

УДК 669.162.263:621.1:620.9

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-15>

ОЦІНКА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ ЗАЛЕЖНО ВІД ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИХТИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

Навольнєв Ігор Юрійович,

аспірант кафедри металургії та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0002-0477-7522

Кухар Володимир Валентинович,

доктор технічних наук,

проректор з науково-дослідної роботи, професор кафедри металургії,

кафедри металургії та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

Чупринов Євген Валерійович,

кандидат технічних наук,

в.о. проректора з наукової роботи, доцент кафедри металургійних технологій

Державного університету економіки і технологій

ORCID ID: 0000-0001-8605-3434

Ця стаття є продовженням раніше початих досліджень, спрямованих на оцінку продуктивності виробничого процесу окатишів залежно від шихти та використання ПАР. Як і на попередньому етапі, розглядався повний цикл термообробки залізородних окатишів – від сушіння та підігріву до випалу, рекуперації та охолодження, з придивлянням до впливу використання поверхнево-активних речовин (далі – ПАР) на загальні питомі витрати електроенергії, з виключенням витрат природного газу. Промислові випробування проведено на одному з провідних гірничозбагачувальних комбінатів Кривбасу зважаючи на перехід з базового (власного) концентрату на сировину іншого підприємства регіону, оброблену неіоногенною ПАР. На відміну від попередніх досліджень, які були побудовані на восьмифакторній моделі аналізу, були виключені незначущі показники, тому аналітика теперішніх досліджень будувалася на підставі п'ятифакторної системи аналізу, а також зменшено крок часу між замірами змін, що дає підґрунтя більш точнішим розрахункам. Показано, що ключовими факторами впливу є вологість шихти, витрата вапняку, міцність сирих окатишів, висота шару та тиск газу. При цьому саме збільшення витрати вапняку стало суттєвим фактором впливу на загальне енергоспоживання. Зафіксовано зростання витрат електроенергії на 25,88 %. Результати актуальні для фахівців у галузях енергоменеджменту, електроенергетики та теплотехніки в металургії, зокрема при розробці заходів з оптимізації енерговитрат у промислових умовах.

Ключові слова: залізородні окатиші, випалювальна машина, поверхнево-активні речовини, шихта, енергоспоживання, природний газ, електроенергія, дисперсність концентрату, вологість, продуктивність, промислові випробування, регресійне моделювання.

Navolniev Igor, Kukhar Volodymyr, Chuprinov Yevgen. Assessment of electricity consumption of an induration machine depending on feed mix properties and the use of surfactants

This article is a continuation of previously initiated research aimed at assessing the performance of the pellet production process depending on the feed mix and the use of surfactants (SAS). As in the previous stage, the full cycle of thermal treatment of iron ore pellets – from drying and preheating to firing, heat recovery, and cooling – was considered, with attention focused on the impact of using surface-active substances (SAS) on total specific electricity consumption, excluding natural gas costs. Industrial trials were conducted at one of the leading mining and processing plants in Kryvyi Rih in connection with the transition from the baseline (in-house) concentrate to raw material from another regional enterprise treated with non-ionic SAS. Unlike previous studies, which were based on an eight-factor analysis model, insignificant indicators were excluded, and the analytics of the current research was thus built on a five-factor analysis system, with the time interval between measurements also reduced, providing a basis for more accurate calculations. It is shown that the key influencing factors are feed mix moisture, limestone consumption, green pellet strength, bed height, and gas pressure. At the same time, the factor of increased limestone consumption became a significant driver of overall energy consumption. A 25.88% increase in electricity costs was recorded. The results are relevant for specialists in energy management, electrical engineering, and thermal engineering in metallurgy, particularly in developing measures to optimize energy costs under industrial conditions.

Key words: iron ore pellets, induration machine, surfactants, feed mix, energy consumption, natural gas, electricity, concentrate fineness, moisture content, productivity, industrial trials, regression modeling.

Вступ. Забезпечення енергоефективності процесів виробництва залізорудних окатишів є одним з 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 залізорудних окатишів, яке є важливим проміжним продуктом для металургійної переробки, розглядається як один із пріоритетних напрямів для впровадження енергоощадних рішень у сталевиробній промисловості.

