

УДК 504.064.2

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.17>

ЩОДО ПИТАННЯ ПРО МЕТОДОЛОГІЮ МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ У ДЖЕРЕЛІ ЇХ ВИНИКНЕННЯ – ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ

Волошин В.С.

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

На основі попередніх робіт автора систематизовано основні причини виникнення відходів у технологічних процесах: це структура сировини, що використовується у виробничій системі, її компонентність, а також якість джерел енергії, що беруть участь у технологічному процесі. Всі вони розглядаються як основа принципу термодинамічної двоєдності, який характерний для будь-якого технологічного процесу і стосується того, що по відношенню до певної частини компонентів сировини один і той же технологічний процес проявляє себе як сильно нерівноважна термодинамічна система і функціонує за законами нелінійної термодинаміки, і, в той же час, по відношенню до іншої частини сировини проявляє себе як слабо нерівноважна, або перебуваючи в стані термодинамічної рівноваги, і підкоряється законам лінійної термодинаміки. Така двоєдність порівнянна з тим, що продукція в технологічному процесі вважається результатом упорядкованої послідовності впливу на одну частину сировини із заданим станом і мінімумом енергетичних витрат. А відходи виробництва можуть бути кваліфіковані як результат невпорядкованого впливу тих самих явищ, тієї ж енергії і тієї ж технічної системи на другу частину сировини в умовах, не передбачених цією технологією. У статті представлено нові підходи до впорядкування сировинної бази та визначення активних джерел енергії, здатних забезпечити умови термодинамічної двоєдності як основи для мінімізації відходів у самому технологічному процесі. Наведено методи компонентного структурування сировини, а також шляхи підвищення ефективності енергетичної присутності в системі з метою впливу на різноманітні компоненти вихідної сировини, а саме: зміна характеру джерела енергії, вже існуючого в технологічному процесі, використання принципово інших джерел енергії порівняно з тим, що вже існують в технології. а також синхронізація існуючих компонентів сировини і запропонованих джерел енергії за умовами досягнення термодинамічної нерівноваженості. Як приклад розглянуто умови створення теоретично обґрунтованого фізико-хімічного реактора, що дозволяє реалізувати таку методику в доменному виробництві. *Ключові слова:* відходи, сировина, структура сировини, компонентність сировини, енергія, джерела енергії, продукція, принцип термодинамічної двоєдності, полімодальні технології.

On the question of the methodology of waste minimization at the source of occurrence. Voloshyn V.

Based on the previous works of the author, the main causes of waste in technological processes are systematized: this is the structure of raw materials used in the production system, its component, as well as the quality of energy sources involved in the technological process. All of them are considered as the basis of the principle of thermodynamic duality, which is characteristic of any technological process and consists in the fact that one and the same technological process in relation to the In the case of a certain part of the components of the raw material, it manifests itself as a strongly non-equilibrium thermodynamic system and functions according to the laws of nonlinear thermodynamics, and, at the same time, in relation to another part of the raw material, it manifests itself as weakly non-equilibrium, or being in a state of thermodynamic equilibrium, and obeys the laws of linear thermodynamics. Such a duality is comparable to the fact that products in a technological process are the result of an orderly sequence of actions on raw materials with a predetermined state and a minimum of costs, including energy costs. And production waste can be qualified as the result of disordered effects of the same phenomena, the same energy and the same technical system on the second part of raw materials under conditions not provided for by this technology. The paper outlines new approaches to streamlining the raw material base and identifying active energy sources that can provide conditions for thermodynamic duality as a basis for minimizing waste in the technological process itself. Methods of component structuring of raw materials are presented, which allow to achieve conditions for minimizing waste at the source of origin, as well as ways to increase the efficiency of energy presence in the system in order to affect the most different components of the feedstock, namely, a change in the nature of the energy source already existing in the technological process and the use of fundamentally different energy sources compared to the one already existing in the technology, as well as the synchronization of the existing component of the raw materials and the proposed energy sources. As an example, the conditions for creating a theoretically grounded physicochemical reactor that allows implementing such a methodology in blast furnace production are considered. *Key words:* waste, raw materials, structure of raw materials, component content of raw materials, energy, energy sources, products, the principle of thermodynamic duality, polymodal technologies.

Постановка проблеми. Контроль промислових відходів на нинішньому рівні не можна вважати задовільним. Хоча б тому, що, як результат такої діяльності, обсяг раніше перероблених відходів навіть у розвинених країнах ледве покриває обсяг знову отриманих відходів від галузей, що забруднюють навколишнє середовище. З 24,6 млн т доменного

шлаку, виробленого в Європі в 2020 році, 19,4 млн т гранулюються, вже після їх отримання, для подальшого використання. При цьому в багатьох країнах старі металургійні шлакові відвали стоять практично недоторканими [1]. З 11 млн т металургійного шлаку, що отримано в 2021 році в Україні, в шлакові відвали було спрямовано до 8 млн. тонн, а рівень загальної

переробки нових металургійних відходів не досягав 30% [2]. У країні накопичено всього близько 300 млн т такого шлаку, і щороку на відвали без переробки відправляється не менше 10 млн т нового шлаку. Причому ці зусилля коштують приблизно стільки ж грошей, як, власне, і вартість самої галузі, що забруднює навколишнє середовище. Звідси випливає, що сучасні методи переробки та мінімізації промислових відходів, які є високорозвиненими за кількістю та якістю, не здатні ефективно знизити техногенне навантаження ані на українців, ані на нашу планету, що вимірюється в цілому мільярдами тонн відходів.

