

УДК 614.74:519.8:658.5

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336391

ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНОЇ ТЕОРІЇ УПРАВЛІННЯ МАТЕРІАЛЬНИМИ РЕСУРСАМИ ДЛЯ ОЦІНКИ УМОВ МІНІМІЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ У ДЖЕРЕЛІ ЇХ ВИНИКНЕННЯ – УЗАГАЛЬНЕНОМУ ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ

Волошин В.С.

д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: yvslshn52@gmail.com;

Бурко В.А.

канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>, e-mail: burko_v_a@pstu.edu

У статті зроблена спроба встановити реальні межі можливостей узагальненого технологічного процесу щодо засвоєння умов подолання стану термодинамічної двоєдності, як причини появи відходів у самому технологічному процесі. Запропонована методика оцінки термодинамічного стану узагальненого технологічного процесу за термодинамічними показниками дала змогу оцінити параметричні межі подолання стану термодинамічної двоєдності та забезпечення стійкої термодинамічної нерівноважності і незворотності в механізмах мінімізації відходів в рамках технологічного процесу. Встановлено параметричну залежність між основними термодинамічними показниками, що характеризують здатність узагальненого технологічного процесу поглинати додаткову енергію для переробки потенційних відходів в товарну продукцію, не порушуючи при цьому стабільності всього узагальненого технологічного процесу. Показано, що умовою подолання принципу термодинамічної двоєдності, як основи виникнення відходів узагальненому технологічному процесі, у напрямку їх мінімізації в самому технологічному процесі, є стан термодинамічної нерівноваженості для всіх компонентів матеріального кластера системи на межі її хаосу. Встановлено, що для будь-якого технологічного процесу на феноменологічній кривій у нижній межі нерівноваженості завжди існує робоча термодинамічна точка А, яка визначає здатність того чи іншого технологічного процесу до цілеспрямованої зміни структури всього сировинного кластеру, без порушення термодинамічної стабільності всієї системи. Показано, що відношення $E_w = 0,62E_0$ є не тільки граничною умовою фрактального хаосу в узагальненому технологічному процесі, а й умовою його стабільності, як об'єкта фрактально-кластерної моделі на межі хаосу. При цьому термодинамічний коефіцієнт r , що відображає відношення сумарної роботи по перетворенню всіх сировинних матеріалів в товарну продукцію до базового значення енергії в стаціонарному стані, не повинен перевищувати значення 0,35 для узагальненого технологічного процесу.

Ключові слова: промислові відходи, управління відходами, математичні методи, термодинамічна нерівноваженість, фрактали, кластери, узагальнений технологічний процес.

Постановка проблеми

Фрактально-кластерний підхід дозволяє розглядати сукупне виробництво різноманітної товарної продукції і супутних до них відходів як сукупну самоподібну, геометрично описану систему, здатну розташовуватися на межі фрактальності, коли послідовна термодинамічна нерівноваженість в системах здатна переходити в біфуркаційні відносини і навіть, при деяких умовах, в хаотичний стан. Розглянемо ці дослідження в тій частині, в якій вони відносяться до доказів сталого управління структурами матеріальних потоків, а саме можливостей до мінімізації відходів у самому технологічному процесі.

У той же час, той факт, що виробничі системи в своїй цілісності здатні розташовуватися на порозі фрактальності, вимагає методологічної обережності в таких підходах. У зв'язку з цим для нас важливим є обґрунтування такої ознаки, як проява самоподібності в певних параметрах узагальненого технологічного процесу, який здатний перебувати на межі хаосу в силу своєї кластерної структури і властивостей фрактальних систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Неважко уявити певну сукупну систему виробництва в вигляді різноманітних технологічних процесів, в основі кожного з яких лежать матеріальні та енергетичні потоки, відомості про порядок їх взаємодії, умови стійкості, рівноважності і незворотності, в яких здійснюється виробництво товарної продукції (p) і утворення нових відходів (w) [1]. У такому уніфікованому стані будь-який технологічний процес може мати ознаки геометричного характеру самоподібності, наприклад, у вигляді графобудівних моделей [2], коли один і той же механізм діє в різних технологіях: від отримання сировини і напівфабрикатів до отримання товарної продукції в її різноманітності. Ті ж закономірності, за допомогою яких формується товарна продукція, є основою для отримання відходів [3]. Такі особливості повторюються як в цілому, для сукупної системи виробництва, так і для кожного технологічного процесу окремо. Однакові вихідні умови будь-якого технологічного процесу (енергія, потоки сировини, інформація про правила їх взаємодії, власне взаємодія сировини і енергії, і як наслідок – готова продукція та відходи), причинно-наслідкові зв'язки в такому переліку технологій роблять їх розвиток совоподібним

явищем як в ретроспективі, так і в перспективі. Це дає можливість вивчати такий узагальнений технологічний процес з позицій взаємодії енергетичних і матеріальних потоків, умов їх термодинаміки.

