

Кухар Володимир Валентинович, доктор технічних наук, професор, проректор з науково-дослідної роботи, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», м. Запоріжжя, Україна, ORCID: 0000-0002-4863-7233

Чупринов Євген Валерійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри металургійних технологій, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, Україна, ORCID: 0000-0001-8605-3434

Навольнєв Ігор Юрійович, аспірант кафедри металургії та організації виробництва, ТОВ «Технічний Університет «Метінвест Політехніка»», м. Запоріжжя, Україна, ORCID: 0009-0002-0477-7522

ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИХТИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПАР НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ І ПРОДУКТИВНІСТЬ ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ: ПРОМИСЛОВА ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ

У статті досліджено енергоспоживання випалювальної машини, що забезпечує повний цикл термообробки залізрудних окатишів – від сушіння та підігріву до випалу, рекуперації та охолодження. Особливу увагу приділено впливу фізико-хімічних властивостей шихти, зокрема вологості, дисперсного складу та використання поверхнево-активних речовин (ПАР), на загальні питомі витрати електроенергії та природного газу, а також на продуктивність агрегату. Промислові випробування проведено на одному з провідних гірничозбагачувальних комбінатів Кривбасу у зв'язку з переходом з базового (власного) концентрату на сировину іншого підприємства регіону, оброблену неіоногенною ПАР. Встановлено, що підвищена дисперсність і гідрофільність нового концентрату потребували додаткового зволоження шихти, що суттєво вплинуло на теплові режими машини та загальне енергоспоживання. На основі зібраних експериментальних даних побудовано регресійні моделі, які дозволяють кількісно прогнозувати питомі витрати електроенергії й газу залежно від змін технологічних параметрів. Показано, що ключовими факторами впливу є вологість шихти та добова продуктивність випалювального агрегату. Зафіксовано зростання питомих витрат електроенергії на 17,73 % і природного газу на 33,25 % при одночасному зниженні продуктивності на 9,55 %. Результати є актуальними для фахівців у галузях енергоменеджменту, електроенергетики та теплотехніки в металургії, зокрема при розробці заходів з оптимізації енерговитрат у промислових умовах.

Ключові слова: залізрудні окатиші; випалювальна машина; поверхнево-активні речовини (ПАР); шихта; енергоспоживання; природний газ; електроенергія; дисперсність концентрату; вологість; продуктивність; промислові випробування; регресійне моделювання

Вступ. Забезпечення енергоефективності процесів виробництва залізрудних окатишів є одним із актуальних викликів розвитку гірничо-металургійної галузі в умовах глобальних тенденцій на декарбонізацію виробництва та перехід до "зеленої" металургії [1]. Ефективне використання енергоресурсів сприяє поліпшенню економічної стійкості підприємств і зниженню негативного впливу на довкілля шляхом скорочення викидів парникових газів. Наприклад, у роботах [2, 3] зазначено, що виробництво залізрудних окатишів, яке є важливим проміжним продуктом для металургійної переробки, розглядається як один із пріоритетних напрямків для впровадження енергоощадних рішень у сталевиробній промисловості.

Процес отримання окатишів включає процес збагачення руд і отримання концентрату, формування сирих окатишів шляхом огрудкування та їх сушіння [4, 5]. Основними

джерелами енергоспоживання є електроенергія для роботи змішувачів, огрудкувачів, тягодуттєвого обладнання, конвеєрів, укладальників та іншого обладнання, а також тепла енергія для видалення вологи під час сушіння. Враховуючи комплексну складність технологічного обладнання, необхідно забезпечувати пильний контроль його стану для мінімізації виробничих ризиків [6, 7]. Ефективність процесів сушіння сирих окатишів істотно залежить від фізико-хімічних властивостей шихти, зокрема вологості концентрату і сирих окатишів, гранулометричного складу, вмісту в'язучих матеріалів та реологічних характеристик суміші [8–11], які формуються на попередніх стадіях. Однією з таких стадій є подрібнення залізородної сировини, ефективність якого визначається, зокрема, зносостійкістю тіл для подрібнення; як показано у [12], підвищення їх довговічності сприяє стабілізації гранулометричних і фізико-хімічних параметрів концентрату, що позитивно впливає на подальшу ефективність виробництва окатишів. Реологічні властивості вологого концентрату істотно впливають на формування сирих окатишів, їх густину та міцність, що підтверджується результатами досліджень [13], де встановлено взаємозв'язок між моментом активації поверхні залізородного концентрату і фізико-механічними характеристиками «сирих» окатишів. Також дослідниками [14] встановлено, що реологічні характеристики залізородних суспензій залежать від вмісту твердих часток і гранулометричного складу, а додавання дрібних фракцій до грубозернистої пульпи суттєво знижує її в'язкість.

За даними [15], питомі витрати теплової енергії на сушіння мінеральних концентратів зазвичай становлять 800–1500 ккал на кілограм видаленої води (0,93–1,74 кВт·год/кг), що підкреслює вплив вологості (вогкості) концентрату на енергомісткість процесу. В роботі [16] встановлено, що при сушінні латеритної руди у промислових обертових сушарках з високою початковою вологістю (~27%) спостерігаються значні теплові втрати через корпус сушарки, що досягають 3,5% витраченої енергії палива (5,8 ГДж/год), що зумовлюється особливостями теплообміну та характеристиками вихідної сировини. З метою підвищення ефективності сушіння та зниження енерговитрат розробляються нові технології, зокрема мікрохвильове сушіння залізородних окатишів, яке, за даними [17], забезпечує прискорене видалення вологи за рахунок зниження енергії активації процесу і підвищення ефективної дифузії вологи у порівнянні з традиційним конвективним методом [15, 18]. Витрати енергії та теплові втрати у процесах збагачування оптимізують аналогічно до металургійних процесів – шляхом розробки математичних моделей, як це показано в роботі [19] для металургійного обладнання. Температурні режими та енергоспоживання регулюють за допомогою засобів автоматичного керування й систем температурного моніторингу [20].