Щороку, завдяки зусиллям науки та бізнесу, світ отримує декілька сотень нових технологічних процесів, які замінюють існуючі як більш ефективні, готові до виробництва більш дешевої та якісної комерційної продукції. Але якщо цю хвилю технологій оцінювати не тільки за показниками товарної продукції, а й за утворенням відходів, результат буде далеко не на користь нових технологій навіть у такій сфері, як нановиробництво. Їх наслідком стають нові відходи, часто ще більш небезпечні для людини, хоча і в менших кількостях.

Актуальність дослідження. Для того, щоб боротися з відходами, необхідно щось робити не тільки з існуючими, а й з новими технологічними процесами. Захищати нові технології від явищ, які пов'язані з появою відходів потрібно навіть не в законодавчій площині, а в інженерній. Існуючі технологічні процеси необхідно системно поєднувати з технологіями ефективної переробки промислових відходів в обсягах, що перевищують існуючі виробництва сукупної товарної продукції. Настав час сказати собі, що надзвичайна вимушеність зусиль щодо зниження загального техногенного навантаження на навколишнє середовище сьогодні настільки висока, що вимагає зовсім інших якісних зусиль і засобів для їх реалізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розроблена авторами методика мінімізації утворення відходів у джерелі їх виникнення [3, 4, 5], тобто в самому технологічному процесі, завжди знаходить підтримку серед фахівців з охорони навколишнього середовища, але є проблемною для послідовників серед практичних технологів і виробників. Однією з причин є складність з перебудовою вже налагоджених технологічних процесів, але ж і цього недостатньо. Відсутність чітких правил, яких слід дотримуватися при розробці нових технологій на самому початку їх створення, не сприяє тому, що такі технології з самого початку можуть бути мінімізовані за статтею – «відходи».

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Метою даної роботи є актуалізація методів і підходів, які слід враховувати при створенні нових та модернізації існуючих технологічних процесів. Ці підходи повинні мати навіть не юридичну,

а інженерну основу для свого існування в сучасних технологічних процесах.

Новизна. Представлено нові підходи до системного структурування сировини та узгодженого виділення активних джерел енергії, здатних забезпечити умови термодинамічної двоєдності як основи мінімізації відходів у самому технологічному процесі.

Методологічна значимість цих досліджень пов'язана з розумінням того, що продукція в технологічному процесі є результатом впорядкованої послідовності механічних, фізико-хімічних та ін. дій над сировиною з наперед заданим станом і мінімумом витрат, включаючи енергетичні витрати. Відходи виробництва, навпаки, можуть бути отримані в результаті невпорядкованого впливу тих же самих явищ та дій, тих же закономірностей, тієї ж енергії і тієї ж технічної системи на зовсім другу частину сировинних компонентів в умовах не передбачені цією технологією. Теза залишається вірною: виробництво йде тільки для продукції; виробництво не для відходів.

Виклад основного матеріалу. Для того щоб зрозуміти причини виникнення відходів в будь-якому технологічному процесі, необхідно, перш за все, звернути увагу на структуру сировинної бази цього процесу, на її неоднорідність і компонентність. Диференціація сировинної бази на окремі складові є першим кроком до розуміння механізмів утворення відходів.

Другим кроком є розуміння принципу термодинамічної двоєдності для будь-якого технологічного процесу, коли *один і той же технологічний процес по відношенню до певної частини компонентів сировини проявляє себе як сильно нерівноважна термодинамічна система і функціонує за законами нелінійної термодинаміки, і, в той же час, по відношенню до іншої частини сировини, він проявляє себе як слабо нерівноважний, або знаходиться в стані термодинамічної рівноваги, і підкоряється законам лінійної термодинаміки.* Для такої термодинамічної двоєдності виробництва товарної продукції та відходів маємо право відзначити наявність накладення цих двох незворотних процесів (рис. 1). Це твердження повністю відповідає третьому закону енергетичної ентропії, який показує, що ентропію відкритих систем можна зменшити, споживаючи енергію із зовнішніх джерел і перерозподіляючи її між системою і зовнішнім середовищем на користь першої.