З точки зору своєї геометричної інтерпретації, сукупна виробнича система дозволяє використовувати для її аналізу метод фрактально-кластерного моделювання, викладений в роботах [4-6], де пропонуються математичні моделі для опису структури матеріальних потоків, характерних для ряду штучних систем [5], в тому числі і для отримання товарної продукції [6].

Мета статті

Встановити параметричні межі та умови подолання стану термодинамічної двоєдності та забезпечення стійкої термодинамічної невідновності і незворотності в механізмах мінімізації відходів у межах технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу

Беручи до уваги різноманіття існуючих технологічних процесів отримання товарної продукції, нескінченне число фізичних, хімічних, механічних та інших явищ, що лежать в їх основі, приймемо поняття Узагальненого Технологічного Процесу (УТП),

спрямованого на отримання певної сукупної продукції і утворення відходів, у вигляді об'єкта управління типу «чорний ящик» і його графопобудівну моделі (рис. 1). На вході такої моделі ми бачимо кластероподібні матеріальні потоки сировини та енергії, а на виході – трансформовані матеріальні потоки у вигляді готової продукції (p) та відходів (w). У такому об'єкті не врахована інформація про порядок реалізації УТП та його внутрішні механізми і закономірності.

Така задача є близькою до проблеми взаємодії зовнішньої енергії певної якості з наперед визначеними структурами сировини [2]. Останні нескладно представити у вигляді декількох уніфікованих кластерів ресурсного характеру виробничої системи, наприклад:

- компоненти сировинної бази J_n з ваговою функцією C_n ;
- компоненти продукційної бази J_p з ваговою функцією C_p ;
- компоненти бази відходів J_w з ваговою функцією C_w ;
- перехідні компоненти J_{-w} з ваговою функцією C_{-w} ;
- компоненти додаткової товарної продукції J_{pw} , що отримується з відходоутворюючої частини сировини.

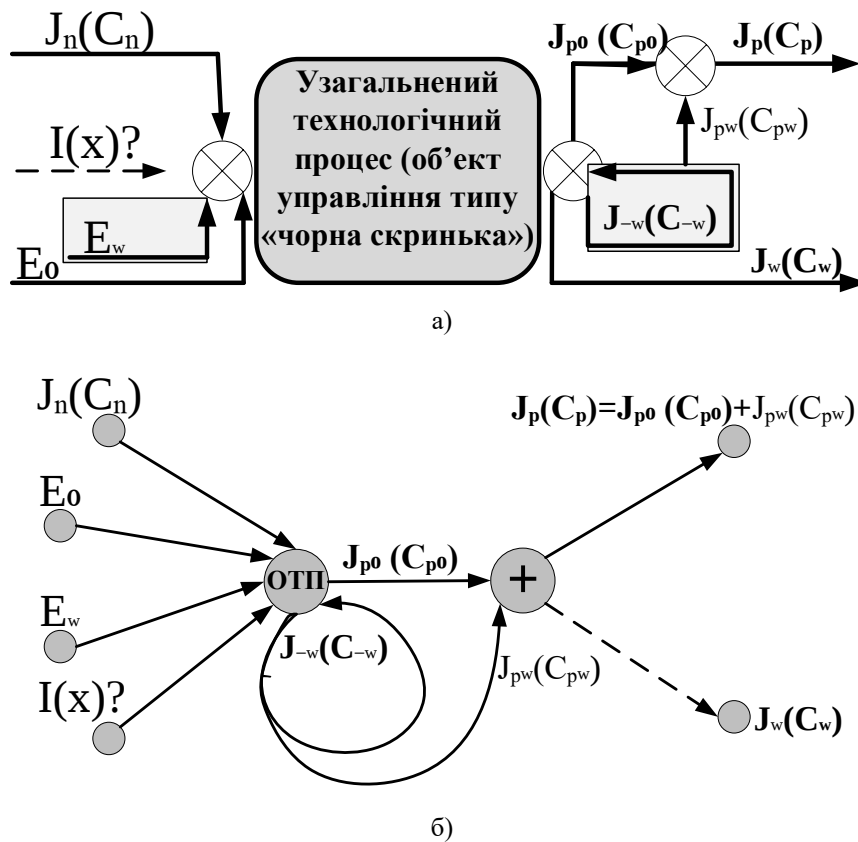


Рис. 1 – Схема (а) узагальненого технологічного процесу (УТП) і його графопобудівна моделі (б) в системі управління типу «чорний ящик» (затінені ділянки вказують на механізми подолання принципу термодинамічної двоєдності в УТП)

Ці матеріальні потоки можуть відрізнятися лише по відношенню до енергії самого УТП, який, в свою чергу, утворює цілком впізнавані кластери енергетичного характеру E_m , ($m = 0, p, w$), а саме:

- базові види енергії для технологічного процесу $E_p \sim E_0$, призначені для переробки компонентів J_p в товарну продукцію;