Вологість шихти та сирих окатишів є одним із головних чинників, що визначає витрати енергії на сушіння [4, 15, 21]: підвищення вологості потребує більше тепла для випаровування та збільшує час сушіння. Це веде до зниження продуктивності обладнання і підвищення частки браку через погіршення міцності сирих окатишів. Гранулометричний склад шихти також суттєво впливає на енергоспоживання [4, 5, 9, 15]: дрібні фракції швидше висушуються, але надлишок дрібних частинок сприяє втратам продукції. Великі окатиші вимагають довшого сушіння, що потребує додаткових витрат енергії та знижує темпи виробництва.

Одним із напрямків удосконалення технології виробництва залізородних окатишів є впровадження нових типів концентратів, оброблених поверхнево-активними речовинами (ПАР) [11, 21]. Ефекти застосування ПАР є досить протиречивими. З одної сторони, застосування ПАР змінює змочуваність і реологічні властивості концентрату, покращуючи його здатність до огрудкування та зменшує злежуваність. При цьому, як показано у [22], обробка концентрату аніонними та неіонними ПАР дозволяє додатково знизити вологість концентрату на 2–4% за рахунок зміни поверхневих властивостей частинок. Водночас обробка концентрату ПАР супроводжується підвищенням вологості шихти та зміною структури поверхні частинок. Дослідниками [23] встановлено, що використання поверхнево-активних флотаційних реагентів (зокрема Atrac) у залізородному концентраті призводить до підвищення пористості та зниження міцності сирих окатишів, що погіршує їх поведінку під час сушіння і може сприяти зростанню енерговитрат через зниження проникності шару і утворення пилу. Підвищена воло-

гість ускладнює процес сушіння, збільшує питомі витрати енергії та може знижувати продуктивність обпалювальної машини. Крім того, зміни у формуванні шару сирих окатишів на конвеєрних машинах можуть призводити до нестабільності технологічного процесу [4, 15]. Поряд із цим використання ПАР забезпечує покращення дисперсності концентрату та стабілізацію гранулометричного складу сирих окатишів. Також спостерігається потенційне зниження витрати в'язучих речовин, зокрема бентоніту, що позитивно впливає на міцність сирих окатишів [11, 24]. Усі ці зміни потребують комплексного врахування при оцінці впливу ПАР на енергоспоживання та продуктивність виробничого процесу.

Проблема прогнозування енергоспоживання є особливо актуальною для гірничозбагачувальних комбінатів, в тому числі рудозбагачувальних фабрик Кривбасу, на яких здійснюється виробництво залізрудних окатишів для металургійної галузі. На цих підприємствах виникають технологічні труднощі, пов'язані з підвищенням вологості концентрату, необхідністю оптимізації витрати бентоніту для забезпечення якості сирих окатишів та застосуванням поверхнево-активних речовин (ПАР). При плановому переході базового Підприємства «А» на концентрат виробництва Підприємства «Б» відбуваються зміни фізико-хімічних характеристик шихти, що призводять до змін продуктивності технологічного обладнання та витрат електроенергії. У зв'язку з цим актуальним є завдання встановлення кількісних залежностей між характеристиками сировини та параметрами енергоспоживання і продуктивності. В цій статті умовні назви "Підприємство «А»" та "Підприємство «Б»" використано з міркувань конфіденційності та дотримання принципу комерційної нейтральності, щоб уникнути ненавмисної реклами або антиреклами конкретних виробників.

Метою роботи було встановлення кількісних залежностей між фізико-хімічними характеристиками шихти (зокрема вологістю, гранулометричним складом та використанням поверхнево-активних речовин) і питомими витратами енергоносіїв (електроенергії та природного газу), а також продуктивністю випалювального агрегату у промислових умовах Підприємства «А» при переході з базового концентрату на модифікований ПАР концентрат виробництва Підприємства «Б».

Матеріали та методи. Перед початком випробувань було підготовлено обладнання всього технологічного комплексу: дозатори, млинові тракти, чашові огрудковувачі, роликовий трипродуктовий грохот Metal7 (з зазорами 16,0 мм та 9,0 мм), грохот ГСТ, димососи, а також проведено перевірку й налагодження вагового обладнання.

Експериментальні дослідження проведено на промисловій випалювальній машині Підприємства А, призначеній для термічної обробки залізрудних окатишів. Установка є безперервною конвеєрною системою з ланцюговим транспортером і візками, які переміщують шар окатишів через зони сушіння, підігріву, випалу, рекуперації та охолодження. Конструкція машини включає інжекційні пальники, газорозподільні камери з газоповітря розподільними пристроями, систему подачі рециркульованого теплоносія та автоматизовану систему регулювання температурних режимів. Рекуперація тепла забезпечує підвищену енергоефективність і зниження витрат палива.

Основні технічні характеристики випалювальної машини (Підприємство «А»): Річна продуктивність – 2,4 млн т; поточна – 300 т/год; питома продуктивність – 0,893 т·м²/год; шар сирих окатишів – 300 мм; кількість візків – 142; газоповітряних камер – 28; швидкість руху візків – 0,6 – 2,5 м/хв; маса візка – 10,3 т; розподіл зон: сушіння, нагрів, випал, рекуперація (макс. зона –рекуперація 37,5 %); максимальна температура випалу – 1350 °С; теплоносій на виході – до 550 °С; питома витрата теплоти – 533,68 МДж/т; природного газу – 17,9 м³/т; електроенергії – 30,7 кВт·год/т; температура окатишів на виході – 100 °С; потужність привода – 32 кВт; загальна маса – 4600 т.