І третім кроком в таких механізмах є необхідність узгодження якості енергії, яка бере участь в технологічному процесі, з різноманіттям компонентів (N) сировини таким чином, щоб забезпечити для них умови максимальної термодинамічної нерівноваженості. За загальним правилом, різноманіття та якість джерел енергії, що беруть участь у перетворенні сировинних потоків у процесі, має бути спрямоване не лише на перетворення окремих компонентів сировини (n) у корисні продукти. Структура цих

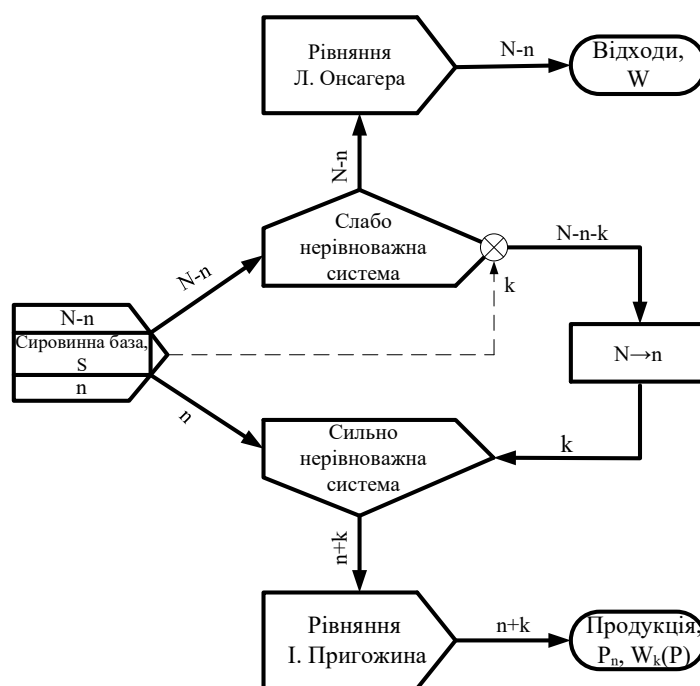


Рис. 1. Схема реалізації принципу термодинамічної двоєдності в технологічному процесі: N – загальна кількість компонентів у сировинній базі; n – кількість компонентів, що відповідають за отримання товарної продукції; k – число складових сировинної бази з відходоутворюючих компонентів, які здатні в технологічному процесі перетворюватися в товарну продукцію; $(N-n-k)$ – кількість компонентів сировинної бази, що входять до складу чистих відходів

джерел повинна бути розрахована на перетворення всього спектру компонентів (N) сировини в корисні продукти (рис. 2).

Для цього ми маємо наступне.

Методи компонентного структурування сировини, що дозволяють досягти умов для мінімізації відходів у джерелі виникнення – технологічному процесі, можуть включати:

- дроблення, сепарація, подрібнення, в результаті яких змінюється активна поверхня сировини, підвищується її хімічна, адгезійна, сорбційна активність і т. д.;

- поділ за хімічною ознакою, структурування за назвами хімічних сполук і елементів, що вступають в реакцію різноманітними способами, зокрема, за їх хімічної активності;

- поділ матеріалу за фазовими властивостями, особливо на межах фазових переходів, наприклад, для рідкого, твердого або газоподібного станів, за хімічною та іншими видами активності;

- поділ за фізичними властивостями: щільністю, електричними або магнітними властивостями, реологічними властивостями матеріалу та ін.;

- поділ при переході на мікрорівень за індивідуальними властивостями сировини;

- поділ окремих компонентів сировини за їх динамічними характеристиками з подальшим енергетичним впливом у часі.

Шляхи підвищення ефективності енергетичної присутності в системі з метою впливу на найрізноманітніші компоненти вихідної сировини включають в себе кілька напрямків, а саме:

1. Зміна характеру джерела енергії, що вже існує в технологічному процесі, зокрема:

- зміна щільності енергії у її певному вигляді;
- збільшення або зменшення потужності енергії, що подається в технологічний процес;

- зміна знаку прикладання відомого виду енергії на протилежний, за можливості;

- прикладання енергії не постійного, а знако-змінного стану в часі;

- використання строго періодично змінної в часі енергії відомого типу;

- збільшення частоти змінного виду енергії, зміна її амплітуди або зсув фази змінної енергії;

- перехід від змінного енергетичного поля до імпульсного, більш жорсткого по потужності і частоті;

- модуляція форми енергетичного впливу в часі або за потужністю;

- застосування резонансних властивостей до існуючого енергетичного поля, тощо.

Такі модифікації в енергетичній сфері існуючого типу для технологічного процесу дозволяють підвищити активність різних компонентів його сировинної бази, забезпечити цілеспрямовану зміну власти-

