умовою, коли $r \leq 3,5$ цікаві розрахунки де $J_w X_w^0 \sim 0,62 E_0$. Для такого співвідношення певної роботи з кількістю додаткової енергії має статися реальний вплив термодинамічних сил X_w^0 , що реалізуються в сильно нерівноважній системі, до перетворення матеріального потоку J_w у напрямку його суттєво інших якостей наприклад, споживчої цінності. Підкреслимо гіпотетичний характер цієї залежності.

2. В той же час, при первинній недостатності додаткової зовнішньої енергії, за умовою $J_w \cdot X_w^0 < 0,62 E_0$ відбувається перехід системи до періодичної поведінки щодо параметра r .

Зокрема, при дотриманні умови термодинамічної нерівноважності в системі, наприклад, при $r > 3,5$ коли існують розрахункові $J_w \cdot X_w^0 \leq 0,56 E_0$, вона може стати об'єктом парної біфуркації, тобто первинної невизначеності, а при $r \approx 4,06$ – виявляти ознаки вже множинності парних біфуркацій і навіть хаотичного стану, тобто сильної невизначеності, яка ставить під сумнів можливість енергетичного впливу як на J_w , так і на J_0 . У такому разі біфуркаційне множення періодів робить виробничу систему з додатковою, але недостатньою, зовнішньою енергією E_w енергетично некерованою в найближчому діапазоні зміни термодинамічного параметра r .

З викладеного слідує висновок у тому, що умовою мінімізації відходів усередині джерела їх виникнення – технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності [3], є *достатність* та одночасна *не перебільшеність* додаткової зовнішньої енергії E_w заданої якості, для того щоб вивести ту частину сировини, з якої

зазвичай виходить відхід зі стану термодинамічної рівноваги та перевести її у вихідний стан слабкої нерівноважності.

Виявлення чисельного значення коефіцієнта пропорційності між базовою та додатковою (модифікованою) енергіями (k). Зіставимо вказані вище дослідження з прикладними результатами для існуючих технологій у галузі одного з найбільш забруднюючих виробництв – металургійного. Наука та практика накопичила достатній досвід у технологіях виробництва сталі, одного з найтехнологічніших матеріалів сучасності. Всього в історії сталеплавильного виробництва було створено кілька десятків технологічних процесів [9, 10]. Основні з таких (табл. 1), що знайшли практичне застосування, прийняті до уваги у цих дослідженнях (рис. 2), що виконані за методикою, визначеною вище.

Кожен з цих технологічних процесів пов'язаний з джерелами енергії різної потужності і якості, кожен має свій певний асортимент відходів. І одно з головних завдань, яке в них вирішується, полягає в отриманні максимальної кількості якісної товарної продукції. А ми потребуємо водночас ще й ретельно мінімізувати відходи в самому технологічному про-

Таблиця 1

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

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

цесі. Про це вимагає, як мінімум, динаміка втрат від утворення відходів за кожною технологією в міру її енергетичного насичення і коливання специфіки сировини. Причому кількість відходів, що виносяться на одиницю одержуваного товарного продукту, в залежності від кількості і якості базової зовнішньої енергії E_0 , специфіки самого технологічного процесу (умов фізико-хімічних реакцій) дає умовну лінію зміни наведеної ентропії $\Delta S/E_0$ в залежності від заданих значень термодинамічних коефіцієнтів r і λ і поведінки самої системи (див. рис. 2). а саме, від співвідношення E_w/E_0 .

По-перше, відмітимо, що зсув w вправо від стандартного значення кожної величини в цих відносностях складає, наприклад, $7,3:4,5=1,62$ частки від сумарної енергії, що технологічний процес спроможний поглинути, без перекидання в хаотичний стан. Або $4,79:2,95=1,62$ – частки від зміни ентропії системи приведеної до базової енергії системи, що вказує на незмінність внутрішньої енергії особисто технологічного процесу в межах такої енергетичної інтервенції. З цього виходить існування класичного співвідношення

$$E_0 + E_w \rightarrow 1,62E_0 \text{ або } E_w \sim kE_0, \text{ де } k=0,62,$$

кількісне значення якого дійсне, принаймні, для металургійних технологій.

Два показника, що впливають на мінімізацію відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі, це термодинамічна нерівноважність, як залежність від запропонованого термодинамічного показника r , і енергетична насиченість технологічного процесу, що забезпечує переробку не тільки основного потоку сировини J_0 в корисні продукти, але і тієї частини сировини J_w , яка в звичайній системі відправляється у відходи, тобто залежність від коефіцієнта λ . Для цього на графіках (див. рис. 2) показана крива зміни ентропії, що приведена до

базової енергії системи E_0 . Її аналіз дає уявлення про існування (чи ні) суттєвого резерву для мінімізації відходів у таких технологічних процесах, наближаючи їх до теоретично обґрунтованого рівня.