Вихідні матеріали та умови проведення випробувань. Промислові випробування проводили у зв'язку з виробничою необхідністю повного переходу з концентрату Підприємства «А» на концентрат, вироблений Підприємством «Б». Обидва концентрати мали високий вміст заліза (понад 67 %), однак концентрат Підприємства «Б» вирізнявся підвищеною дисперсністю (фракція –0,056 мм: 98,0–98,6 %; фракція +0,056 мм (відповідно залишок): 1,4–2,0 %). Під час попередніх випробувань було встановлено, що підвищена дисперсність концентрату Підприємства «Б» негативно впливає на огруд-

ковуваність (комкуємість) шихти, що спричиняє збільшення обсягу сирого повернення та зниження стабільності формування шару окатишів. Для компенсації цієї проблеми застосовували попередню обробку концентрату Підприємства «Б» поверхнево-активною речовиною (ПАР) Clearon S955 – неіоногенною сполукою на основі етоксильованого ізотридеканола, яка застосовується переважно для покращення фільтрації та зневоднення концентрату після збагачення. У досліджуваному випадку ПАР також забезпечувала покращену змочуваність і агрегацію частинок концентрату, що сприяло стабілізації процесу огрудкування тонкодисперсного концентрату Підприємства «Б». Водночас зниження природної вологості концентрату після зневоднення вимагало додаткового зволоження у змішувачі та огрудковувачі, що в підсумку призвело до збільшення загальної вологості шихти. Це, у свою чергу, впливає на збільшення енергетичних витрат на сушіння окатишів.

Були підготовлені і закладовані шихтові матеріали (бентоніт, вапняк), організовано транспортування і складування концентрату Підприємства «Б» на склад збагачувальної фабрики Підприємства «А» із дотриманням вимог до чистоти і роздільності партій. Для стабілізації механічних властивостей сирих окатишів було скориговано витрату бентоніту у складі в'язучого компоненту.

Випробування тривали вісім діб. Упродовж перших двох днів випалювальна машина працювала на базовому концентраті Підприємства «А» для стабілізації технологічного режиму та фіксації контрольних показників. Починаючи з 21:00 другого дня було повністю введено концентрат Підприємства «Б» (оброблений ПАР), який завантажували після спустошення бункерів і використовували до завершення експерименту. Усі ключові технологічні параметри (витрати сировини, газу, електроенергії, температури, характеристика продукції) фіксувалися погодинно, позмінно та усереднено за добу, що забезпечило можливість порівняльного аналізу впливу типу концентрату на ефективність процесу.

Методи та засоби вимірювання. Вологість концентрату визначали зважуванням проб до та після сушіння у шафі БСЛ-1.0.3 (прямоток, теплоносій – топкові газу) при 105 ± 5 °C до сталої маси. Гранулометричний склад сирих окатишів визначали ситовим методом (згідно ДСТУ 3210-95 / ISO 4701:2017) з використанням віброгрохота 8ГВ-3Я з трьохвальним віброзбуджувачем (діапазон 5–20 мм). Продуктивність фіксували стрічковими вагами Schenck MULTIDOS (похибка 0,1–1,0 %, до 1000 т/год, швидкість ленти – до 0,2 м/с). Облік витрат енергоносіїв: витрати природного газу визначали за лічильниками Elster BK-G1000 у вузлах комерційного обліку, витрати електроенергії – за промисловими електролічильниками НІК 2303 АРЗ (клас точності 1.0). Питомі витрати розраховували з урахуванням змінного випуску продукції на основі хронометрування та добового обліку.

Визначення факторів, що впливають на результат. При проведенні дослідно-промислових випробувань здійснювали щогодинний контроль наступних технологічних параметрів: продуктивності машини (т/год), швидкості руху візків (м/хв), температури в зоні сушіння (°C), розрідження (даПа), кількості сирих окатишів на грохоті (т/год), витрати бентоніту (кг/т), витрати обпаленого повернення (т/год), вологості сирих окатишів (%), питомої витрати електроенергії (кВт·год/т), питомої витрати природного газу (м³/т) та ін. Дані систематизовували у таблицях щоденного обліку (із розрахунком усереднених значень за добу), для встановлення змін у роботі обладнання при переході від використання базової сировини до концентрату Підприємства «Б», модифікованого ПАР. Провели класифікацію факторів (див. табл. 1), що впливають на результат у вигляді продуктивності машини, витрат електричної енергії та розходу природного газу.

Враховуючі отримані ефекти, побудували діаграму Ісікава, яка показує вплив класифікованих технологічних факторів на результат (рис. 1).

Для зменшення кількості факторів впливу застосовували метод експертних оцінок, що дозволило скоротити їх кількість до 10 (у випадку віднесення продуктивності до фактору впливу, кількість факторів збільшується до 11). Логіка скорочення кількості факторів полягала у тому числі в нівелюванні впливом технологічних факторів, значення яких не отримали відчутних змін при переході з однієї сировини на іншу, тобто, за інших рівних умов, їх вплив є рівнозначним.