- модифіковані або додаткові види енергії, в заданих якісних і аргументованих пропорціях $E_w \approx 0,62E_0$, призначені для переробки компонентів сировини J_w

Залежність для змінної ентропії системи, близької до стану термодинамічної рівноваги, від величини феноменологічного коефіцієнта λ в загальному випадку представлена на рис. 2, де можна відзначити області, пов'язані з різноманітним пропорцій між товароутворюючими $J_p = \text{const}$ і відходоутворюючими $J_w = \text{const}$ матеріальними потоками, і, як результат, – з теоретично безвідходним виробництвом [3]. В тому числі, в залежності від термодинамічного показника $r = \frac{(J_p X_p + J_w X_w)}{E_0}$, який відображає співвідношення сумарної роботи по перетворенню всього сировинного кластера ($J_p + J_w$) до базового рівня зовнішньої енергії E_0 . До цієї залежності як до показника мінімізації промислових відходів ми звернемося в заключній частині нашої роботи з метою встановлення параметричної залежності між основними термодинамічними показниками, що характеризують здатність УТП до сприйняття додаткової енергії для переробки потенційних

відходів J_w в товарну продукцію, не порушуючи при цьому стійкості всього УТП.

У випадку з УТП, що ми розглядаємо, кластерів може бути два: перший відображає два енергетичні потоки E_0 і E_w , а другий являє собою систематизовані матеріальні потоки J , що відносяться послідовно до J_n ; J_p ; J_w ; J_{-w} ; J_{pw} (їх п'ять).

Узагальнений ваговий коефіцієнт всіх ресурсів, що входять у виробничу систему, структуровану за кластерами, дорівнює

$$C_0 = \sum k_1 C_{1,2} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 k_1 k_2 C_{1,2}, \quad (1)$$

де: $C_{1,2}$ – сума вагових коефіцієнтів для різних ресурсів, що відносяться до першого та другого кластерів; $k_{1,2}$ – пропорційна частка ресурсів, що відносяться до кожного кластера; C_0 – сумарний ресурс системи в кількісному вираженні вагових коефіцієнтів.

На причесність УТП до області, що межує з фрактальністю самоподібних систем, свідчать результати досліджень 90 технологічних процесів і 103 їх модифікацій, виконаних авторами, результати яких описані методом огинаючих кривих і представлені на рис. 3. А саме, підкреслюється граничний зв'язок області гладкої термодинамічної невірноваженості з такими явищами, як парні і множинні парні біфуркації, омбіліки та хаос. Це дозволяє застосувати до поняття «промислові відходи» в їх загальновідомому різновиді такі показники, як динаміка зміни ентропії у вигляді показника відходоутворення, наведеного в роботах [1, 3]

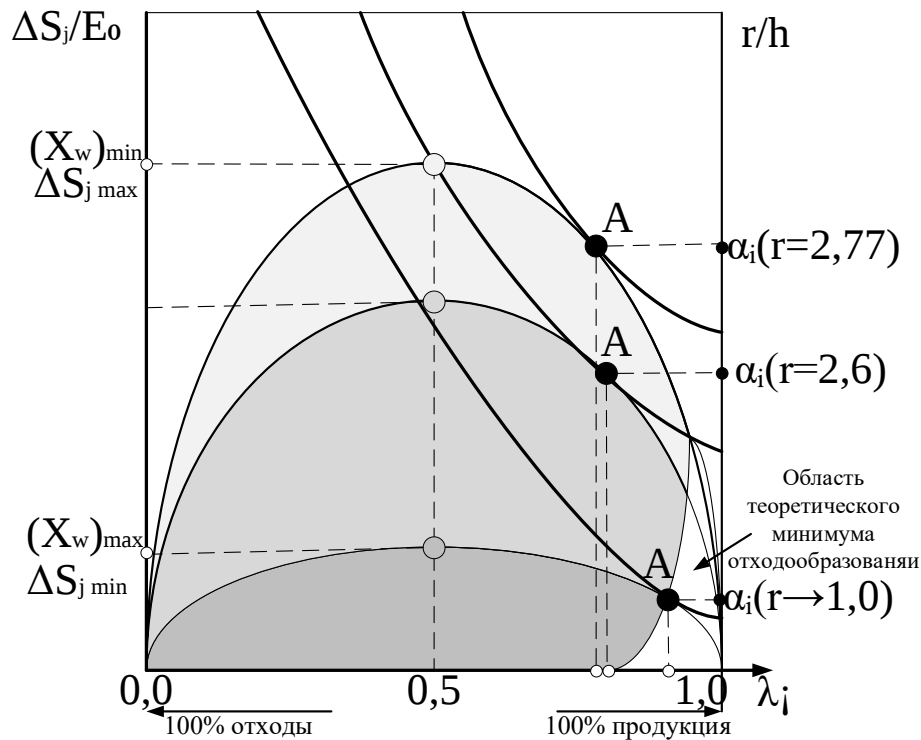


Рис. 2 – Термодинамічні закономірності в області розрахункового теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів у технологічних процесах

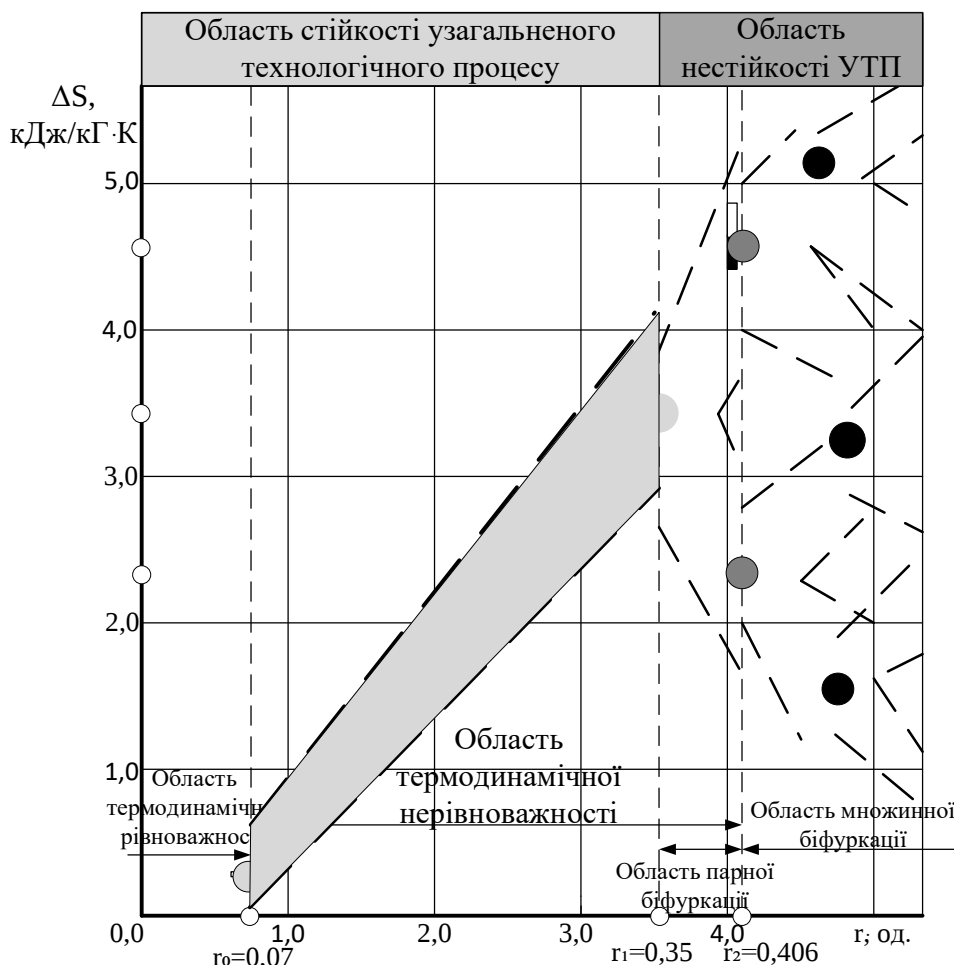


Рис. 3 – Межі огинаючих кривих для розрахункових даних у граничних областях фрактальності узагальненого технологічного процесу у порівнянні зі станом його термодинамічної стійкості

Без забезпечення стійкого стану в разі впровадження додаткового джерела енергії, призначеного для переробки тієї частини сировинного кластера, яка в звичайному стані направляється у відходи даного виробництва, технологічний процес не здатний нормально функціонувати. Стійкість виробничої системи визначається в цілому щодо існуючої структури сировини, при постачанні в систему додаткової енергії необхідної якості і в необхідній кількості, відсутністю флуктуацій енергетичного кластера. В даному випадку це співвідношення $E_0 + E_w = E_0(1 + 0,62)$ у початковий момент часу (τ_0) переробки основних компонентів сировинного кластера. В якості критерія стійкості умовних відходоутворюючих систем припустимо квадратичне змінне значення – швидкість приросту ентропії [7].

Стійкість дисипативних структур, згідно досліджень І. Пригожина, пов'язана з позитивними значеннями надлишкового виробництва ентропії δS у вигляді чисельного розв'язання рівнянь у наступній послідовності

$$+\delta S_n = \delta \langle C_n \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_n \rangle} + \left\{ \delta \langle C_{n,E_0} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{n,E_0} \rangle} + \delta \langle C_{n,E_w} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{n,E_w} \rangle} \right\}; \quad (2)$$

яке надає інформацію про стійкість традиційної технології в цілому;

$$+\delta S_p = \delta \langle C_p \rangle \frac{\partial S}{\partial \langle J_p \rangle} + \left\{ \delta \langle C_{p,E_0} \rangle \frac{\partial S}{\partial \langle J_{p,E_0} \rangle} + \delta \langle C_{p,E_w} \rangle \frac{\partial S}{\partial \langle J_{p,E_w} \rangle} \right\}; \quad (3)$$

яке надає інформацію про стійкість технологічного процесу по відношенню до продукції, що випускається в ньому;

$$+\delta S_w = \delta \langle C_w \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_w \rangle} + \left\{ \delta \langle C_{w,E_0} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{w,E_0} \rangle} + \delta \langle C_{w,E_w} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{w,E_w} \rangle} \right\}; \quad (4)$$

яке надає інформацію про стійкість технологічного процесу по відношенню до відходів, що утворюються в ньому. І наостанок,

$$+\delta S_{-w} = \delta \langle C_{-w} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{-w} \rangle} + \left\{ \delta \langle C_{-w,E_0} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{-w,E_0} \rangle} + \delta \langle C_{-w,E_w} \rangle \frac{\Delta S}{\Delta \langle J_{-w,E_w} \rangle} \right\}; \quad (5)$$

найбільш цікавий для предмета нашого дослідження варіант, коли чисельне рішення показує

ступінь стійкості виробничої системи, в якій в певних кількостях присутня додаткова енергія E_w , що здатна до цілеспрямованого перетворення матеріального потоку $J_w \rightarrow J_{-w} \rightarrow J_{pw}$. Кожне з цих рівнянь дає інформацію у відносній формі про залежність швидкості зміни ентропії δS , пов'язаної з переробкою не тільки тієї частини сировини, яка потрапляє до товарної продукції (3), але і для другої частини сировини, яка потрапляє у відходи (4), і для тієї ж частини сировини, якщо вона піддається додатковій переробці в умовах технологічного процесу за рахунок додаткової енергії (5). Результати таких досліджень показані на рис. 4.

Швидкість зміни ентропії, що редується до зовнішньої енергії, для УТП, який відноситься до одного з

видів промислового виробництва, тим менше, чим більше дестабілізованим є енергетичний режим цього процесу при введенні додаткового джерела енергії (показник $h \sim (E_0 + E_w)/E_0 = (E_0 + kE_0)/E_0 = 1 + k$, де k – граничний показник співвідношення додаткової енергії E_w , здатної цілеспрямовано змінювати відходоутворюючу частину сировини J_w по відношенню до основної зовнішньої енергії технологічного процесу E_0 , спрямованого на отримання основного товарного продукту. Нас цікавить значення цього коефіцієнта в межах $k \approx 0,62$, як обмеження по відношенню до сумарної зовнішньої енергії ($E_0 + E_w$), здатної цілеспрямовано змінюватися всього сировинної кластера.

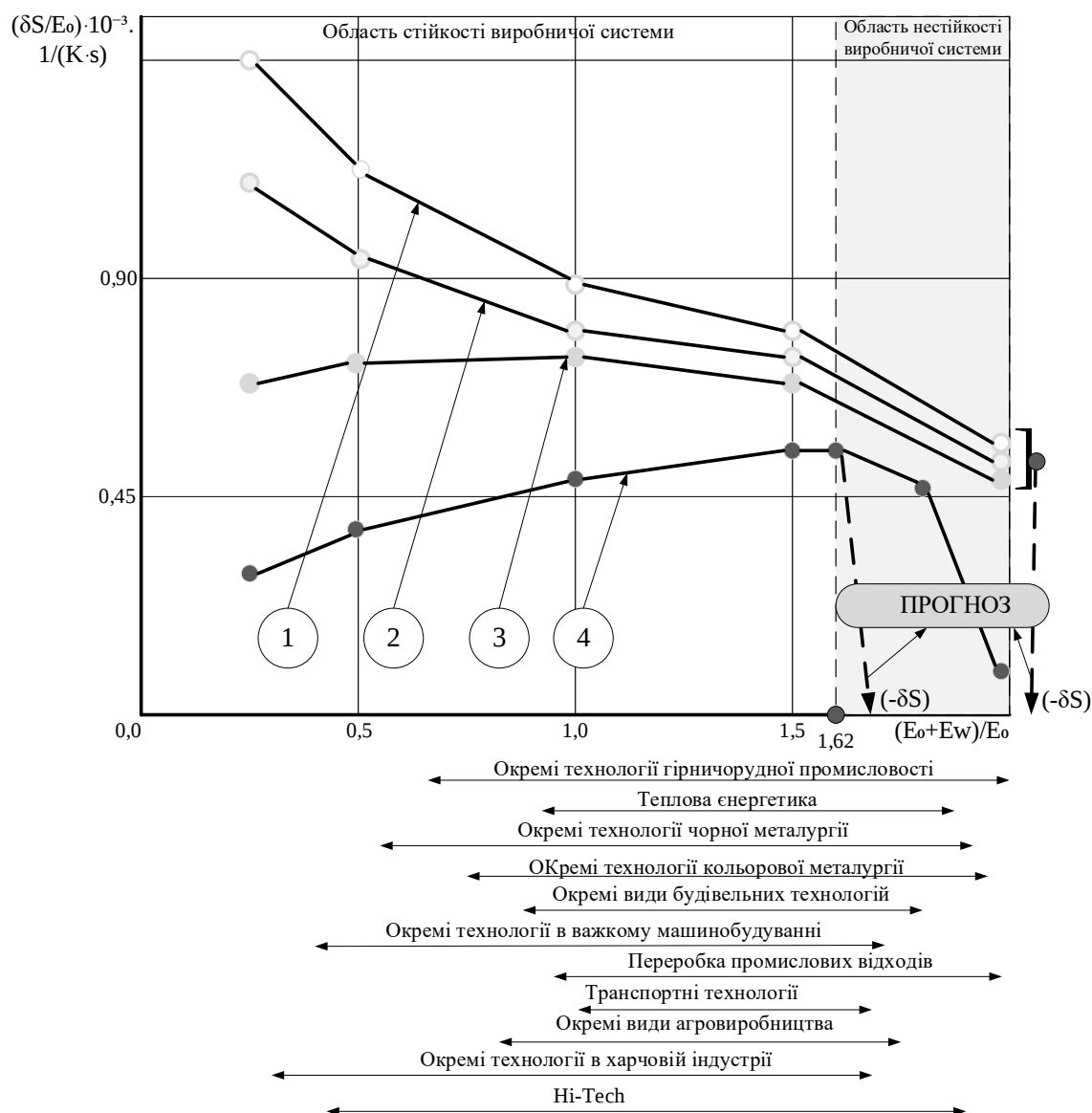


Рис. 4 – Умови сталості відходоутворюючої виробничої системи в технологіях мінімізації відходів у джерелі утворення - технологічному процесі: 1 - відношення до повної сировинної бази технологічного процесу; 2 – відношення до компонентів сировини, з якого отримують товарну продукцію; 3 – відношення до компонентів сировини, з яких отримують відходи; 4 – співвідношення до компонентів частини сировини, які підпадають до впливу додаткової енергії E_w

Розраховані дані підтверджують існування граничної умови забезпечення мінімізації утворення відходів в рамках сталого технологічного процесу, що виражається співвідношенням $E_w = 0,62 \cdot E_0$, вище якого виробнича система для більшості галузей в стандартному виконанні, враховуючи втрату стійкості, не тільки не в змозі цілеспрямовано впливати на ту частину J_w сировинного кластера, що цікавить нас і відповідає за формування стандартної номенклатури відходів конкретного виробництва (заштрихована ділянка, див. рис. 3), а й до отримання товарної продукції в цілому.

Оптимальний варіант можливий тоді і тільки в тому випадку, якщо зміна стану кожної з складових сировинної бази досягається за рахунок мінімально допустимого впливу певного виду якісно зміненої базової енергії або додаткової енергії ззовні без підвищення ентропії самої системи за вищеописаним алгоритмом. Звичайно, це ідеальний кінцевий результат, якого не завжди вдається досягти в зв'язку з надзвичайною складністю порушення умови термодинамічної двоєдності в конкретній виробничій системі, подолати яку можна лише за допомогою деяких більш складних закономірностей.

Результатом цього дослідження може стати ще один показник, який відповідно до отриманої раніше феноменологічної кривої (див. рис. 2) повинен показати єдність теоретичного дослідження і практичної складової технологічного процесу, його енергетичних компонентів, що включають як базову енергію, так і додаткову енергію, призначену для переробки всього

сировинного кластера. Такий показник повинен одночасно вказувати і на межу існування термодинамічної двоєдності в технологічному процесі, і на межу термодинамічної нерівноваги, як критерій такої двоєдності, і, таким чином, повинен бути певним показником досяжності ідеального кінцевого результату – теоретичного мінімуму відходів, які може виробляти досліджуваний технологічний процес. Таким чином, існуючі загальні властивості параметрів, показаних в роботі, повинні допомогти порівняти термодинамічні характеристики УТП з енергетичними параметрами, що дозволяють системі змінювати стан всього матеріального кластера, так і визначити межі такої взаємодії. Вихідні дані для такого аналізу представлені в таблиці 1.

При певних припущеннях, які можуть вплинути на точність нашого аналізу, але тим не менше приведуть до бажаного результату, ми запишемо

$$\frac{r}{h} = \frac{J_p X_p + J_w X_w}{E_0 + E_w} = \frac{J_p X_p + J_w X_w}{E_0(1+k)} = \frac{J_p X_p + J_w \frac{\lambda X_p}{1-\lambda}}{1,62 E_0} = \alpha(1 + \beta \frac{\lambda}{1-\lambda}) \quad (6)$$

де: $\alpha = 0,62 J_p X_p / E_0 = \text{const}$ – базовий показник енергетичного кластера УТП; $\beta = J_w / J_p = \text{const}$ – базовий показник компонентного стану товарного кластера УТП; r/h – параметр, що характеризує термодинамічні сили, здатні до перетворення потенційного відходу J_w в технологічному процесі на межі гладкої термодинамічної невірноваженості в ньому.

Таблиця 1

Параметричні дані для аналізу допустимих значень системи УТР на межі хаосу

№№	Найменування показників	Означення показників
1	Феноменологічний коефіцієнт, що визначає відносність прикладання певних сил X_0 та X_w і здійснену при цьому роботу A_0 та A_w відповідно.	$\lambda = \frac{X_w}{X_0 + X_w}$
2	Термодинамічний показник, що відображає відношення сумарної роботи щодо перетворення всієї сировини $(J_0 + J_w)$ в товарну продукцію до базового значення енергії E_0 .	$r = \frac{(J_p X_p + J_w X_w)}{E_0}$
3	Граничний показник відношення додаткової енергії E_w , здібної до цілеспрямованої зміни відходоутворювальної частини сировини J_w , до базової зовнішньої енергії технологічного процесу E_0 , спрямованої на отримання основної товарної продукції	$h = (E_0 + E_w)/E_0 = (E_0 + kE_0)/E_0$
4	Параметр термодинамічної сили, здатної до перетворення потенційного відходу на межі гладкої термодинамічної невірноваженості УТП	$\frac{r}{h} = \alpha(1 + \beta(\frac{\lambda}{1-\lambda}));$ $\alpha = 0,62 J_p X_p / E_0;$ $\beta = J_w / J_p.$

Співставлення залежностей $\Delta S/E_0$ для відходоутворюючого УТП та параметричного показника r/h від параметру λ показано на рис. 2. Загальне рівняння для таких залежностей

$$(J_p X_p + J_w X_w) \lambda (1 - \lambda) = 0,62 J_p X_p [1 + \frac{J_w (1-\lambda)}{J_p \lambda}], \text{ або} \quad (7)$$

$$\gamma \lambda (1 - \lambda) = \alpha [1 + \beta \frac{(1-\lambda)}{\lambda}], \text{ або} \quad (8)$$

$$\lambda^3 - \lambda^2 + \frac{\alpha(1-\beta)}{\gamma} \lambda + \frac{\alpha\beta}{\gamma} = 0. \quad (9)$$

Тут $\alpha = 0,62 J_p X_p = \text{const}$; $\beta = J_w/J_p = \text{const}$; $\gamma = J_p X_p + J_w X_w = f(X_w)$. Для вирішення рівняння скористаємося канонічною формулою Кардано [8] $\lambda^3 + p\lambda + q = 0$, змінивши його змінну на $\lambda = y + \Delta(X_w)$, і отримавши дискримінант $\Delta = \Delta_1^2 - 4\Delta_0^3$. Коріння рівняння визначаються як

$$y_{1,2,3} = \sqrt[3]{\sqrt{\left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2} - \frac{q}{2}} + \delta^k \sqrt[3]{\frac{-q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}}$$

де $k=1,2,3$, δ – кубічний корінь з одиниці; $\Delta_0 = p^2 + 4q$; $\Delta_1 = 2p^3 + 27q^2$

Розв'язанням рівняння (9) є один дійсний і два уявних кореня. Ми беремо до уваги лише дійсні значення кореня в діапазоні змін $0 \leq \lambda \leq 1$. Повернемося до рис. 2 і покажемо, що під робочою точкою А розуміється межа, що розділяє параметри УТП, при якій система здатна змінювати частину сировини J_w зі стану, характерного для відходів, на стан товарної продукції без порушення загальної стійкості термодинамічної системи і вказує відношення цього стану до розрахункового значення теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів в самому технологічному процесі. Таке рішення стає об'єктивним результатом, за яким можна судити про можливості будь-якого конкретного технологічного процесу щодо мінімізації потенційних відходів, при перерахованих вище обмеженнях.

Висновки

1. Умовою подолання принципу термодинамічної двоїстості як основи появи відходів в УТП, в напрямку їх мінімізації в самому УТП, є стан термодинамічної

неврівноваженості для всіх компонентів матеріального кластера УТП на межі його хаосу.

2. Для будь-якого технологічного процесу завжди існує робоча термодинамічна точка А на феноменологічній кривій в нижній межі неуврівноваженості, яка визначає здатність конкретного технологічного процесу цілеспрямовано змінювати структуру всього сировинного кластера, без порушення термодинамічної стабільності всієї системи.

3. Показано, що відношення $E_w = 0,62 \cdot E_0$ є не тільки граничною умовою фрактального хаосу в УТП, а й умовою стійкості самого УТП, як об'єкта фрактально-кластерної моделі на межі хаосу. При цьому термодинамічний коефіцієнт r , який відображає відношення сумарної роботи по перетворенню всіх сировинних матеріалів в товарну продукцію до базового значення енергії E_0 в стійкому стані, не повинен перевищувати значення 0,35 для УТП.