Наприклад, додаткова енергія ΔE_w для відходуутворюючого мартенівського процесу (точка «а») зі співвідношенням параметрів r_a в межах $5,5:1,8=3,05 \gg 1,62$ у порівнянні з класичною технологією, виводячи його умовну сумісну роботу $(J_0 X_0 + J_w X_w^0)$ за межі спроможності самого технологічного процесу $(E_0 + E_w) \gg 1,62$ від базової енергії, чим здатна привести систему в явно не стійкий і, навіть, хаотичний стан, в якому немає бути специфічної термодинамічної нерівноважності. І, водночас, технології прямого відновлення заліза та електродугового переплаву (див. точки «b» і «с» відповідно) дають співвідношення параметрів r_B $(3,14:1,9=1,65)$ та r_C $(2,5:1,56=1,60)$, відповідно, тобто вказують на досяжність стійкості системи та стану термодинамічної нерівноважності в таких технологіях при підведенні до них енергії іншої якості з розрахунку $E_w \sim 0,62E_0$. У другому та третьому випадках системи не переходять в стан множинних біфуркації і подальшого хаосу, який перешкоджає якісному впливу на потенційну відходуутворюючу сировину (див. рис. 2).

Аналогічні викладки зробимо для низки інших технологічних процесів, для яких мають бути в доступі певні статистичні матеріали (табл. 2). Їх результати мають бути підтвердженням тому, що в традиційному технологічному процесі існують приховані резерви для того, щоб процес був термодинамічно спрямований не тільки на отримання товарної продукції, але й на дії, щодо мінімізації відходів, які є невід’ємною частиною як сировинної бази так і енергетики цього процесу, шляхом цілеспрямованої їх переробки на користь того, хто цей процес упорядкував.

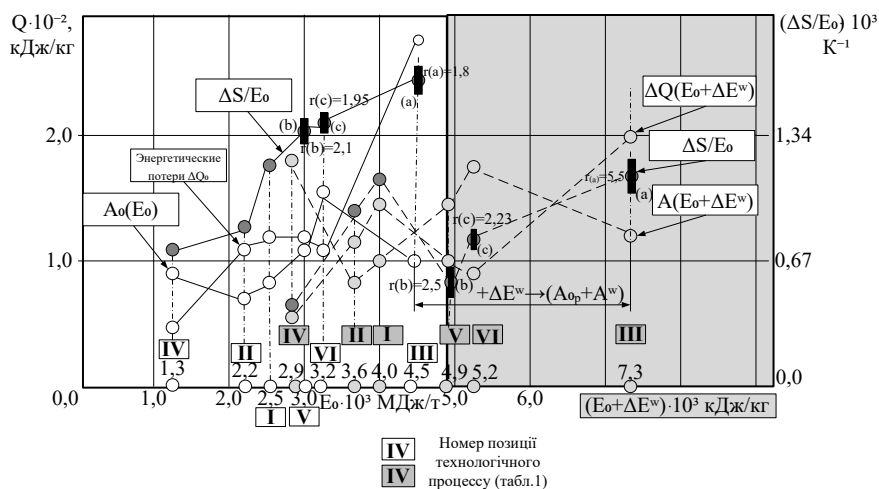


Рис. 2. Енергоентропійні залежності для визначення області термодинамічної нерівноважності як показника досяжності мінімального утворення відходів у технологіях виробництва сталі

Таблиця 2

Деякі статистичні дані, що вірують до оцінки енергетичних додатків у технологічному процесі, що забезпечують досягнення теоретично допустимого мінімуму утворення відходів

Назва технологічного процесу	Значення енергії в системі, кДж/кг сировини		Розрахункове значення коефіцієнта r на межі стійкості системи	Зсув вправо у значеннях певної енергії в системі, k	Похибка у розрахунку значення k $\delta = \frac{1}{k_0} \sum \Delta k_i$
	Базова*, E_0	Додаткова (модифікована)* $E_w (E_0^w)$			
Виробництво Хліба	2000 ÷ 2300	1210 ÷ 1350	0,94 ÷ 1,12	0,60 ÷ 0,63	0,048
Виробництво цементу	2940 ÷ 3250	1700 ÷ 2000	0,98 ÷ 2,11	0,58 ÷ 0,615	0,072
Легування металів	1360 ÷ 1450	850 ÷ 900	1,52 ÷ 1,77	0,629 ÷ 0,642	0,051
Вилугування міді	810 ÷ 1910	510 ÷ 1240	0,88 ÷ 3,6	0,629 ÷ 0,649	0,061
Технологія сироваріння	430 ÷ 650	275 ÷ 390	0,52 ÷ 0,90	0,60 ÷ 0,639	0,062
Штампувальні технології	1440 ÷ 1950	900 ÷ 1200	1,77 ÷ 2,21	0,625 ÷ 0,615	0,016
Плавлення скла	4200 ÷ 4500	2550 ÷ 2800	1,32 ÷ 1,41	0,607 ÷ 0,622	0,024

* – зовнішня енергія для поточного технологічного процесу може змінюватися з урахуванням специфіки на різних підприємствах.