Таблиця 1 – Класифікація факторів впливу

Обладнання (Machine)	Матеріали (Material)	Методи (Method)	Вимірювання (Measurement)
Випалювальна машина, інжекційні пальники, ГПРП, грохот Metal7, грохот ГСТ, димососи, шафа БСЛ-1.0.3, віброгрохот 8ГВ-3Я	Бентоніт (витрата, фракція, вологість, набухання), вапняк, обпалене повернення, вологість концентрату та сирих окатишів, фракція –0,056 мм, вміст Fe, SiO ₂ , CaO+MgO, ПАР Clearon S955	Порядок подачі концентратів, дозування, стабілізація параметрів, використання тимчасової карти режимів	Визначення вологості (шафа), ситовий аналіз (сита Ø200 мм), стрічкові ваги Schenck, лічильники Elster BK-G1000, електролічильники НІК 2303 AP3
Людський фактор (Man)	Управління (Management)	Обслуговування (Maintenance)	Середовище (Mother Nature)
Персонал, ознайомлений з методикою; ручне та/або автоматизоване керування режимами; хронометрування	Організація транспортування, складування, розробка карт, перевірка дозаторів і бункерів	Профілактика, налаштування вузлів і приладів, техобслуговування	Температура в зоні сушіння, розрідження в горні та камерах, тиск у ГПК, вологість середовища

На рис. 1 фактори впливу, які враховували у подальших розрахунках (при створенні регресійних моделей), виділені жирним шрифтом. В процесі отримання рівнянь регресії за методикою Data Analysis додатково перевіряється вплив кожного з обраних факторів, що дозволяє з'ясувати нівелювання впливу деяких факторів на результат із відповідним додатковим скороченням складових математичної моделі.



Рисунок 1 – Причинно-наслідкова діаграма Ісикава («8М») впливу об'єктивних факторів на продуктивність випалювальної машини, витрати електричної енергії та розхід природного газу

Результати. У ході промислових випробувань було зібрано та систематизовано подовбі середні значення технологічних параметрів, що охоплюють два періоди: використання базового концентрату Підприємства «А» (дні 1–2) та перехід на концентрат Підприємства «Б» з обробкою ПАР (дні 3–8). В табл. 2 та 2а наведено значення

ключових факторів впливу (X) та результативних показників (Y), включно з середньодобовими значеннями, повним діапазоном коливань кожного з параметрів (*min...max*), а також зведеними середніми по кожному з етапів.

Дані в табл. 2 та 2а структуруються відповідно до формул регресійного аналізу (1) та (2), що покладені в основу математичних моделей залежності вихідних параметрів від ключових факторів впливу. Зміна сировини супроводжувалась варіаціями у витратах основних компонентів шихти, фізико-хімічних властивостях концентрату, параметрах формування сирих окатишів та ефективності процесу випалювання.

На рис. 2 наведено графічне представлення динаміки трьох ключових показників – продуктивності, питомої витрати електроенергії та природного газу – впродовж восьми діб. Добовий формат подання дозволяє простежити відгук технологічної системи на зміну сировини та зафіксувати перехідний характер третьої доби, яка супроводжувалась найбільшими відхиленнями. Ця інформація врахована при побудові усереднених значень для кожного з періодів.

Таблиця 2 – Результати промислового експерименту з отримання залізородних окатишів при переході з концентрату Підприємства «А» на концентрат Підприємства «Б», оброблений ПАР

Назва фактору (X) або параметру (Y)	Одиниці вимірювання	Формула		Діапазон (min...max)
		(1)	(2)	
Вигляд рівняння регресії (формули)				
1. $Y_n(1) = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5 + b_6 \cdot X_6 + b_7 \cdot X_7 + b_8 \cdot X_8 + b_9 \cdot X_9 + b_{10} \cdot X_{10}$				
Витрати бентоніту	кг/т	X_1	X_1	14,55...15,88
Витрати обпаленого повернення	т/год	X_2	X_2	13,5...16,54
Витрати вапняку	кг/т	X_3	X_3	5,3...8,96
Вміст Fe	%	X_4	X_4	67,81...69,86
Вміст вологи у сирому окатиші	%	X_5	X_5	8,37...9,33
Міцність на роздавлювання	кг/окатиш	X_6	X_6	1,3...1,48
2. $Y_n(2) = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5 + b_6 \cdot X_6 + b_7 \cdot X_7 + b_8 \cdot X_8 + b_9 \cdot X_9 + b_{10} \cdot X_{10} + b_{11} \cdot X_{11}$				
Міцність на скидання	раз	X_7	X_7	3,83...4,18
Клас 10-14 мм	%	X_8	X_8	59,82...64,12
Висота шару сирих окатишів	мм	X_9	X_9	315...357
Тиск у вакуумній камері	даПа	X_{10}	X_{10}	271...482
Продуктивність (n = 3)	т/год	$Y_3(1)$	X_{11}	243,6...298,0
Питома витрата електроенергії (n = 1)	кВт/т·год	$Y_1(1)$	$Y_1(2)$	33,99...56,35
Питома витрата газу (n = 2)	м³/т·год	$Y_2(1)$	$Y_2(2)$	4.14...10.7

Аналіз табл. 3 свідчить про те, що при побудові регресійних моделей (1) і (2) для прогнозування питомих витрат електроенергії (Y_1), природного газу (Y_2) і продуктивності агрегату (Y_3), частина факторів виявилася статистично незначущою. Це підтверджується нульовими значеннями відповідних коефіцієнтів b у рівняннях регресії.

Зокрема, у моделі (1), побудованій без врахування продуктивності як фактора, значення коефіцієнтів b_4 , b_6 та b_7 для $Y_1(1)$, $Y_2(1)$ та $Y_3(1)$ дорівнюють нулю. Це вказує на те, що фактори «вміст Fe» (X_4), «міцність на роздавлювання» (X_6) та «міцність на

скидання» (X_7) не зробили суттєвого внеску в пояснення варіацій у споживанні енергоносіїв у досліджуваних умовах. Ймовірно, у межах експерименту ці параметри залишалися відносно стабільними, або їхній вплив був слабшим порівняно з вологою, витратами бентоніту чи поверненням.