Процес отримання окатишів містить процес збагачення руд й 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. Ураховуючи 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 й 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 залізорудної 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 залізорудного концентрату й фізико-механічними характеристиками «сирих» окатишів. Також дослідниками [14] встановлено, що реологічні характеристики залізорудних суспензій залежать від умісту 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. У роботі [16] встановлено, що при сушінні латеритної руди в промислових обертових сушарках з високою початковою вологістю (~27 %) спостерігаються значні теплові втрати через корпус сушарки, які 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 залізорудних окатишів, яке, за даними [17], забезпечує прискорене видалення вологи завдяки зниженню енергії активації процесу й підвищенню ефективної дифузії вологи порівняно з традиційним конвективним методом [15; 18]. Витрати енергії та теплові втрати в 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 й 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 напрямів удосконалення технології виробництва залізорудних окатишів є впровадження нових типів концентратів, оброблених поверхнево-активними речовинами (далі – ПАР) [11; 21]. Ефекти застосування ПАР є досить суперечливими. З одного боку, застосування ПАР змінює змочуваність і реологічні властивості концентрату, покращуючи його здатність до огрудкування та зменшуючи злежуваність. При цьому, як показано у [22], обробка концентрату аніонними та неіонними ПАР дає змогу додатково знизити вологість концентрату на 2–4 % завдяки зміні 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 залізорудному концентраті призводить до підвищення пористості та зниження міцності сирих окатишів, що погіршує їх поведінку під час сушіння й може сприяти зростанню енерговитрат через зниження проникності шару й утворення пилу. Підвищена вологість 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 особливо актуальна для гірничозбагачувальних комбінатів, зокрема Кривбасу, на яких здійснюється виробництво залізорудних 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 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. З огляду на це, актуальним є завдання встановлення кількісних залежностей між характеристиками сировини та параметрами енергоспоживання і продуктивності. У 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.

Мета роботи – встановити кількісні залежності між фізико-хімічними характеристиками шихти (зокрема, вологістю, гранулометричним складом та використанням поверхнево-активних речовин) і питомими витратами електроенергії, а також продуктивністю випалювального агрегата в промислових умовах Підприємства

«А» при переході з базового концентрату на модифікований ПАР концентрат виробництва Підприємства «Б».

Матеріали та методики

1. Технологічні умови, обладнання та організація промислового експерименту.

Перед початком випробувань підготовлено обладнання всього технологічного комплексу: дозатори, млинові тракти, чашові огрудковувачі, роликовий трипродуктовий грохот Metal7 (із просвітами 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 залізорудних 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 містить інжекційні пальники, газорозподільні камери з газоповітря розподільними пристроями, систему подання 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; теплоносії 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 приводу – 32 кВт; загальна маса – 4600 т. Промислові випробування проводили з огляду на виробничу необхідність повністю перейти 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 встановлено, що підвищена дисперсність концентрату Підприємства «Б» негативно впливає на огрудковувальність (комкуємість) шихти, що спричиняє збільшення обсягу сирого

повернення та зниження стабільності формування шару окатишів. Для компенсації цієї проблеми застосовували попередню обробку концентрату Підприємства «Б» 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 й агрегацію частинок концентрату, що сприяло стабілізації процесу огрудкування тонкодисперсного концентрату Підприємства «Б». Водночас зниження природної вологості концентрату після зневоднення вимагало додаткового зволоження в змішувачі та огрудковувачі, що в підсумку призвело до збільшення загальної вологості шихти. Це, своєю чергою, впливає на збільшення енергетичних витрат на сушіння окатишів.

Підготовлено й заскладовано шихтові матеріали (бентоніт, вапняк), організовано транспортування та складування концентрату Підприємства «Б» на склад збагачувальної фабрики Підприємства «А» з дотриманням вимог до чистоти й роздільності партій. Для стабілізації механічних властивостей сирих окатишів скориговано витрату бентоніту в складі в'язучого компонента.

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 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 й усереднено за добу, що забезпечило можливість порівняльного аналізу впливу типу концентрату на ефективність процесу.

2. 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 з ДСТУ 3210-95 / ISO 4701:2017) з використанням віброгрохота 8ГВ-3Я з тривалим віброзбуджувачем (діапазон 5–20 мм). Міцність на стиск сирих окатишів визначалася методом відповідно до ДСТУ 3212-95 (аналогічно ISO 4700:2015), шляхом застосування стискаючої сили до окремих окатишів до руйнування. Міцність на скидання оцінювалася відповідно до ДСТУ 3213-95 (аналогічно ISO 3271:2015) шляхом скидання окатишів з висоти 0,5 м на сталеву пластину та підрахунку кількості скидів до руйнування. Гранулометричний склад для класу 10–14 мм (X8) оцінювався в сирих окатишах методом ситового

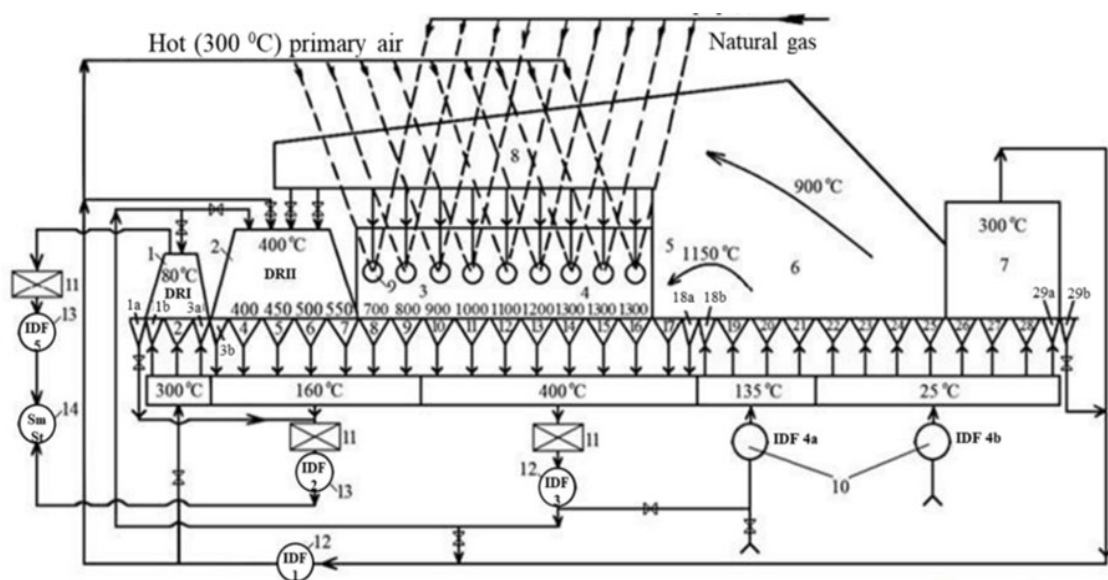


Рис. 1. Теплова схема опалювальної машини (Підприємство А):

1 та 2 – сушіння I та II; 3 – нагрівання; 4 – опалювання; 5 – рекуперація тепла; 6 та 7 – охолодження I та II; 8 – поперечний колектор; 9 – інжекційні пальники; 10 – повітряні вентилятори; 11 – сухі пилотовловлювачі; 12 – високотемпературні рекуперативні витяжні вентилятори; 13 – витяжні вентилятори, що викидають газу в димар; 14 – димова труба

аналізу (ДСТУ 3210-95 / ISO 4701:2017), що відображає ефективність процесу грануляції та стабільність формування окатишів. Продуктивність фіксували стрічковими вагами Schenck MULTIDOS (похибка 0,1–1,0 %, до 1000 т/год, швидкість ленти – до 0,2 м/с). Облік витрат електроенергії визначали за промисловими електролічильниками НІК 2303 АРЗ (клас точності 1.0). Питомі витрати розраховували з урахуванням змінного випуску продукції на основі хронометрування та добового обліку.

3. Визначення факторів, що впливають на результат. При проведенні дослідно-промислових випробувань здійснювали щогодинний контроль таких 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) та ін. Дані систематизували в таблицях щоденного обліку (з 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.

Цільовою функцією стало енергоспоживання (Y_1 – питома електроенергія), оскільки основною метою було оцінити енергетичні наслідки на стадії сушіння. Вплив на якість обпалених окатишів (наприклад, міцність) не оцінювався в цьому дослідженні, оскільки попередні перевірки підтвердили відповідність стандартам, а фокус був на ефективності процесу, а не на кінцевому продукті металургії. Майбутні роботи

можуть розширитися на властивості обпалених окатишів.

Для зменшення кількості факторів впливу застосовували метод експертних оцінок, що дало змогу скоротити їх кількість до 5 (у випадку віднесення продуктивності до фактору впливу, кількість факторів збільшується до 6). Логіка скорочення кількості факторів полягала, зокрема, у 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.

У процесі отримання рівнянь регресії за методикою Data Analysis додатково перевіряється вплив кожного з обраних факторів, що дає змогу з'ясувати нівелювання впливу деяких факторів на результат із відповідним додатковим скороченням складників математичної моделі.

Результати. У процесі промислових випробувань зібрано та систематизовано подрібнені подобові 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).

У табл. 2 та табл. 3 наведено значення ключових факторів впливу ($X_1 \dots X_5$) та результати для показника (Y_1), включно з добовими значеннями, повним діапазоном коливань кожного з параметрів (min...max), а також зведеними середніми по кожному з етапів.

Третій день представляв перехідний період адаптації під час заміни концентрату, з екстремальними значеннями для обраних факторів через коригування режиму.

При цьому зростання пікове споживання електроенергії з 31,8 кВт·год/т на початку

Таблиця 1

Класифікація факторів впливу

Обладнання (Machine)	Матеріали (Material)	Методи (Method)	Вимірювання (Measurement)
Випалювальна машина, інжекційні пальники, ГПП, 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 подання концентратів, дозування, стабілізація параметрів, використання тимчасової карти режимів	Визначення вологості (шафа), ситовий аналіз (сита Ø200 мм), стрічкові ваги Schenck, електролічильники НІК 2303 АРЗ
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

експерименту до 40,03 кВт·год/т прийшлося на третю добу в момент переходу на п'яту добу експерименту. Це відбулося тому, що на п'ятий день припав так званий пік шоку, а саме складання таких параметрів: пікове накопичення вологи, найнижча газопроникність шару зумовлена, зокрема, зростанням використання вапняку, ручна адаптація теплових режимів, що призвела до подовження циклів сушіння та максимального навантаження на тягодуттєве обладнання. Надалі (6–8 дні) споживання стабілізувалося на рівні ~40,0 кВт·год/т завдяки оптимізації параметрів.

Дані отримані вимірюванням протягом 2 днів роботи з концентратом Підприємства «А» та 8 днів роботи з концентратом Підприємства

«Б» в загальному обсязі 64 в межах діапазону в табл. 2 та структуруються відповідно до формул регресійного аналізу, 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.

Після математичної обробки результатів, отримали коефіцієнти рівняння регресії та відповідний коефіцієнт детермінації R^2 , див. табл. 4.

При попередньому аналізі даних на виявлення кореляції між факторами та оцінці

Таблиця 2

Вхідні параметри та структура регресійної моделі

Вигляд рівняння регресії	Назва фактору (X) або (Y)	Одиниці вимірювання	Позначення фактору	Діапазон (min...max)
$Y_1 = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5$	Витрати вапняку	кг/т	X_1	5,3...8,97
	Вміст вологи у сирому окатиші	%	X_2	8,3...9,6
	Міцність на роздавлювання	кг/окатиш	X_3	1,18...1,56
	Висота шару сирих окатишів	мм	X_4	304...359
	Тиск у вакуумній камері	даПа	X_5	256...491
	Питома витрата електроенергії	кВт/т·год	Y_1	31,8...40,03

Таблиця 3

Подобові експериментальні дані факторів $X_1 - X_5$ та питомої витрати електроенергії Y_1 під час переходу від концентрату Підприємства «А» до концентрату Підприємства «Б», обробленого ПАР

Доба	X_1 , Витрата вапняку, кг/т	X_2 , Волога, %	X_3 , Міцність на роздавлювання	X_4 , Висота шару, мм	X_5 , Тиск вак. кам, даПа	Y_1 , ел. ен., кВт/год
	1	2	3	4	5	6
1 (початок експерименту)	5,3	8,4	1,42	356	482	31,8
2 (за 8 годин до зміни сировини)	5,3	8,4	1,48	357	470	33,3
3 (зміна сировини)	8,96	8,8	1,27	337	286	37,15
3 (8 годин після заміни сировини)	8,96	8,9	1,34	335	278	36,78
4 (8 годин до піку «шоку»)	8,95	8,8	1,31	304	256	38,72
5 (пік «шоку»)	8,97	8,9	1,32	326	280	40,03
5 (8 годин після піку «шоку»)	8,95	9,6	1,37	325	269	37,61
8 (8 годин до закінчення експерименту)	8,95	8,9	1,29	336	290	38,44
8 (закінчення експерименту)	8,95	8,8	1,38	334	272	37,61

Таблиця 4

Коефіцієнти до рівнянь регресії для прогнозування витрат електроенергії

Y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	R^2
Y_1	35,23	2,84	-1,13	5,55	-0,098	0,042	0,7686