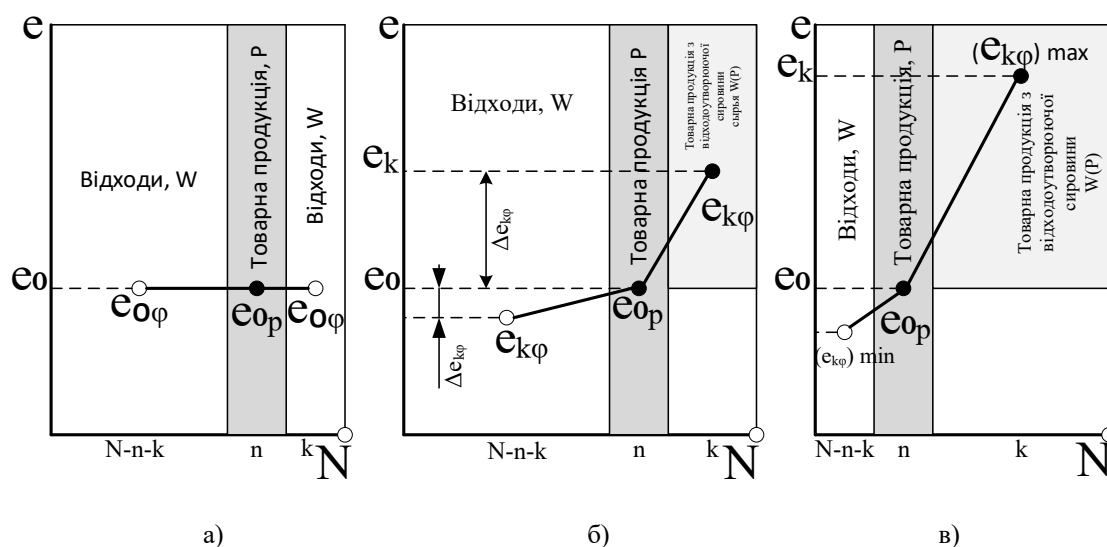


Рис. 2. Загальний характер розподілу приведеної енергії для впливу на k -компоненти сировинної бази в традиційному (а) і полімодальному (б) і (в) технологічних процесах при введенні в систему додаткових джерел енергії e_k без зазначення їх якості

ностей окремих компонентів таким чином, щоб їм можна було надати споживчі властивості і вивести зі стану можливих відходів (див. рис. 1).

2. Використання в технології принципово інших джерел енергії в порівнянні з існуючими, це другий спосіб зміни енергетичного впливу в рамках існуючого технологічного процесу передбачає.

Всі види енергії підрозділяються за якістю, щільністю і силою впливу на матеріали. Крім того, існують енергетичні зв'язки, які дозволяють використовувати деякі види енергії для посилення ефектів інших видів енергії. Наприклад, механічний вплив на окремі компоненти сировини може бути значно збільшено, якщо ці компоненти піддати простому нагріванню, особливо якщо передбачені умови диференційованого нагріву окремих компонентів. Різні комбінації теплового впливу з паралельними акустичними або магнітними енергетичними ефектами також можуть дати бажаний результат у вигляді цілеспрямованої зміни властивостей окремих компонентів сировини. Тощо.

Сюди ж відноситься модуляція одного енергетичного сигналу іншим, схожим за певними характеристиками: щільністю, амплітудою, фазовими зрушеннями енергетичного сигналу. Це легко уявити для електромагнітних і подібних впливів.

І третій напрямок підвищення енергетичної ефективності – це синхронізація наявних компонентів сировини та запропонованих джерел енергії. До нього входять:

– узгодження (або, навпаки, розузгодження) компонентів сировини за фізичними, хімічними та іншими властивостями з частотними характеристиками використовуваної енергії;

– мінімізація лінійних розмірів компонентів сировини з приведенням їх параметрів до заданих

частот енергетичного поля з метою їх резонансної взаємодії;

– штучне розширення можливостей і властивостей окремих компонентів сировини по відношенню до застосовуваних енергетичних ефектів (мітки, молекулярні включення, ізотопи).

В результаті такої взаємодії джерел енергії і структурованої за N – компонентами сировини в технологічному процесі з'являються можливості для виникнення зовсім інших властивостей тих компонентів, які раніше існували в даній технології як непотрібні і становили основу відходів даного виробництва (див. рис. 2, а). У запропонованому підході для кожного такого k – компонента виникає новий енергетичний вплив e_k , зведений, наприклад, до масових або об'ємних характеристик сировинного компонента, який здатний надати цьому компоненту властивості товарної продукції з відходоутворюючої сировини (див. рис. 2, б). І, нарешті, з умов максимального енергетичного впливу (не обов'язково одним і тим же джерелом енергії) можна досягти максимально можливої компонентності сировини ($n+k \rightarrow N$), майже кожний з яких, завдяки новим або модернізованим джерелам енергії, здатний перетворюватися в товарну продукцію в рамках існуючого, але вже модернізованого технологічного процесу (див. рис. 2, в).

У світлі вищевикладеного *ставиться завдання запобігання (або мінімізації) утворення відходів ще в процесі виробничої діяльності*, модифікацією енергетики і впорядкуванням сировинної бази технологічного процесу (рис. 3). До сих пір перед людиною такі інженерні завдання не ставилися.

Розглянемо ці положення на прикладі однієї з найбільш складних, з точки зору утворення відходів, технологій, виробництва чавуну в доменній

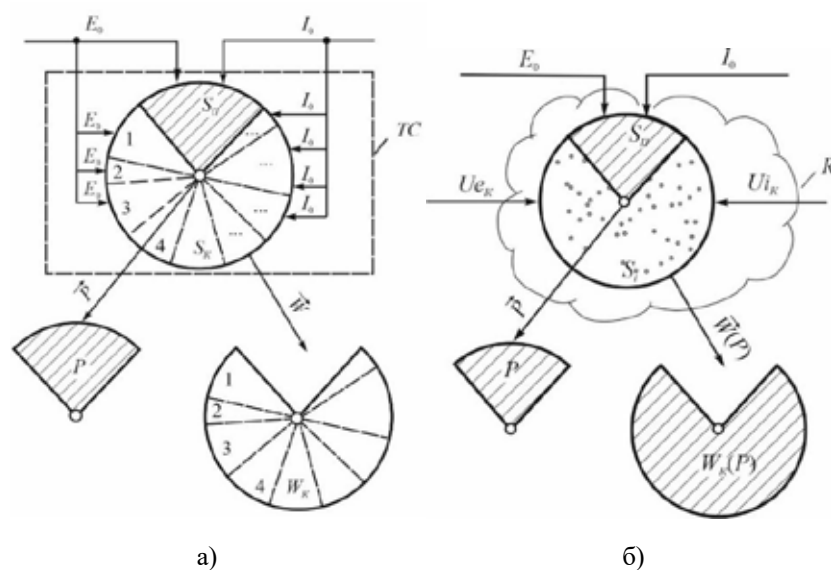


Рис. 2. Загальний характер розподілу приведеної енергії для впливу на k -компоненти сировинної бази в традиційному (а) і полімодальному (б) і (в) технологічних процесах при введенні в систему додаткових джерел енергії e_k без зазначення їх якості

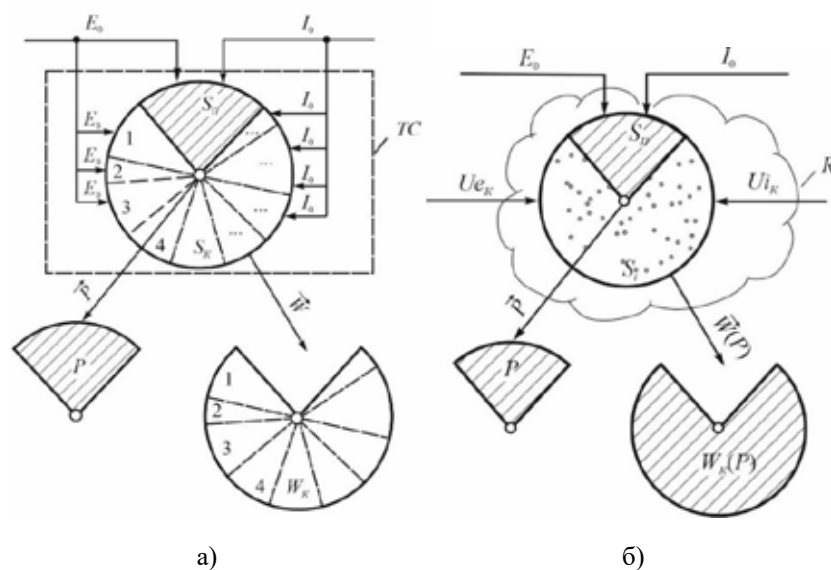


Рис. 3. Умовна схема традиційного (а) і полімодального (б) технологічного процесу. Тут: TC – технічна система щодо організації технологічного процесу; E_0 – початкова енергія для підтримки технологічного процесу; E_1 – вихідні відомості для організації технологічного процесу; S_n – багатоконпонентна сировинна база в тій її частині, яка відноситься до продукції; S_k – багатоконпонентна сировинна база в тій її частині, яка відноситься до відходів; P – корисна продукція; W – спосіб отримання відходів; W_k – відход; n – компонентність сировини, що відноситься до продукції; k – компонентність сировини, що відноситься до відходів; R – деякий полімодальний реактор; U_{e_k} – додаткове енергетичне втручання в компонентну базу сировини; U_{i_k} – додаткове інформаційне втручання в компонентну базу сировини; $W_k(P)$ – методи перетворення потенційних компонентів відходів в товарну продукцію в рамках полімодального реактора R

печі. Шлакові відходи доменного виробництва є найбільш поширеними і небезпечними в металургії. Незважаючи на величезну кількість методів їх пост-технологічної переробки та утилізації, доменні шлакові відвали залишаються, а мільйони тонн відходів забруднюють навколишнє середовище.

Подивимося на цю проблему з іншого боку (див. рис. 3, б). Традиційна конструкція доменної печі добре відома. Зазвичай шлаковий продукт доменної плавки в кількості не менше 40% від загальної кількості сировини йде у відходи через шлаковий отвір в печі. Найбільш поширений склад рідкого шлаку

включає оксиди кремнію, кальцію, магнію, алюмінію, фосфору, заліза, магнію, марганцю, міді і деякі інші. Відразу варто відзначити, що існуюча доменна піч не дозволяє вирішити завдання мінімізації таких оксидів і запобігання їх потраплянню в шлак. Для цього потрібні інші рішення.

Для простоти розглянемо новий агрегат як наш теоретичний полімодальний реактор (R), який повинен бути розрахований не тільки на виробництво товарного чавуну, але і на реалізацію інших фізико-хімічних процесів, що супроводжують основний доменний процес у вигляді трансформації інших компонентів сировини на користь товарної продукції, яка виробляється разом.

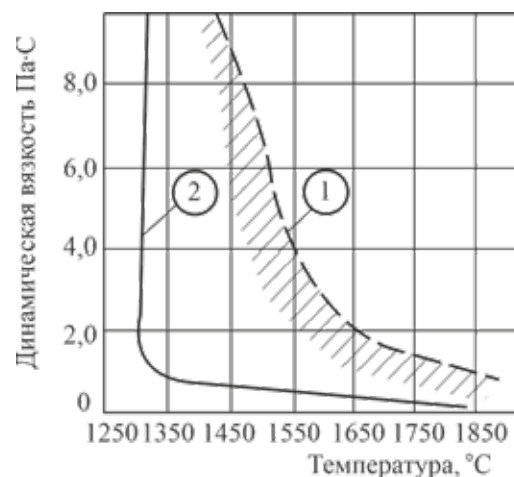
Першою умовою альтернативної технології є створення умов сильної термодинамічної нерівноваженості в певній частині печі (реактора – R) щодо ряду рудних оксидів, що складають основу шлакоутворення.

Надалі ми будемо посилатися на окремі матеріали робіт відомих українських вчених Патона Б. Є., Медовара Б. І. за 1970 р., Казачкова Є. О., Чепурного А. Д. за 1995 р., Чуманова В. І. за 2009 р., Сержанова Г. М. та ін. за 2015 рік.

На сьогоднішній день відомо, що шлакові розплави в певному температурному діапазоні являють собою особливий вид комплексних рідких електrolітів із досить складною структурою, до складу якого входять багатоконпонентні іонні комплекси, субоксиди різного складу, окремі молекули і асоціати. Для того, щоб виділити хоча б відносно чисті компоненти з металургійного шлаку в певному фізико-хімічному реакторі, необхідні більш ретельні дослідження їх поведінки в умовах підвищених температур і низької в'язкості. Якщо вдасться підняти температуру в нашому фізико-хімічному реакторі до такого ступеня, що шлак отримає властивості рідини з в'язкістю межах $0,05\text{--}1,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ (рис. 4), для такої рідини можуть бути застосовані до першого наближення характеристичні електrolітичні залежності. В цілому ці залежності є більш складними, тому, що в традиційній металургії не було потреб щодо вивчення перегрітих шлаків, але їх спрямованість стає саме такою.

У разі, коли розчин містить певну кількість іонів з номенклатури металургійних шлаків, різниця в потрібних енергіях $\Delta Q = \{Q(n_2) - Q(n_1)\}$, або прихована теплота плавлення, є одним з параметрів, які можуть бути використані для перегрітих металургійних шлаків як визначник нерівноваженості цих систем. Тому сильно перегрітий розплавлений шлак може бути об'єктом деякого енергетичного впливу з метою надання йому якостей корисного продукту. Для цього потрібно забезпечити необхідну енергію в реакторі, визначити спосіб її впливу на такий шлак і технічне оснащення такого процесу.

Тому не можна не враховувати можливості організації процесів електrolітичної дисоціації, які за пев-



1 – при вмісті $\text{SiO}_2 \approx 60\%$;

2 – при вмісті $\text{SiO}_2 \approx 39\%$

Рис. 4. Температурна залежність динамічної в'язкості розплавленого шлаку

Джерело: складено автором згідно з дослідженням проф. Є. О. Казачкова, 1995

них умов (насамперед високих температур розплаву) можуть бути варіантом вирішення проблеми поділу відомої частини шлакових компонентів. Наприклад, не суперечить логіці, що у фізико-хімічному доменному реакторі теоретично можна:

- створити високотемпературний електrolізер з використанням електричної енергії, можливо, на графітових електродах;
- виділити найбільш реакційноздатні мінерали і компоненти з початкової доменної шихти;
- забезпечити умови для активації поверхні високотемпературного доменного шлаку;
- забезпечити необхідну в'язкість шлаку для високотемпературного електrolізу;
- забезпечити обробку поверхні шлаку розчином відповідної кислоти, з метою впорядкування його структури.

Сьогодні ці пропозиції можуть здатися неактуальними або нездійсненними. Проте, як показав академік Б. І. Медовар, досвід створення технологій електрошлакового переплаву в Інституті зварювання ім. Є. О. Патона показує, що існує як теоретична, так і практична основа роботи з рідкими електrolітичними шлаками в електричному полі і при температурах близьких до $2500 \text{ }^\circ\text{C}$. При цьому українські науковці тримають високу планку в цих дослідженнях [6].

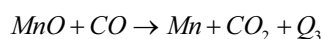
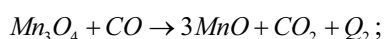
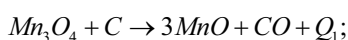
Розглянемо деякі з відомих методів відновлення основних компонентів, присутніх в доменному шлаку, які теоретично можуть бути реалізовані в нашому гіпотетичному реакторі. Поки що ми свідомо уникатимемо проблем практичної реалізації запропонованих методів, враховуючи їх складність,

потрібність в додаткових дослідженнях та незвичність для традиційних технологів.