Таблиця 2а – Результати промислового експерименту з отримання залізородних окатишів при переході з концентрату Підприємства «А» на концентрат Підприємства «Б», оброблений ПАР

Сировина	День	Середньодобові значення												
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11} / Y_3 (1)	Y_1 (1, 2)	Y_2 (1, 2)
«А»	1	14,55	13,50	5,30	69,86	8,37	1,44	4,18	63,73	356	482	298	34,71	4,14
	2	14,55	15,88	5,30	69,86	8,38	1,48	4,13	64,12	357	472	298	33,99	4,22
Середнє за день 1-2		14,55	14,69	5,3	69,86	8,375	1,46	4,155	63,925	356,5	477	298	34,35	4,18
«Б» (з ПАР)	3	15,48	15,86	8,96	67,81	9,33	1,32	4,03	62,43	315	271	243,6	56,35	10,7
	4	15,88	15,58	8,96	67,81	8,70	1,30	3,83	59,82	329	284	272,6	36,71	4,59
	5	15,67	14,58	8,96	67,83	8,87	1,32	4,00	60,05	334	280	275,1	37,09	4,45
	6	15,00	13,71	8,96	67,82	8,80	1,31	3,98	59,82	337	282	275,3	36,78	4,56
	7	15,00	15,50	8,96	67,83	8,85	1,35	4,03	61,13	334	281	275,3	37,55	4,55
	8	15,00	16,54	8,96	67,87	8,80	1,34	4,02	60,03	334	287	275,3	38,18	4,59
Середнє за день 3-8		15,34	15,3	8,96	67,83	8,89	1,32	3,98	60,55	330,5	280,83	269,53	40,44	5,57

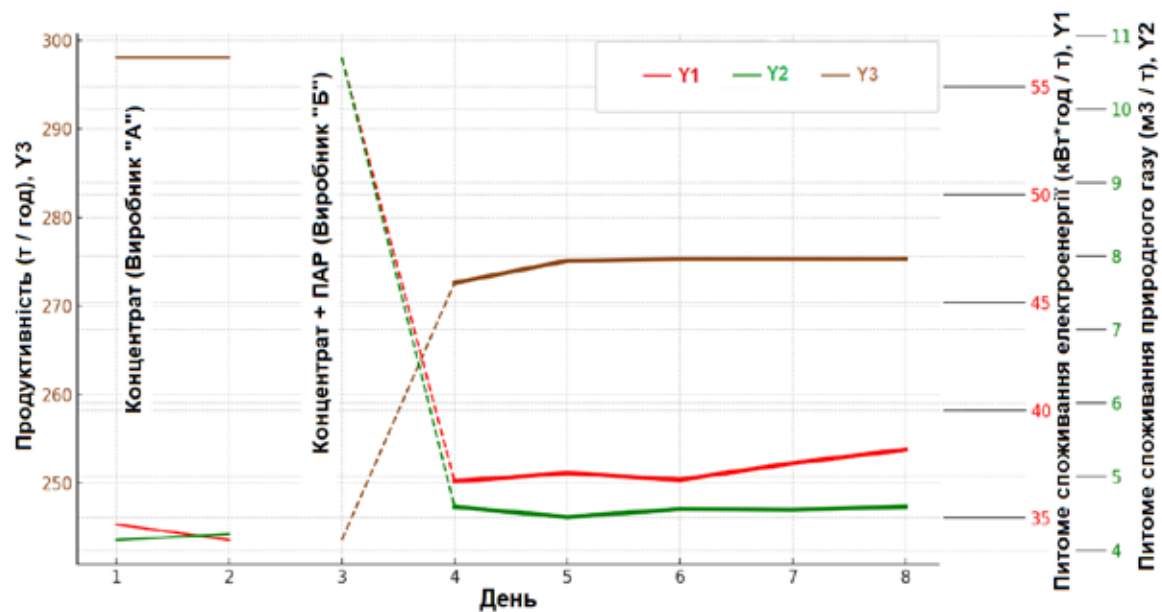


Рисунок 2 – Зміна продуктивності, питомих витрат енергії та природного газу при виробництві окатишів

Після математичної обробки результатів, наведених у табл. 2, отримали коефіцієнти рівнянь регресії (1) та (2), див. табл. 3. Коефіцієнти детермінації для всіх рівнянь склали $R^2 > 0,99$.

Таблиця 3 – Коефіцієнти до рівнянь регресії (1) та (2) з табл. 2
для прогнозування продуктивності та енергетичних витрат

Y	b_0	b_1	b_2	b_3 b_4	b_5 b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}
Без врахування продуктивності як фактору (формула (1))										
$Y_1(1)$	383,256	-4,216	-0,03	-9,773 0	18,846 0	0	-1,763	-0,712	-0,056	-
$Y_2(1)$	218,84	-1,691	-0,086	-6,795 0	3,851 0	0	-0,736	-0,278	-0,081	-
$Y_3(1)$	-847,902	7,26	0,627	29,624 0	-12,953 0	0	3,519	1,552	0,429	-
З врахуванням продуктивності як фактору (формула (2))										
$Y_1(2)$	149,703	-0,2	0,23	0 0	0 0	13,821	-0,21	0,003	0,05	-0,619
$Y_2(2)$	27,135	0,073	0,061	0 0	0 0	0,835	0,095	0,09	0,015	-0,247

У моделі (2), де враховано продуктивність у вигляді фактору (X_{11}), вплив ще більшої кількості факторів було нівельовано: зокрема, для $Y_1(2)$ та $Y_2(2)$ нульовими стали коефіцієнти при X_3 , X_4 , X_5 та X_6 . Це свідчить про те, що після врахування продуктивності як впливового макропараметра, залишковий внесок таких показників, як «витрати вапняку» (X_3), «вміст Fe» (X_4), «вологість сирих окатишів» (X_5) або «міцність на роздавлювання» (X_6), став статистично незначним. Інакше кажучи, ефект цих факторів було «поглинуто» продуктивністю, яка сама суттєво впливає на енерговитрати, знижуючи або підсилюючи їх через механізм сталих фонових теплових втрат.