Перелік використаних джерел

- [1] Волошин В.С. Про одну особливість принципу термодинамічної двоїстості як причини появи промислових відходів. *Фізика та освітні технології*. 2024. Вип. 2. С. 12-18. DOI: <https://doi.org/10.32782/pet-2024-2-2>.
- [2] Волошин В.С. Відходи та їх природа. К. : СПД Самченко, 2024. 630 с.
- [3] Волошин В.С. Відходи та термодинаміка. К. : СПД Самченко, 2024. 80 с.
- [4] Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco : W.H. Freeman and Company, 1982. 468 p.
- [5] Meakin P. Fractals, Scaling and Growth Far from Equilibrium. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. 368 p.
- [6] Stanley H.E. Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena. New York : Dover Publications, 1971. 396 p.
- [7] Glandsdorff P., Prigogine I. Thermodynamic Theory of Structure, Stability, and Fluctuations. New York : Wiley-Interscience, 1971. 394 p.
- [8] Kardano J. Ars Magna. Milano. Archive of Mathematical Works. 1545. 238 p.

APPLICATION OF FRACTAL-CLUSTER THEORY OF MATERIAL RESOURCES MANAGEMENT TO ASSESS THE CONDITIONS FOR MINIMIZING INDUSTRIAL WASTE AT THE SOURCE OF THEIR OCCURRENCE – A GENERALIZED TECHNOLOGICAL PROCESS

Voloshyn V.S.

D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-2663>, e-mail: vsvlshn52@gmail.com;

Burko V.A.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>, e-mail: burko_v_a@pstu.edu

The paper attempts to establish the real limits of the capabilities of the generalized technological process to assimilate the conditions for overcoming the condition of thermodynamic duality, as the cause of the appearance of waste in the technological process itself. The proposed method for assessing the thermodynamic state of the generalized technological process from thermodynamic indicators makes it possible to assess the parametric limits for overcoming the state of thermodynamic duality and ensuring the stable thermodynamic non-equilibrium and irreversibility in the mechanisms of waste minimization within the technological process. A parametric relationship has been established between the main thermodynamic indicators that characterize the ability of Generalized Technological Process to absorb additional energy for processing potential waste into marketable products, without violating the stability of the entire Generalized Technological Process. It is shown that the condition for overcoming the principle of thermodynamic duality, as the basis for the appearance of waste in the Generalized Technological Process, in the direction of their minimization in the Generalized Technological Process itself, is the state of thermodynamic nonequilibrium for all components of the material cluster of the Generalized Technological Process at the boundary of its chaos. It is established that for any technological process there is always an operating thermodynamic point A on the phenomenological curve at the lower boundary of nonequilibrium, which determines the ability of a particular technological process to a purposeful change in the structure of the entire raw material cluster, without violating the thermodynamic stability of the entire system. It is shown that the ratio is not only a boundary condition for fractal chaos in Generalized Technological Process, but also a condition for the stability of the Generalized Technological Process itself, as an object of the fractal-cluster model at the boundary of chaos. At the same time, the thermodynamic coefficient $E_w = 0,62E_0r$ that reflects the ratio of the total work on the transformation of all raw materials into marketable products to the basic value of energy in a steady state should E_0 not exceed the value of 0.35 for Generalized Technological Process.

Keywords: industrial waste, waste management, mathematical methods, thermodynamic disequilibrium, fractals, clusters, Generalized Technological Process.

References

- [1] V. Voloshyn, «Pro odnu osoblyvist printsipy termodynamichnoi dvoedinosti yak prichyny poyavleniya promyslovych vidchodiv» [«On One Peculiarity of the Principle of Thermodynamic Duality as a Cause of Industrial Waste»], *Fizyka ta osviti tekhnolohii – Physics and Educational Technology*, vol. 2, pp. 12-18, 2024. doi: 10.32782/pet-2024-2-2.
- [2] V. Voloshyn, *Vidkhody ta yikh pryroda* [Waste and its nature]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [3] V. Voloshyn, *Vidkhody ta termodynamika* [Waste and thermodynamics]. Kyiv, Ukraine: SPD Samchenko Publ., 2024. (Ukr.)
- [4] B.B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco, USA: W.H. Freeman and Company Publ., 1982.
- [5] P. Meakin, *Fractals, Scaling and Growth Far from Equilibrium*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [6] H.E. Stanley, *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena*. New York, USA: Dover Publications, 1971.
- [7] P. Glansdorff, and I. Prigogine, *Thermodynamic Theory of Structure, Stability, and Fluctuations*. New York, USA: Wiley-Interscience, 1971.
- [8] J. Kardano, *Ars Magna*. Milano. Archive of Mathematical Works. 1545.

Стаття надійшла 23.01.2025

Стаття прийнята 19.02.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Волошин В.С., Бурко В.А. Застосування фрактально-кластерної теорії управління матеріальними ресурсами для оцінки умов мінімізації промислових відходів у джерелі їх виникнення – узагальненому технологічному процесі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 210-217. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336391>.