1. Відновлення кремнію з сировини і шлаку. З металотермії відомо, що відновлення кремнію з його оксиду алюмінієм можливо при температурі 1433 °С. Розглянемо реакцію: $3SiO_2 + 4Al = 3Si + Al_2O_3$, в якій оксид кремнію в термодинамічних умовах повністю взаємодіє з алюмінієм при $t = 400$ °С, утворюючи кремній і Al_2O_3 . При більш високих температурах відбувається утворення Al_2SiO_5 , $SiO_{(c)}$ та ін. За даними В. І. Чуманова (2009), ступінь утворення кремнію на рівні 97–100% досягається в діапазоні температур 500–1000 °С при визначеній кількості алюмінію. При цьому тиск в реакторі не впливає на перебіг цих хімічних реакцій. Узгодимось, що теоретично такі умови можуть бути створені на відповідному рівні доменного реактора, не допускаючи потрапляння більшої частини оксидів кремнію в горн до чавуну. Але цей процес підлягає більш ретельному вивченню, як самостійний об'єкт для дослідження.

Для повноти картини можна звернутися до методів відновлення кремнію з оксиду і в струмені водневої плазми ($SiO_2 + 2H_2 \rightarrow Si + 2H_2O$). Звичайно, чистий кремній ми не отримаємо, будуть забруднення. Але він вже не буде підпадати до відходів, стаючи сировиною для подальшого виробництва монокристала.

2. Відновлення марганцю. У доменній сировині марганець присутній у вигляді оксидів Mn_2O_3 , Mn_3O_4 або діоксиду MnO_2 , в доменному шлаку – тільки у вигляді MnO . У печі відновлення марганцю до чистого елемента може протікати в атмосфері вуглекислого газу стадіями від вищих оксидів до нижчих, прямим шляхом:



Відновлення марганцю з MnO твердим вуглицем здійснюється при температурі від 1100 °С в межах заплечиків печі. Мається на увазі приблизно 30–45% марганцю, який переходить в шлак і підлягає екстракції. Решта марганцю шихти поглинається чавуном. Питання про вилучення чистого марганцю із закритого реактора доменної печі залишається відкритим.

3. Зменшення фосфору. По ряду відомих причин цілком можливо, що фосфор, як елемент більшості видів мінеральної сировини на планеті, стане тим фактором, який змусить людей більш дбайливо ставитися до залишків цієї сировини взагалі.

Вміст фосфору в агломераційній руді коливається від 0,05–0,06% і іноді досягає 1,5%. Електротермічний метод відновлення фосфору з його оксидів передбачає реакцію з коксовим вуглицем в присутності кремнезему і може бути записаний

як $Ca_3P_2O_8 + 5C + nSiO_2 \rightarrow P_2 + 3CaO \cdot nSiO_2 + 5CO$. Кінетика реакції проявляється при наявності високотемпературного розплаву і деякого модуля кислотності за рахунок SiO_2 . При цьому кислотність реакційноздатної зони може бути забезпечена і за рахунок наявності оксидів алюмінію заради відновлення кремнію. Практично всі початкові умови для такої реакції (розплав, кокс, оксид кремнію, наявність кислого середовища, температура) присутні в доменному реакторі. Недолік тільки один: традиційна доменна піч ані конструкційно, ані технологічно не пристосована для таких реакцій.

Такі теоретичні дослідження можуть бути продовжені і надалі. Загальні характеристики полімодального доменного реактора R , в якому теоретично можуть протікати такі та інші реакції, наведені в таблиці 1.

Безумовно, розбіг температур для таких технологій та існуючих в реактивній зоні хімічних елементів і їх з'єднань, дуже суттєвий, що може привести до елементарного хімічного протиріччя.

Якщо прийняти наведені вище виклади, то доменна піч повинна бути перетворена в певний фізико-хімічний реактор (R) (див. рис. 3, б), в якому відбувається функціональне розділення багатокomпонентної сировини (S) у вигляді аглодоменої руди, флюсових добавок і коксу на окремі компоненти: деякі сполуки кремнію, сірки, фосфору, окремо миш'як, окремо інші компоненти рудного матеріалу (табл. 2). При цьому умовна кількісна складова корисної товарної продукції (P) може досягати 88–95% до ваги використовуваної руди, коксу і добавок. У цьому випадку замість 45% сировини в доменному виробництві переводилось би до відходів всього 5–10% цієї сировини у вигляді «поки» непереробленої її частини. Зокрема, в такому реакторі можуть використовуватися високотемпературні електролітичні або хімічні (каталітичні) джерела енергії. Так, їх ще потрібно розвивати, але «гра варта свічок». По суті, мова йде про відомі способи (W) мінімізувати відходи в джерелі їх виникнення, тобто в самому технологічному процесі.

Очевидно, що створити реактор з такими параметрами непросто. Але до цього треба прагнути. Адже, по суті, мова йде про способи мінімізації відходів в джерелі їх виникнення, тобто в самому технологічному процесі і без необхідності додаткової переробки таких відходів вже після їх створення.