Таким чином, нульові коефіцієнти вказують не на відсутність фізичного впливу, а на домінування інших, сильніших факторів у межах цього конкретного експериментального плану. Це типовий результат багатофакторного аналізу, коли взаємозв'язки між параметрами можуть перебивати або маскувати вплив менш потужних змінних.

У ході промислових випробувань було встановлено, що концентрат Підприємства «Б» характеризується вищим вмістом дрібнодисперсної фракції ($-0,056$ мм) порівняно з базовим концентратом Підприємства «А». Така зміна гранулометричного складу призвела до зниження природної огрудкованості шихти, ускладнивши формування стабільних сирих окатишів. З метою компенсації гірших грануляційних властивостей було застосовано поверхнево-активні речовини (ПАР) у поєднанні з цілеспрямованим додатковим зволоженням концентрату. Зростання витрат бентоніту (з 14,55 до 15,34 кг/т) було зумовлене необхідністю посилити зв'язувальні властивості шихти через нижчу природну огрудкованість концентрату Підприємства «Б», викликану його вищою дисперсністю та гіршою агрегацією частинок.

У результаті таких заходів середній вміст води в концентраті зріс з 9,4 % до 9,9 %, і, як наслідок, в сирих окатишах – з 8,38 % до 8,89 %. Це свідчить як про підвищену гідрофільність обробленого концентрату, так і про технологічну необхідність забезпечення стабільного процесу огрудкування шляхом зволоження. Водночас підвищення вологовмісту у шихті суттєво ускладнило подальшу стадію сушіння.

Після переходу на концентрат Підприємства «Б» було зафіксовано зниження середньої продуктивності випалювальної машини на 9,6 % – з 298 до 269,5 т/год. Найнижчий показник продуктивності (243,6 т/год) припав на третю добу експерименту, коли здійснювалась адаптація теплового режиму до нових умов. Саме в цей період відзначено пікове споживання енергоносіїв: 56,35 кВт·год/т електроенергії та 10,7 м³/т природного газу. Надалі витрати стабілізувалися, однак залишалися вищими за базові.

Загалом, середнє зростання питомих витрат електроенергії становило +17,7 % (з 34,35 до 40,44 кВт·год/т), а природного газу – +33,3 % (з 4,18 до 5,57 м³/т). Основною причиною цього вбачається необхідність у більш тривалому сушінні через підвищену вологість і гіршу проникність шару сирих окатишів, сформованого з дрібнішого мате-

ріалу. Крім того, зміна реологічних властивостей суміші та зниження початкової механічної міцності окатишів вимагали застосування більш обережних температурних режимів із подовженими циклами нагріву.

Дисперсні властивості концентрату Підприємства «Б», що відрізняються від базового матеріалу, зумовили необхідність його модифікації з використанням ПАР. Узагальнені причинно-наслідкові зв'язки впливу такого втручання на процес огрудковування та енерговитрати наведено на схемі рис. 3 («Проблема – Дія – Результат»).



Рисунок 3 – Схема «Проблема – Дія – Результат»

Результати проведеного аналізу узагальнені у табл. 4.

Таблиця 4 – Аналіз результатів промислового експерименту з отримання залізорудних окатишів при переході з концентрату Підприємства «А» на концентрат Підприємства «Б», оброблений ПАР

Параметр	Базовий концентрат (Виробник «А»)	Концентрат + ПАР (Виробник «Б»)	Δ (абс.)	Δ (%)
Розхід бентоніту, кг/т	14,55	15,34	$\uparrow 0,79$	$\uparrow 5,43$ %
Вологість сирого окатишу, %	8,375	8,89	$\uparrow 0,515$	$\uparrow 6,15$ %
Питомі витрати електроенергії, кВт/т·год	34,35	40,44	$\uparrow 6,09$	$\uparrow 17,73$ %
Питомі витрати природного газу, м ³ /т·год	4,18□	5,57	$\uparrow 1,39$	$\uparrow 33,25$ %
Продуктивність, т/год	298	269,53	$\downarrow 28,47$	$\downarrow -9,55$ %

Додатковим чинником зростання енерговитрат могла стати тимчасова нестабільність теплових режимів у перехідний період. У цей час оператори могли застосовувати знижені температури чи швидкість подачі газу для запобігання руйнуванню окатишів, що, у поєднанні зі зниженням продуктивності, призвело до зростання питомих витрат енергії через сталі фонові теплові втрати агрегату.

Таким чином, застосування ПАР у складі технології обробки концентрату Підприємства «Б» сприяло покращенню змочуваності та агрегації частинок, однак водночас зумовило підвищення вологості суміші, погіршення умов сушіння та зростання витрат енергоносіїв у перехідному періоді.

У межах проведених випробувань оцінку впливу ПАР на результати виділити важко, оскільки зміна концентрату супроводжувалася одночасною зміною низки інших, як фізико-хімічних так і технологічних факторів. Крім того, відсутні дані про лабораторне визначення гідрофільності концентратів, що обмежує можливість кількісної оцінки ефекту змочуваності. Таким чином, перспективним напрямом подальших досліджень може бути проведення цільових тестів із контрольованим дозуванням ПАР, що дозволить точно виявити його вплив на властивості шихти. Крім того, необхідні випробування концентратів з варіативною вологістю, що допоможе уточнити роль зволоження в механізмі зміни енерговитрат.