значущості отриманих коефіцієнтів регресії виявлено складний характер взаємного зв'язку низки факторів із великим внеском в результативну величину Y_1 . Для регресійної моделі запропоновано вилучити фактори, які враховували в попередніх розрахунках, а саме: «витрати бентоніту», «витрати обпаленого повернення», «вміст Fe», «міцність на роздавлювання», «міцність на скидання», «частка 10–14», як визначено як незначущі. Це дало змогу отримати адекватну модель Y_1 з наявністю тільки значущих коефіцієнтів з рівнем значущості $\alpha = 0,05$ як залежна від X_1, X_2, X_3, X_4 та X_5 з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,77$ (що є незначною мірою менше за $R^2 = 0,82$ для попередньої моделі з наявністю комплексного впливу більшої кількості врахованих факторів). Це вказує на те, що фактори «витрати бентоніту», «витрати обпаленого повернення», «вміст Fe», «частка 10–14» та «міцність на скидання» не зробили суттєвого внеску в пояснення варіацій у споживанні енергоносіїв у досліджуваних умовах. Імовірно, у межах експерименту ці параметри залишалися відносно стабільними або їх вплив був слабшим порівняно з основними факторами – витратами вапняку, вологістю, міцністю та тиском у вакуумній камері. Нульовий коефіцієнт не означає відсутності фізичного впливу, а лише відображає домінування сильніших факторів у цьому плані експерименту. Це типовий результат багатфакторного аналізу, коли взаємозв'язки між змінними маскують вплив менш значущих параметрів.

Дискусія. У процесі промислових випробувань встановлено, що концентрат Підприємства «Б» характеризується вищим умістом 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 застосовано ПАР у поєднанні із цілеспрямованим додатковим

зволоженням концентрату. При цьому, зростання витрат вапняку (з $5,3$ до $8,97$ кг/т) 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 уміст вологи в сирих окатишах збільшилося – з $8,3$ % до $9,6$ %. Це свідчить як про підвищену гідрофільність обробленого концентрату, так і про технологічну необхідність забезпечення стабільного процесу огрудкування шляхом зволоження. Водночас підвищення вологовмісту суттєво ускладнило подальшу стадію обпалювання.

Після переходу на концентрат Підприємства «Б» зафіксовано зростання використання електроенергії від $31,8$ до $37,15$ кВт·год/т (середнє $34,4$ кВт·год/т, зростання на $5,25$ кВт·год/т, або $16,28$ %). Найвищий показник споживання електроенергії припав на 5 добу експерименту припав на п'яту добу експерименту ($40,03$ кВт·год/т, середнє $35,9$ кВт·год/т, зростання на $8,23$ кВт·год/т, або $25,88$ %). Саме на цей період прийшовся так званий пік шоку, коли здійснювалися компенсаційні дії. Надалі витрати стабілізувалися, однак залишалися вищими за базові. 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 огрудкування та енерговитрати наведено на схемі рис. 2 («Проблема – Дія – Результат»).

Результати проведеного аналізу узагальнено в табл. 5.

Додатковим чинником зростання енерговитрат могла стати тимчасова нестабільність теплових режимів. У цей час оператори могли



Рис. 2. Схема «Проблема – Дія – Результат»

Таблиця 5

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 (%)
Споживання вапняку, кг/т	5,3	8,96	↑ 3,66	↑ 69,06
Вологість сирого окатиша, %	8,375	8,875	↑ 0,5	↑ 5,97
Міцність на стиск, кг/окатиш	1,46	1,32	↓ -0,14	↓ -10,1
Висота шару, мм	357	333	↓ 24	↓ 6,72
Тиск, дПа	477,81	281,77	↓ 196,04	↓ 41,03
Питоме споживання електроенергії, кВт/г	31,8	40,03	↑ 8,23	↑ 25,88

застосовувати знижені температури чи швидкість подання газу для запобігання руйнуванню окатишів, що, у поєднанні зі зниженням продуктивності, призвело до зростання питомих витрат енергії через сталі фонові теплові втрати агрегату.

Так, 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 виокремити вклад ПАР у зміну технологічних показників складно, оскільки перехід на новий концентрат супроводжувався одночасною зміною фізико-хімічних і технологічних параметрів. Додатковим обмеженням є відсутність лабораторних даних щодо гідрофільності концентратів, що ускладнює кількісну інтерпретацію ефекту змочування. Перспективним напрямом подальших досліджень є проведення спеціалізованих тестів із контрольованим дозуванням ПАР, а також випробувань концентратів із варіативною вологістю для точнішого визначення ролі зволоження у формуванні енерговитрат.