Перспективи використання результатів дослідження. Ми залишаємося впевненими, що запропонована технологічна полімодальна ідеологія буде прийнята далеко не всіма. Тим більше, що реальних прикладів ще дуже мало. Традиційні фахівці і технологи, основним завданням яких протягом багатьох років було вдосконалення існуючих технологій і приведення технологічних показників до рівня максимальної продуктивності або до максимального рівня якості основної продукції, відне-

Таблиця 1

Зведені показники впливу на відходоутворення для умовного полімодального реактора

№	Показник	SiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
1	Температура плавлення (оксид /елемент), °С	1713/1414	535/1246	340/45
2	Температура в зоні реакції, °С	500/1000	1050/1100	~1300
3	Вміст компонентів у шлаку, %	50/60	0,7/2,0	0,05/1,5%
4	Активний реагент	Al	C _{me} , CO	C, SiO ₂
5	Реакція відновлення: – для SiO ₂ 3SiO ₂ + 4Al = 3Si + 2Al ₂ O ₃ – для MnO MnO + CO → Mn + CO ₂ и MnO + C → Mn + CO – для P ₂ O ₅ Ca ₃ P ₂ O ₈ + 5C + nSiO ₂ → P ₂ + 3CaO · nSiO ₂ + 5CO			
6	Термодинамічна характеристика процесу	Екзотермізм	Ендотермізм	Ендотермізм
7	Продукт реакції, %	Si(97/99)	Mn(15/73)	P(56/99)
8	Просторова координата в реакторі для реакції	Лещадь доменного реактора	Запличики реактора, шахта	–
9	Спосіб вилучення з реактора	?	?	?
10	Небажані взаємодії	SiC, FeS	Розчин марганцю в чавуні, Mn ₂ C	Fe ₂ P

Таблиця 2

Прогнозовані дані щодо розподілу типових компонентів сировинної бази полімодального доменного процесу між товарною продукцією та відходами, зведеному до відносних кількісних показників товарного чавуну, %

Компоненти сировинної бази	Склад компонента у первинній сировині	Типова Технологія		Полімодальна технологія*	
		Товарна продукція	Промисловий відхід	Товарна продукція	Промисловий відхід
Залізо	16 – 72	60	–	60	–
Кремній	8 – 10 >	–	25 – 30	23 – 28	~2
Фосфор руди	0,15	–	0,1 – 0,25	0,15	–
Фосфор коксу	0,015 – 0,04	–	0,03 – 0,05	0,01 – 0,04	–
Вуглець коксу	80 – 88	3 – 4	–	3 – 3,5	0,5
Сірка руди	0,1 – 0,3	–	0,11 – 0,25	0,2	–
Сірка коксу	0,5 – 1,8	–	0,05 – 0,10	–	–
Миш'як	0,05 – 0,09	–	0,03 – 0,05	0,01 – 0,05	–
СаО вапняку	55	–	3 – 4	~2	–
SiO ₂ вапняку	45	–	2,5 – 3,0	~1	–
Коксова зола	8 – 12	–	8 – 10	–	5 – 11
ВСЬОГО:	–	63 – 64	33,3 – 40,7	89,37 – 94,9	7,5 – 13,5

* – оціночні варіанти розподілу компонентів, задіяних в технологічному процесі, якщо в ньому присутні полімодальні технології.

суться з обережністю до можливостей кардинально перебудувати встановлений технологічний процес в будь-якій галузі виробництва. Однак глобальний характер процесів накопичення промислових відходів змусить шукати нові шляхи їх мінімізації, адже це вже пов'язано з існуванням людини на нашій планеті. І це стосується абсолютної кількості існуючих і нових технологій.

Висновки. Створення полімодальних технологій, в принципі, можливо, якщо при їх проектуванні враховувати такі технологічні умови, як структуризація сировинної бази на основі принципу термодинамічної двоєдності і формування джерел енергії, здатних систематично впливати на максимально можливу частину компонентів сировини в технологічному процесі на межі термодинамічної невірноваженості.

Література

1. EUROSLAG, The European Association Representing Metallurgical Slag Producers and Processors. Statistics. URL: <http://www.euroslag.com/>. Accessed 27 November 2021.
2. Довкілля України за 2020 рік: статистичний збірник. Державна служба статистики України. Київ, 2021. С. 111–112.
3. Волошин В. С., Лістратова Н. Ю. Термодинаміка утворення відходів та стратегія розвитку сучасних енергетичних технологій. *V Міжнародна науково-практична конференція «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації»*, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України «Академперіодика». Київ, 2023. С. 139–142.
4. Волошин В. С. Заглушення відходоутворювання в джерелі виникнення – сучасний виклик у технологічних процесах. *Нац. Форум: «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології»*. Київ, 2018. С. 78–83.
5. Voloshyn V. S. Alternative method of control over wastes – a contemporary -environmental and economics system in Ukraine: Monograf. OKTAN PRINT s.r.o. Prague, 2019. P. 108–120.
6. Lyuty O. P. Metallurgical school of the Kyiv polytechnic institute and sources of electros slag remelting. *Зб. наук. праць: Історія науки і техніки*. Вип. 8. Вид. Державний економіко-технологічний університет транспорту. Київ, 2016. С. 166–176.