Висновки. Проведено промислові випробування на Підприємства «А» із переходом від власного концентрату до концентрату Підприємства «Б», обробленого ПАР. Експерименти включали два етапи: дні 1–2 – базовий концентрат Підприємства А, дні 3–8 – концентрат Підприємства Б з ПАР. Порівняно з базовим періодом, нова сировина викликала зміну фізико-хімічних властивостей шихти, що вплинуло на стабільність формування та сушіння окатишів. Отримані результати відображають загальний вплив модифікації концентрату на тепловий режим і енергоспоживання повного циклу роботи випалювального агрегату, включаючи сушіння, випал, рекуперацію та охолодження.

Отримано узагальнені залежності між характеристиками сировини та технологічними показниками. Для їх кількісного опису застосовано регресійний аналіз. Побудовані моделі дозволили прогнозувати питомі витрати енергоносіїв і продуктивність випалювальної машини. Водночас з'ясовано, що такі фактори, як вміст Fe та міцність сирих окатишів, мали статистично незначний вплив порівняно з вологістю і продуктивністю.

Встановлено, що використання концентрату Підприємства «Б» з ПАР вимагало додаткового зволоження концентрату (вміст вологи збільшили в середньому з 9,4% до 9,9%, тобто на +0,5%), що призвело до зростання питомої витрати електроенергії з 34,35 до 40,44 кВт·год/т (на +17,73 %) та збільшення питомої витрати природного газу – з 4,18 до 5,57 м³/т (на +33,25 %). Відповідно зафіксовано зниження середньої продуктивності випалювальної машини з 298,0 до 269,5 т/год (на –9,55 %). Також було виявлено підвищення вологості сирих окатишів з 8,375 до 8,89 % (на +6,15 %) і збільшення витрати бентоніту з 14,55 до 15,34 кг/т (на +5,43 %). Отримані результати свідчать про зростання енерговитрат та зниження ефективності процесу при використанні концентрату Підприємства «Б», що пояснюється його підвищеною дисперсністю та необхідністю зволоження, що ускладнює процес сушіння і впливає на стабільність теплового режиму.

Загалом результати дослідження вказують на необхідність індивідуального налаштування режимів сушіння при переході на нові типи концентратів. У подальших дослідженнях доцільно проводити лабораторні випробування із варіюванням вмісту ПАР та вологості для точнішої оцінки їхнього впливу на енерговитрати та якість продукції. Окрему увагу слід приділити стабілізації теплових режимів у перехідні періоди, що може суттєво покращити енергоефективність виробництва.

Бібліографічний перелік

1. Hirlekar O., Kolte A. and Vasa L. Transition in the mining industry with green energy: Economic dynamics in mining demand. *Resources Policy*, 2025. Vol. 100. Art. № 105409. doi: 10.1016/j.resourpol.2024.105409.
2. Hooey L., Riesbeck J., Wikström J.-O. and Björkman B. Role of ferrous raw materials in the energy efficiency of integrated steelmaking. *ISIJ International*, 2014. Vol. 54. № 3. P. 596–604. doi: 10.2355/isijinternational.54.596.
3. He K., and Wang L. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. Vol. 70. P. 1022–1039. doi: 10.1016/j.rser.2016.12.007.
4. de Moraes S. L., de Lima J. R. B., and Ribeiro T. R. Iron Ore Pelletizing Process: An Overview. *Iron Ores and Iron Oxide Materials*, 2018. V. Shatokha, Ed. London, U.K.: IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.73164.
5. Miranda T., Montero I., Sepúlveda F. J., Arranz J. I., Rojas C. V. and Nogales S. A review of pellets from different sources/ *Materials*, 2015. Vol. 8. № 4. P. 1413–1427. doi: 10.3390/ma8041413.
6. Kruzhilko O., Maystrenko V., Tkalych I., Polukarov Yu., Kalinchyk V. P., Neklonskyi I. and Ryzhchenko O. Study of the harmful factors influence on the occupational risk level: The example of the Ukrainian mining industry. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2022. Vol. 110. № 1. P. 35–41. doi: 10.5604/01.3001.0015.7029.
7. Kruzhilko O., Volodchenkova N., Maystrenko V., Bolibrukh B., Kalinchyk V. P., Zakora A., Feshchenko and Yeremenko S. Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprises. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2021. Vol. 108. №. 1. P. 35–41. doi: 10.5604/01.3001.0015.4797.
8. Azimova L. and Mirbabayeva N. Method for reducing fuel consumption when roasting pellets from magnetite iron ore concentrate/ *Engineering Headway*, 2024. Vol. 7. P. 45–50. doi: 10.4028/p-hG5G1U.

9. Iljana M., Paananen T., Mattila O., Kondrakov M. and T. Fabritius. Effect of iron ore pellet size on metallurgical properties. *Metals*, 2022. Vol. 12. № 2. P. 302. doi: 10.3390/met12020302.
10. Savchenko I., Shapoval O., Bakharev V., Chupilko T., Babaryka M. and Dzyna N. Mathematical model of rheological processes of composite materials deformation. *Proc. 2022 IEEE 4th Int. Conf. Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenichuk, Ukraine, Oct. 2022. P. 01–06, doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005658.
11. Eisele T. C. and Kawatra S. K. A review of binders in iron ore pelletization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2010. Vol. 24. № 1. P. 1–90. doi: 10.1080/08827500306896.
12. Koval A. D., Efremenko V. G., Brykov M. N., Andrushchenko M. I., Kulikovskii R. A. and Efremenko A. V. Principles of development of grinding media with increased wear resistance. Part 2. Optimization of steel composition to suit conditions of operation of grinding media. *Journal of Friction and Wear*, 2012. Vol. 33. № 2. P. 153–159. doi: 10.3103/S1068366612020079.
13. Kumeda K., Nakamura H., Ohsaki S., Watano S., Fujiwara S., Iwami Y. and Murao A. Relationship between the agitation torque of the wet iron ore powder and pellet properties. *ISIJ International*, 2025. Vol. 65. № 1. P. 62–69. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-281.
14. Kumar S., Singh M., Singh J. and et al. Rheological characteristics of uni/bi-variant particulate iron ore slurry: Artificial neural network approach. *Journal of Mining Science*, 2019. Vol. 55. № 2. P. 201–212. doi: 10.1134/S1062739119025468.
15. Mujumdar A. S. Drying in mineral processing. *Handbook of Industrial Drying*. 2nd ed., rev. and expanded. Vol. 2. A. S. Mujumdar, Ed. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 1995. P. 921–929.
16. Sheehan M. E. A systems and resistance analysis of heat loss through an industrial flighted rotary ore dryer. *Proc. 13th Int. Heat Transfer Conf. (IHTC-13)*, Kyoto, Japan, 2006. P. 9. doi: 10.1615/IHTC13.p24.110.
17. Athayde M., Cota M. and Covcevich M. Iron ore pellet drying assisted by microwave: a kinetic evaluation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2018. Vol. 39. № 4. P. 266–275. doi: 10.1080/08827508.2017.1423295.
18. Souza A. S. E., de Souza Pinto T. C., Sarkis A. M., de Pádua T. F. and Béttega R. Energy Analysis of the Convective Drying of Iron Ore Fines. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 2023. Vol. 29. № 3. P. 189–200. doi: 10.2298/CICEQ220208026S.
19. Kurpe O. H., Kukhar V. V., Klimov E. S. and S. M. Chernenko. Improvement of process parameters calculation for coil rolling at the steckel mill. *Proc. 2020 Int. Russian Conf. Materials Science and Metallurgical Technology (RusMetalCon)*, 2019. Vol. 989. P. 609–614. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.609.
20. Khrebtova O., Shapoval O., Markov O., Kukhar V., Hrudkina N. and Rudych M. Control systems for the temperature field during drawing, taking into account the dynamic modes of the technological installation. *Proc. 2022 IEEE 4th Int. Conf. Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenichuk, Ukraine, 2022. P. 1–6. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005724.
21. Souza Pinto T. C., Souza A. S., Batista M. J. N., Sarkis A. M., Leal Filho L. S. and Pádua T. F. Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. *Drying Technology*, 2021. Vol. 39. № 10. P. 1359–1370. doi: 10.1080/07373937.2020.1747073.
22. Patra A. S., Makhija D., Mukherjee A. K., Tiwari R., Sahoo C. R. and Mohanty B. D. Improved dewatering of iron ore fines by the use of surfactants. *Powder Technology*, 2016. Vol. 287. P. 43–50. doi: 10.1016/j.powtec.2015.09.030.
23. Forsmo S. P. E., Forsmo S.-E., Björkman B. M. T. and Samskog P.-O. Studies on the influence of a flotation collector reagent on iron ore green pellet properties. *Powder Technology*, 2008. Vol. 182. № 3. P. 444–452. doi: 10.1016/j.powtec.2007.07.015.
24. Kawatra S. K. and Claremboux V. Iron ore pelletization: Part I. Fundamentals. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2022. Vol. 43. № 4. P. 529–544. doi: 10.1080/08827508.2021.1897586.

Kukhar Volodymyr, professor, doctor of technical sciences, Department of Metallurgy and Organization of Production, Technical University “Metinvest Polytechnic”, LLC, Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: 0000-0002-4863-7233

Chuprinov Evgeny, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies Department of Metallurgical Technologies, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine, ORCID: 0000-0001-8605-3434

Navolniev Igor, PhD student of the Department of Metallurgy and Production Organization, Department of Metallurgy and Organization of Production, Technical University “Metinvest Polytechnic”, LLC, Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: 0009-0002-0477-7522

EFFECT OF FEED MIX PROPERTIES AND SURFACTANT APPLICATION ON ENERGY CONSUMPTION AND PRODUCTIVITY OF AN INDURATION MACHINE: INDUSTRIAL ASSESSMENT AND PREDICTIVE MODELLING

The article investigates the energy consumption of an induration machine, which performs the full cycle of thermal treatment of iron ore pellets – from drying and preheating to induration, heat recovery, and cooling. Particular attention is given to the influence of the physicochemical properties of the feed mix, specifically its moisture content, particle size distribution, and the use of surfactants (surface-active agents), on the overall specific consumption of electric power and natural gas, as well as on the unit's productivity. Industrial-scale trials were conducted at one of the leading iron ore beneficiation plants in the Kryvbas region in connection with a transition from a baseline (in-house) concentrate to raw material produced by another regional plant, which had been pre-treated with a nonionic surfactant. It was found that the increased fineness and hydrophilicity of the new concentrate required additional moisture to be added to the feed mix, which significantly affected the thermal regime of the machine and overall energy consumption. Based on the collected experimental data, regression models were developed to quantitatively predict the specific consumption of electricity and gas as functions of technological parameters. The results demonstrate that the key influencing factors are the moisture content of the feed mix and the daily productivity of the induration unit. An increase of 17.73% in specific electricity consumption and 33.25% in specific natural gas consumption was recorded, accompanied by a 9.55% reduction in throughput. These findings are relevant for professionals in the fields of energy management, power engineering, and thermal analysis in metallurgy, particularly when designing strategies to optimize energy consumption under industrial operating conditions.

Keywords: iron ore pellets; induration machine; surfactants; feed mix; energy consumption; natural gas; electricity; concentrate fineness; moisture content; productivity; industrial trials; regression modeling