Висновки. Проведено промислові випробування на Підприємства «А» з переходом від власного концентрату до концентрату Підприємства «Б», обробленого ПАР. Експерименти містили 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 й сушіння окатишів. Отримані результати відображають загальний вплив модифікації концентрату на тепловий режим й енергоспоживання повного циклу роботи випалювального агрегату, включно із сушінням, випалом, рекуперацією та охолодженням.

Отримано узагальнені залежності між характеристиками сировини та технологічними показниками. Для їх кількісного опису застосовано регресійний аналіз. Побудовані моделі дали змогу прогнозувати питомі витрати енергоносіїв і продуктивність випалювальної машини. Водночас з'ясовано, що такі фактори, як вологість окатишів, витрата вапняку, міцність сирих окатишів, висота шару та тиск газу, впливають на питоме споживання електроенергії.

Установлено, що використання концентрату Підприємства «Б» з ПАР вимагало збільшення використання в процесі обпалу вапняку (з 5,3 кг/т до 8,96 кг/т, тобто на +69,06 %), що зумовлено необхідністю компенсувати підвищену вологість концентрату, модифікованого ПАР (з підвищеною гідрофільністю). Це призвело до зростання питомої витрати електроенергії з 31,8 до 40,03 кВт·год/т (на 8,23 / +25,88 %). Також виявлено підвищення вологості сирих окатишів з 8,375 до 8,875 (на +5,97 %), а також зменшення міцності на стиск з 1,46 до 1,32 кг/ок (на – 10,1 %). Отримані результати свідчать про зростання енерговитрат та зниження ефективності процесу при використанні концентрату Підприємства «Б», що пояснюється його підвищеною дисперсністю та необхідністю зволоження, що призводить до ускладнення процесів сушіння й обпалу та 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 з варіюванням вмісту ПАР та вологості для точнішої оцінки їх впливу на енерговитрати та якість продукції. Окрему увагу слід приділити стабілізації теплових режимів у перехідні періоди, що може суттєво покращити енергоефективність виробництва.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Hirlekar O., Kolte A., Vasa L. Transition in the mining industry with green energy: Economic dynamics in mining demand. *Resources Policy*. 2025. Vol. 100. Article 105409. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105409>
2. Hooey L., Riesbeck J., Wikström J.-O., Björkman B. Role of ferrous raw materials in the energy efficiency of integrated steelmaking. *ISIJ International*. 2014. Vol. 54, No. 3. P. 596–604. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.596>
3. He K., Wang L. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 70. P. 1022–1039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007>
4. Moraes S. L. de, Lima J. R. B. de, Ribeiro T. R. Iron Ore Pelletizing Process: An Overview. In: Shatokha V. (ed.) *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. London: IntechOpen, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73164>
5. Miranda T., Montero I., Sepúlveda F. J., Arranz J. I., Rojas C. V., Nogales S. A review of pellets from different sources. *Materials*. 2015. Vol. 8, No. 4. P. 1413–1427. <https://doi.org/10.3390/ma8041413>
6. Kruzhilko O., Maystrenko V., Tkalych I., Polukarov Yu., Kalinchyk V. P., Neklonskyi I., 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, No. 1. P. 35–41. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.7029>
7. Kruzhilko O., Volodchenkova N., Maystrenko V., Bolibrukh B., Kalinchyk V. P., Zakora A., Feshchenko A., Yeremenko S. Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprises. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2021. Vol. 108, No. 1. P. 35–41. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.4797>
8. Azimova L., Mirbabayeva N. Method for reducing fuel consumption when roasting pellets from magnetite iron ore concentrate. *Engineering Headway*. 2024. Vol. 7. P. 45–50. <https://doi.org/10.4028/p-hG5G1U>
9. Iljana M., Paananen T., Mattila O., Kondrakov M., Fabritius T. Effect of iron ore pellet size on metallurgical properties. *Metals*. 2022. Vol. 12, No. 2. P. 302. <https://doi.org/10.3390/met12020302>
10. Savchenko I., Shapoval O., Bakharev V., Chupilko T., Babaryka M., Dzyna N. Mathematical model of rheological processes of composite materials deformation. In: *Proc. 2022 IEEE 4th Int. Conf. Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. pp. 01–06. <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005658>
11. Eisele T. C., Kawatra S. K. A review of binders in iron ore pelletization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2010. Vol. 24, No. 1. P. 1–90. <https://doi.org/10.1080/08827500306896>
12. Koval A. D., Efremenko V. G., Brykov M. N., Andrushchenko M. I., Kulikovskii R. A., 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, No. 2. P. 153–159. <https://doi.org/10.3103/S1068366612020079>
13. Kumeda K., Nakamura H., Ohsaki S., Watano S., Fujiwara S., Iwami Y., Murao A. Relationship between the agitation torque of the wet iron ore powder and pellet properties. *ISIJ International*. 2025. Vol. 65, No. 1. P. 62–69. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-281>
14. Kumar S., Singh M., Singh J., et al. Rheological characteristics of uni/bi-variant particulate iron ore slurry: Artificial neural network approach. *Journal of Mining Science*. 2019. Vol. 55, No. 2. P. 201–212. <https://doi.org/10.1134/S1062739119025468>
15. Mujumdar A. S. Drying in mineral processing. In: Mujumdar A. S. (ed.) *Handbook of Industrial Drying*. 2nd ed. Vol. 2. New York : 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. In: *Proc. 13th Int. Heat Transfer Conf. (IHTC-13)*. Kyoto, 2006. P. 9. <https://doi.org/10.1615/IHTC13.p24.110>
17. Athayde M., Cota M., Covcevich M. Iron ore pellet drying assisted by microwave: A kinetic evaluation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018. Vol. 39, No. 4. P. 266–275. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1423295>
18. Souza A. S. E., de Souza Pinto T. C., Sarkis A. M., de Pádua T. F., Béttega R. Energy analysis of the convective drying of iron ore fines. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 2023. Vol. 29, No. 3. P. 189–200. <https://doi.org/10.2298/CICEQ220208026S>
19. Kukhar V., Balalayeva E., Hurkovska S., Sahirov Y., Markov O., Prysiashnyi A., Anishchenko O. The selection of options for closed-die forging of complex parts using computer simulation by the criteria of material savings and minimum forging force. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 989. P. 325–331.

20. Khrebtova O., Shapoval O., Markov O., Kukhar V., Hrudkina N., Rudych M. Control systems for the temperature field during drawing, taking into account the dynamic modes of the technological installation. In: *Proc. 2022 IEEE 4th Int. Conf. Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005724>
21. Souza Pinto T. C., Souza A. S., Batista J. N. M., Sarkis A. M., Leal Filho L. S., Pádua T. F. Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. *Drying Technology*. 2020. Vol. 39, No. 10. P. 1359–1370. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073>
22. Patra A. S., Makhija D., Mukherjee A. K., Tiwari R., Sahoo C. R., Mohanty B. D. Improved dewatering of iron ore fines by the use of surfactants. *Powder Technology*. 2016. Vol. 287. P. 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.030>
23. Forsmo S. P. E., Forsmo S.-E., Björkman B. M. T., Samskog P.-O. Studies on the influence of a flotation collector reagent on iron ore green pellet properties. *Powder Technology*. 2008. Vol. 182, No. 3. P. 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.07.015>
24. Kawatra S. K., Claremboux V. Iron ore pelletization: Part I. Fundamentals. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021. Vol. 43, No. 4. P. 529–544. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1897586>

REFERENCES:

1. Hirlekar, O., Kolte, A., & Vasa, L. (2025). Transition in the mining industry with green energy: Economic dynamics in mining demand. *Resources Policy*, 100, 105409. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105409>
2. Hooey, L., Riesbeck, J., Wikström, J.-O., & Björkman, B. (2014). Role of ferrous raw materials in the energy efficiency of integrated steelmaking. *ISIJ International*, 54(3), 596–604. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.596>
3. He, K., & Wang, L. (2017). A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1022–1039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007>
4. Moraes, S. L. de, Lima, J. R. B. de, & Ribeiro, T. R. (2018). Iron ore pelletizing process: An overview. In V. Shatokha (Ed.). *Iron ores and iron oxide materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73164>
5. Miranda, T., Montero, I., Sepúlveda, F. J., Arranz, J. I., Rojas, C. V., & Nogales, S. (2015). A review of pellets from different sources. *Materials*, 8(4), 1413–1427. <https://doi.org/10.3390/ma8041413>
6. Kruzhilko, O., Maystrenko, V., Tkalych, I., Polukarov, Y., Kalinchyk, V. P., Neklonskyi, I., & Ryzhchenko, O. (2022). 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*, 110(1), 35–41. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.7029>
7. Kruzhilko, O., Volodchenkova, N., Maystrenko, V., Bolibrukh, B., Kalinchyk, V. P., Zakora, A., Feshchenko, A., & Yeremenko, S. (2021). Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprises. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 108(1), 35–41. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.4797>
8. Azimova, L., & Mirbabayeva, N. (2024). Method for reducing fuel consumption when roasting pellets from magnetite iron ore concentrate. *Engineering Headway*, 7, 45–50. <https://doi.org/10.4028/p-hG5G1U>
9. Iljana, M., Paananen, T., Mattila, O., Kondrakov, M., & Fabritius, T. (2022). Effect of iron ore pellet size on metallurgical properties. *Metals*, 12(2), Article 302. <https://doi.org/10.3390/met12020302>
10. Savchenko, I., Shapoval, O., Bakharev, V., Chupilko, T., Babaryka, M., & Dzyna, N. (2022). Mathematical model of rheological processes of composite materials deformation. In *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005658>
11. Eisele, T. C., & Kawatra, S. K. (2010). A review of binders in iron ore pelletization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 24(1), 1–90. <https://doi.org/10.1080/08827500306896>
12. Koval, A. D., Efremenko, V. G., Brykov, M. N., Andrushchenko, M. I., Kulikovskii, R. A., & Efremenko, A. V. (2012). 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*, 33(2), 153–159. <https://doi.org/10.3103/S1068366612020079>
13. Kumeda, K., Nakamura, H., Ohsaki, S., Watano, S., Fujiwara, S., Iwami, Y., & Murao, A. (2025). Relationship between the agitation torque of the wet iron ore powder and pellet properties. *ISIJ International*, 65(1), 62–69. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-281>
14. Kumar, S., Singh, M., Singh, J., et al. (2019). Rheological characteristics of uni/bi-variant particulate iron ore slurry: Artificial neural network approach. *Journal of Mining Science*, 55(2), 201–212. <https://doi.org/10.1134/S1062739119025468>

15. Mujumdar, A. S. (1995). Drying in mineral processing. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of industrial drying* (2nd ed., Vol. 2, pp. 921–929). Marcel Dekker.
16. Sheehan, M. E. (2006). A systems and resistance analysis of heat loss through an industrial flighted rotary ore dryer. In *13th International Heat Transfer Conference (IHTC-13)* (p. 9). <https://doi.org/10.1615/IHTC13.p24.110>
17. Athayde, M., Cota, M., & Covcevich, M. (2018). Iron ore pellet drying assisted by microwave: A kinetic evaluation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 39(4), 266–275. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1423295>
18. Souza, A. S. E., de Souza Pinto, T. C., Sarkis, A. M., de Pádua, T. F., & Béttega, R. (2023). Energy analysis of the convective drying of iron ore fines. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 29(3), 189–200. <https://doi.org/10.2298/CICEQ220208026S>
19. Kukhar, V., Balalayeva, E., Hurkovska, S., Sahirov, Y., Markov, O., Prysiaznyi, A., & Anishchenko, O. (2019). The selection of options for closed-die forging of complex parts using computer simulation by the criteria of material savings and minimum forging force. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 989, 325–331.
20. Khrebtova, O., Shapoval, O., Markov, O., Kukhar, V., Hrudkina, N., & Rudych, M. (2022). Control systems for the temperature field during drawing, taking into account the dynamic modes of the technological installation. In *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005724>
21. Souza Pinto, T. C., Souza, A. S., Batista, J. N. M., Sarkis, A. M., Leal Filho, L. S., & Pádua, T. F. (2020). Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. *Drying Technology*, 39(10), 1359–1370. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073>
22. Patra, A. S., Makhija, D., Mukherjee, A. K., Tiwari, R., Sahoo, C. R., & Mohanty, B. D. (2016). Improved dewatering of iron ore fines by the use of surfactants. *Powder Technology*, 287, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.030>
23. Forsmo, S. P. E., Forsmo, S.-E., Björkman, B. M. T., & Samskog, P.-O. (2008). Studies on the influence of a flotation collector reagent on iron ore green pellet properties. *Powder Technology*, 182(3), 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.07.015>
24. Kawatra, S. K., & Claremboux, V. (2021). Iron ore pelletization: Part I. Fundamentals. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43(4), 529–544. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1897586>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 11.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026