Якщо враховувати похибки, що мали місце в результаті збору статистичної звітності по різних технологіям з доступних джерел, то відхилення в 1,6 ÷ 7,2 % від середнього значення величини $k_0 = 0,62$ можна визначити, як допустиме для того, щоб встановити опосередковане значення цієї величини.

Співвідношення потрібної додаткової та базової енергії в системі у розмірі $\sim 0,62$, як збіг обставин, дуже близьке до так званого «Золотого перетину» – 0,618, відомого, як основа краси та гармонії в багатьох природних та антропогенних явищах. Залишимо цей факт як цікаве, але недоказане співпадіння [11]. Але, принаймні, розрахункові значення вищенаведеного коефіцієнта, близького до числа 0,618, як умова мінімізації утворення відходів у джерелі утворення відходів – технологічному процесі, можуть свідчити про наближення до ідеального кінцевого технологічного процесу і потребують додаткових досліджень. Існування числа $k \approx 0,62$ в технологічних процесах безумовно не означає відповідності таких систем до області широко відомого числа Фібоначчі. Тим не менш, це може означати лише те, що будь-яка виробнича система в якій певним чином синхронізовані матеріальні (початково, природні) та енергетичні потоки таким чином, що між ними виконується термодинамічне узгодження, є системою, яка максимально

наближена до самоорганізації, та здібна до оптимізації певних параметрів, зокрема, сировини, що отримана з Природи, та відходу, що відторгнується людиною назад до Природи.

Подібний аналіз легко здійснити і для інших технологічних процесів, вказавши конкретні енергетичні параметри з подальшим розрахунком наведеної ентропії та визначення термодинамічного коефіцієнта, заради співвідношення $k = E_w / E_0$. Результати можуть знайти застосування при прогнозуванні розвитку, сучасних технологій, а також як подальше дослідження.

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження.

1. Другою умовою мінімізації відходів в межах джерела їх виникнення – технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності, є достатність додаткової зовнішньої енергії E_w заданої якості, яка здатна впливати на ту частину сировини, яка в поточних умовах створює відхід.

2. Встановлено чисельне значення коефіцієнта пропорційності, що стосується співвідношення додаткової та базової енергії, наданих до технологічного процесу в деяких промислових галузях, з метою подолання принципу термодинамічної двоєдності в розмірі $k = E_w / E_0 \leq 0,62$, з похибками до 7,2%. Для інших технологічних процесів такі значення потребують додаткових досліджень.

Література

1. Волошин В. С., Данилова Т. Г., Мнацаканян М. Г. Принцип мінімізації відходів у джерелі походження як новий підхід до сучасних технологічних устроїв. Вісник Кременчугського національного університету ім. М. Остроградського. Кременчук, 2023. Вип. 4(141). С. 42-48.
2. Волошин В. С., Слістратова Н. Ю. Термодинаміка утворення відходів та стратегія розвитку сучасних енергетичних технологій. V Міжнародн. науково-практичної конференції «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації», Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України Академперіодика, Київ, 2023. С. 139 – 142.
3. Волошин В. С. Щодо питання про методологію мінімізації відходів у джерелі їх виникнення -технологічному процесі. Екологічні науки. № 2 (53). 2024. С. 114-122.
4. Волошин В. С. Властивості суміжного хаосу для виробничих відходоутворюючих систем. Вісник ПДТУ Технічні науки. 2021. Вип. 43 С. 74-80.
5. Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. Київ-Маріуполь, СПД Самченко, 2024. 80.с.
6. Mann, H. B., Whitney, D. R. (). On a Test of Whether One of Two Random Variables Is Stochastically Larger Than the Other. *Annals of Mathematical Statistics*, № 18(1), 1947. P. 50–60.
7. Волошин В. С., Бурко В. А. Щодо питання про досяжність теоретичного мінімуму утворення відходів як фізичного явища в технологічних процесах. Математика, інформатика, фізика: наука та освіта. Т. 2, № 1 2025. С. 156-171.
8. May, R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261(5560), P. 459-467.
9. World Steel in Figures 2023. World Steel Association. Brussels. 2023. 36 p.
10. The Global Steel Industry in Figures. OECD Publishing. Paris. 2022. – 72 p.
11. Волошин В. С. Чи варто шукати «золоті пропорції» Фібоначчі у процесах утворення відходів. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки, 36. наук. праць. Вип. 44. Дніпро, 2022. С. 43-53.

Дата першого надходження рукопису до видання: 09.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: