

А.Г. Темченко, д.т.н., проф.
Державний університет «Житомирська політехніка»
О.А. Темченко, д.т.н., проф.
Навчально-науковий економічний інститут
Державного університету економіки і технологій
В.В. Коробійчук, д.т.н., проф.
Державний університет «Житомирська політехніка»
Н.А. Шевчук, к.т.н., доц.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського»
І.А. Піскун, аспірант
Державний університет «Житомирська політехніка»

Оцінка енергоефективності збагачуваності залізорудної сировини в умовах формування екоіндустріальних парків

Мета. Оцінка впливу текстурно-структурних та фізико-механічних характеристик залізистих кварцитів глибоких кар'єрів Кривбасу на енергоефективність виробництва та збагачуваність сировини під час її технологічної переробки в умовах формування екоіндустріального парку.

Методика. Методичну основу досліджень становить системний підхід до проблеми оцінки текстурно-структурних та фізико-механічних характеристик залізистих кварцитів і проблем енергоефективності й збагачуваності мінеральної сировини при регіональному розгляді Криворізького залізорудного басейну. Відповідно до специфіки досліджень, спрямованих на досягнення поставлених завдань та отримання технологічних залежностей, у роботі використовувалися переважно такі методи: аналітичний, графоаналітичний та математичної статистики.

Результати. Виявлено кількісні взаємозв'язки вмісту заліза залежно від фізико-механічних характеристик кварцитів та технологічних показників збагачення. Встановлено, що при формуванні рудо-потоків у кар'єрі необхідно враховувати не тільки вміст заліза загального та магнітного, але й фізико-механічні властивості типів і сортів руд, їх текстурно-структурні особливості, наявність шкідливих домішок та гранулометричний склад руди в кар'єрі, що суттєво впливають на ефективність процесу збагачення та його енерговитратність. Зазначається, що підвищення енергоефективності досягається шляхом впровадження обґрунтованих управлінських і технологічних заходів з урахуванням впливу текстурно-структурних та фізико-механічних характеристик залізистих кварцитів у кар'єрі на якісні показники подальшої переробки мінеральної сировини на рудозбагачувальній фабриці.

Наукова новизна. Встановлено залежності та взаємозв'язки природно-геологічних, фізико-механічних, технічних, організаційних та екологічних факторів, їх сукупний вплив на ефективність технологічних процесів видобутку та переробки залізистих кварцитів за умови дотримання раціональної енерговитратності.

Практична значущість. Отримані результати є важливими та корисними для визначення енергоефективності процесів збагачення в залізорудній галузі в умовах стійкого погіршення екологічної ситуації, суттєвих коливань цінних характеристик на ринках залізорудної сировини та складних умов господарювання на гірничих підприємствах внаслідок негативного впливу попередньої неощадливої діяльності та обмежень карантинного характеру через світову пандемію в останні роки.

Ключові слова: енерговитрати; залізисті кварцити; енергоефективність; збагачуваність; екоіндустріальний парк.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими практичними завданнями. Актуальність створення та функціонування екоіндустріальних парків в Україні полягає у забезпеченні цілей сталого розвитку до 2030 року і зумовлена створенням інклюзивної, соціальної і екологічної індустріалізації та інфраструктури для резидентів парку. Під час вибору майданчика для створення екоіндустріальних парків особливу увагу необхідно звернути на місцевість, яка становить вагомий інтерес для потенційних інвесторів. В індустріальних парках передбачено раціональне використання низьковуглецевих джерел енергії, планування та регулювання споживання енергії. Енергоефективність збагачення залізорудної сировини сприятиме ефективному виробленню та споживанню енергії. Гірничодобувні підприємства

мають стати майданчиками, на базі яких буде здійснюватися проектування та створення індустріальних парків у найближчій перспективі, а в подальшому розбудова та розвиток сучасних екоіндустріальних парків.

Сьогодні за складних умов господарювання на гірничодобувних підприємствах ефективна відкрита гірнича технологія (ВГТ) має вирішувати три головні завдання:

- у кар'єрі – виконання вимог збагачувальної фабрики (ЗФ) до формування рудопотоку, який надходить з кар'єру на переробку;
- на ЗФ – забезпечення максимального витягання корисного компонента з руди та оптимальне співвідношення між виходом концентрату і вмістом заліза у ньому;
- у цілому на підприємстві – дохід від реалізації товарної продукції має перевищувати витрати на її виробництво.

Вирішення цих завдань у першу чергу залежить від характеристик мінеральної сировини, яка знаходиться у надрах. Для дослідження впливу складових на ефективність ВГТ необхідно встановити зв'язок показників вихідної сировини у надрах з технологічними показниками збагачення. Це дозволить прогнозувати обсяги та якісні характеристики товарної продукції гірничо-збагачувального підприємства й знизити її енерговитратність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дефіцит енергії змушує людство залучати до енерговиробництва більш широке коло природних явищ, шукати надійні шляхи і способи підвищення коефіцієнта корисної дії, виробництва і використання енергії, а також ширше впроваджувати ресурсозберігаючі екологічно безпечні геотехнології, зокрема, на енергоємних технологічних процесах видобутку, транспортування, дроблення та збагачення залізної руди на потужних гірничо-збагачувальних комбінатах [1, 2]. Сучасні тенденції збільшення споживання енергоресурсів призводять до вражаючих негативних наслідків з одночасним ускладненням екологічного навантаження на довкілля. Виконані дотепер дослідження показують, що, незважаючи на певні досягнення в області енергозбереження [3–6], є значний нереалізований потенціал з урахуванням закордонного досвіду науково обґрунтованого управління енергетичними, сировинними та іншими видами ресурсів на гірничих роботах для підвищення їх енергоефективності [7–25, 46]. Аналіз проведених відомими вченими досліджень на родовищах залізних руд (В.Ф. Бизов [27], П.П. Бастан [28], Г.Г. Ломоносов, В.М. Гудков, Б.І. Пирогов, І.П. Богданов, Г.В. Губін, Ю.Г. Гершойг, І.Н. Швец [29], П.І. Пілов [30], М.І. Дядечкін [31], Ю.І. Аністратов [32], В.С. Харламов та інші [33–35]) дозволяє систематизувати об'єктивні закономірності щодо специфіки виробничо-господарської діяльності гірничо-збагачувальних підприємств при видобутку залізистих кварцитів у глибоких кар'єрах та подальшій переробці сировини. Значна частина досліджень вітчизняних та міжнародних вчених присвячена також розвитку та перспективам функціонування сучасних екоіндустріальних парків з урахуванням дотримання оптимальних енергетичних характеристик кінцевої продукції [44–46].

Тому в умовах зростаючого дефіциту енергоресурсів вирішення проблеми підвищення економічного потенціалу України можливе шляхом розробки і широкого впровадження енергозберігаючих технологій та створення потужних екоіндустріальних парків, що будуть враховувати природно-геологічні та фізико-механічні характеристики родовищ корисних копалин із застосуванням можливостей інтелектуальних інформаційних систем. Аналіз роботи сучасних залізородних підприємств й наукової літератури свідчать про низький рівень технологічного забезпечення енергоемності товарної продукції порівняно з закордонними аналогами. Незважаючи на те, що в цьому напрямі проводяться теоретичні й практичні роботи, стосовно гірничорудних підприємств Кривбасу ґрунтовні дослідження з проблеми оцінки впливу природно-геологічних та фізико-механічних властивостей залізистих кварцитів на енергоефективність та збагачуваність подальшої переробки за останній час практично не виконувалися, що вказує на їх актуальність. Тому енергоефективність та енергозбереження в гірничій справі є комплексною проблемою, для вирішення якої потрібен системний науковий підхід. Вирішення її можливо тільки за розгляду основних технологічних процесів як єдиної організаційної сукупності. При цьому слід враховувати, що на відкритих гірничих роботах використовується електрична, теплова та хімічна енергія вибухових речовин, а також енергія людської праці (фізичної і розумової), матеріалізована енергія в машинах і матеріалах.

Існує прямий зв'язок продуктивності праці з капітаоемністю виробництва. Продуктивність праці підвищується в результаті збільшення частки минулої праці і зменшення частки живої праці, при цьому загальна сума праці, яка полягає в товарі, зменшується. Звідси виникає необхідність приведення матеріалізованої (минулої) праці (енергії) до чистої праці (енергії), щоб встановити раціональні межі їх взаємозамінності.

Складність наукового і практичного вирішення питань енергозбереження полягає у відсутності спеціалізованих засобів вимірювання енерговитрат за відповідними технологічними процесам. Приладобудівна промисловість поки що не випускає надійних і простих пристроїв для контролю загальних і питомих енерговитрат для бурових верстатів, екскаваторів, дробарок, підйомних

транспортних установок і інших одиничних агрегатів. Існуючі самописні прилади складні в експлуатації і вимагають залучення спеціального персоналу для збору і обробки даних. За таких умов доводиться спиратися в основному на теоретичні передумови. На рівень енерговитрат гірничого виробництва впливає значна кількість чинників, з яких можна виокремити три типи:

- незалежні від людини природні властивості гірських порід (міцність, щільність, абразивність, опір стисненню, розтягуванню і зрушенню, тріщинуватість масиву та ін.);
- залежні від технічних даних обладнання, що застосовується, які людина може змінити тільки при вдосконаленні обладнання, а при вирішенні поточного завдання лише врахувати (діаметр долота бурового верстата, місткість ковша екскаватора, вантажопідйомність транспортної машини);
- залежні (керовані) від людини (параметри сітки свердловин, висота уступу, гранулометричний склад підірваних гірських порід, режим роботи обладнання, загальна організація гірничого виробництва та ін.).

Мета дослідження. Отже, мета дослідження полягає у проведенні оцінки впливу текстурно-структурних та фізико-механічних характеристик залістистих кварцитів глибоких кар'єрів Кривбасу на енергоефективність виробництва та збагачуваність сировини при її технологічній переробці.

Основні науково-дослідницькі завдання дослідження присвячені встановленню залежностей та визначення зв'язку між технологією видобутку руди у кар'єрі та технологією збагачування корисних копалин, що дає можливість визначитися з оптимальними параметрами видобутку та транспортування залізородної сировини для формування раціонального вихідного рудопотоку з кар'єру на дробарно-збагачувальну фабрику з метою ефективного впровадження ресурсо- та енергозберігаючих технологій та отримання кінцевої залізовмісткої продукції запланованої якості.

Викладення основного матеріалу. Методичну основу досліджень становить системний підхід до проблеми оцінки текстурно-структурних, фізико-механічних характеристик залістистих кварцитів і проблем енергоефективності та збагачуваності мінеральної сировини при регіональному розгляді Криворізького залізородного басейну. Відповідно до специфіки досліджень, спрямованих на досягнення поставлених завдань, в роботі переважно використовувалися такі методи: аналітичний, графоаналітичний та математичної статистики (пакет «Статистика»). При цьому рівень енерговитрат та збагачуваність сировини в загальному випадку визначається властивостями гірських порід, технологічними характеристиками застосовуваного обладнання та організацією гірничого виробництва. У різних процесах поєднання цих факторів проявляється по-різному, тому потрібно в кожному випадку виокремлювати ті чинники, які мають вирішальний вплив на енергоємність такого технологічного процесу. Такий аналіз дозволяє намітити основні напрями вдосконалення виробництва, що мають за кінцеву мету економію енергоресурсів. Одним зі стримуючих чинників вирішення цих питань є відсутність теорії енергозбереження при відкритій розробці родовищ корисних копалин. Наявні окремі теоретичні розробки і практика відкритих гірничих робіт створили необхідні передумови для створення теоретичних основ енергозбереження [26].

Оцінка впливу текстурно-структурних характеристик. Відомо, що сприятливим фактором при збагаченні залізної руди є шаровий характер структури кварцитів. Доведено, що на родовищах Кривбасу зі збільшенням пористості вміст заліза загального збільшується, а при збільшенні потужності шарів навпаки – зменшується (рис. 1). Однак при тонкому подрібнюванні (90–95 % класів – 0,074 мк) вплив текстурних факторів різко зменшується. Технологічні показники збагачення більше залежать від структурних елементів – розмірів і форми зернин і агрегатів мінералів, типів їх зростків тощо, що істотно визначає розкриття рудних мінералів та потенційну енерговитратність та якість при подрібнюванні з урахуванням впливу нерудних включень розміром 0,005–0,015 мм в рудних шарах, а також коли в них міститься 25–35 % кумінгтоніту з включеннями тонкодисперсного магнетиту розміром 4–6 мкм або ж є дрібна вкрапленість магнетиту в змішаних шарах [43].

Також встановлено, що у збільшенні розміру рудних агрегатів з 0,02 до 0,12 мм вміст заліза загального зменшується на 10 %.

Оцінка впливу фізико-механічних властивостей руди. Необхідно зазначити, що разом з крупністю руди, її фізичні властивості (магнітне сприйняття, твердість, крихкість, щільність тощо) мають важливе значення при збагаченні.

Магнітне сприйняття для магнетитових кварцитів різних різновидів, особливо за високої напруги магнітного поля, є достатньо постійною величиною. Однак у зв'язку з тим, що під час подрібнювання кварцитів отримують різні за вмістом магнетиту зростки, магнітне сприйняття змінюється. Це у власну чергу негативно впливає на процес сепарації.

Дослідженнями встановлено, що магнітне сприйняття значно зменшується при подрібнюванні менше 20 мк. У той же час раніше проведені дослідження родовищ Кривбасу показали, що при збільшенні крупності зернин до 0,25 мм питомі значення магнітного сприйняття і інтенсивності намагнічування зростають, а потім швидко зменшуються. Очевидно пояснюється таке явище тим, що у зернах такого діаметра наявні включення немагнітних мінералів. Таким чином, у кар'єрі необхідно формувати

рудопотік з урахуванням отримання на збагачувальну фабрику при подрібнюванні однакових зростків, це дозволить підвищити ефективність процесу збагачення і відповідно зменшити його енерговитратність.

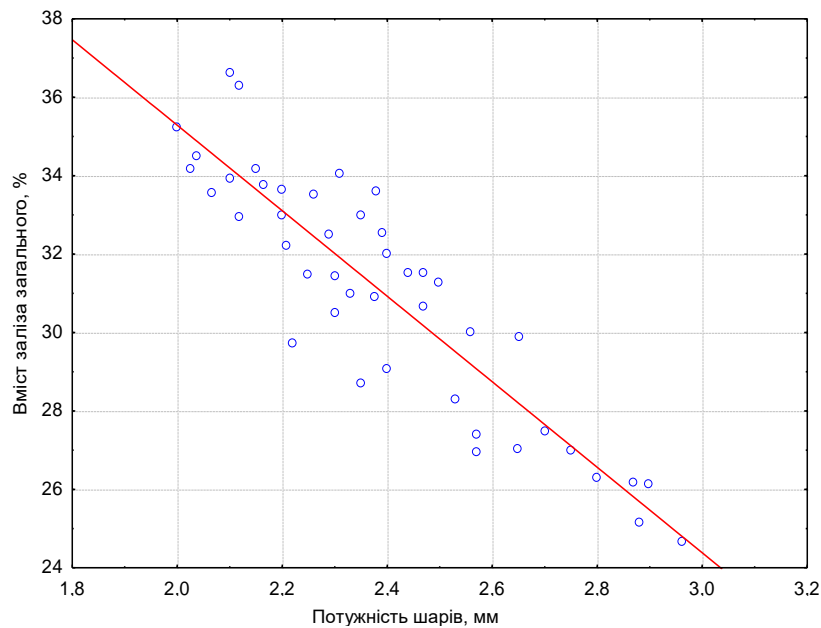


Рис. 1. Залежність вмісту заліза загального у кварцитах від потужності шарів: $y = 57,096 - 10,9044 x$, $r = -0,9018$

На процес подрібнювання залістистих кварцитів істотно впливають *твердість та крихкість мінералів*, які входять до їх складу. За рахунок різниці у цих показниках під час контакту карбонатів, кварцу та магнетиту за більш тонкого подрібнювання ступінь розкриття вищий, оскільки більший вміст заліза у магнітній фракції. Врахування різниці у *щільності та об'ємній масі* сприяє підвищенню ефективності процесу збагачення – зменшується питома робота дроблення, збільшується продуктивність дробарок та млинів. Залежності вмісту заліза загального від об'ємної маси наведено на рисунку 2, з якого видно, що зі збільшенням щільності та об'ємної маси вміст заліза загального зростає, що позитивно впливає на вихід концентрату.

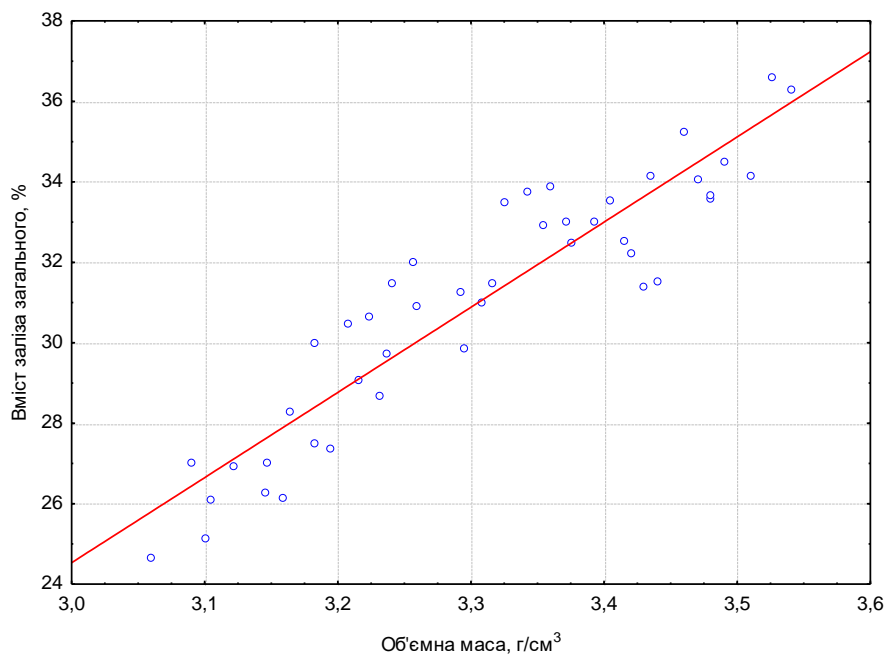


Рис. 2. Залежність вмісту заліза загального (%) від об'ємної маси (г/см³): $OM = -38,9739 + 21,1687 * x$, $r = 0,9254$

Вміст шкідливих домішок. До найбільш впливових на процес збагачення шкідливих домішок належать кремнезем та глинозем, які негативно впливають на ціну концентрату. Дослідження показують, що їх вміст пов'язаний зворотньо пропорційною залежністю з вмістом заліза. Тому під час формування рудопотоку з кар'єру на рудозбагачувальну фабрику необхідно враховувати цей факт шляхом визначення середньозваженого значення через об'єми видобутку.

Гранулометричний склад. Гранулометричний склад вихідної руди у кар'єрі впливає на продуктивність гірничотранспортного устаткування, а за наявності циклічно-потокової технології – на продуктивність дробарного устаткування. Вимоги до гранулометричного складу визначаються з виразу

$$ЛП_{\max} = 0,8\sqrt[3]{E}, \quad (1)$$

де $ЛП_{\max}$ – максимальний лінійний параметр, м; E – ємність ковша екскаватора, м³.

Вагоме значення має гранулометричний склад промпродукту. Гранулометричний склад промпродуктів дроблення та подрібнювання на збагачувальну фабрику значно впливає на якісні характеристики концентрату і, у першу чергу, на вміст заліза у концентраті (рис. 3).

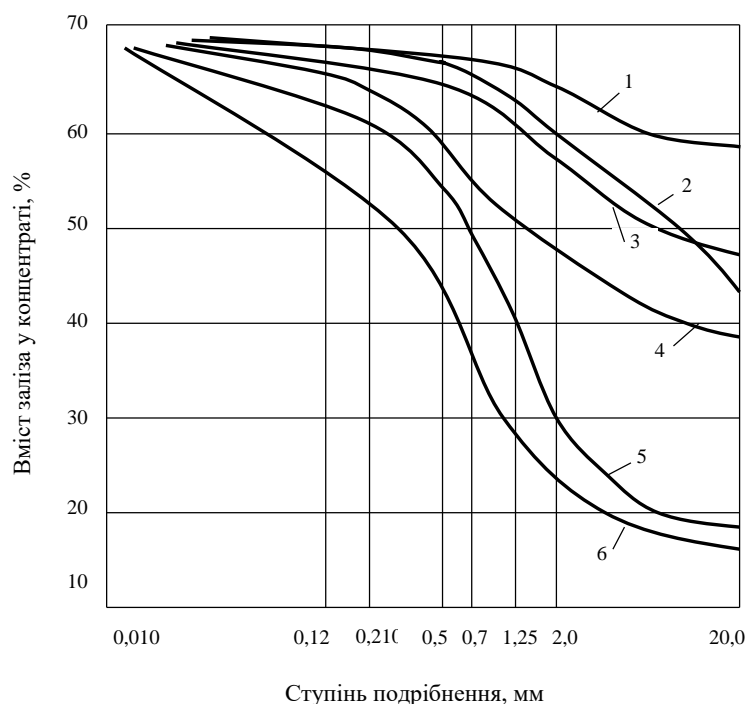


Рис. 3. Залежність вмісту заліза у концентраті від ступеня подрібнення промпродукту на рудозбагачувальній фабриці з сировини окремих родовищ (1; 3; 4 – Соколовське; 2 – Сарбайське; 5 та 6 – Качканарське родовище залізних руд, схожі за геологічними властивостями на родовища Кривбасу)

На усіх вітчизняних залізородних гірничо-збагачувальних підприємствах простежується вагомий вплив якісних характеристик вихідної рудної сировини на технологічні показники збагачення [36–42]:

- зі збільшенням вмісту заліза магнітного в руді збільшується вихід концентрату (рис. 4);
- збільшення вмісту заліза магнітного у рудопотоці впливає на витяг металу в концентрат (рис. 5);
- залежності втрат заліза у хвостах збагачення від якісних характеристик вихідного рудопотока мають суперечливий характер. На одних підприємствах (ПрАТ «Північний ГЗК», ПрАТ «Полтавський ГЗК») зі збільшенням вмісту заліза магнітного втрати спочатку збільшуються, а потім при досягненні середнього значення по родовищу зменшуються.

На підприємствах ПрАТ «ІнГЗК», гірничо-збагачувальний комплекс (ГЗК) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з ростом вмісту заліза відбувається зменшення втрат, а при досягненні середнього значення втрати у хвостах збільшуються.

На технологічні показники збагачення впливають відхилення якісних характеристик ($\Delta\alpha$) від заданого середньозваженого значення в рудопотоці ($\alpha_{нл}$), що надходить на збагачувальну фабрику з кар'єру. Допустимі відхилення $\Delta\alpha$ на практиці визначаються експериментальним шляхом у рудо-випробувальній лабораторії, яка існує на кожному гірничо-збагачувальному підприємстві.

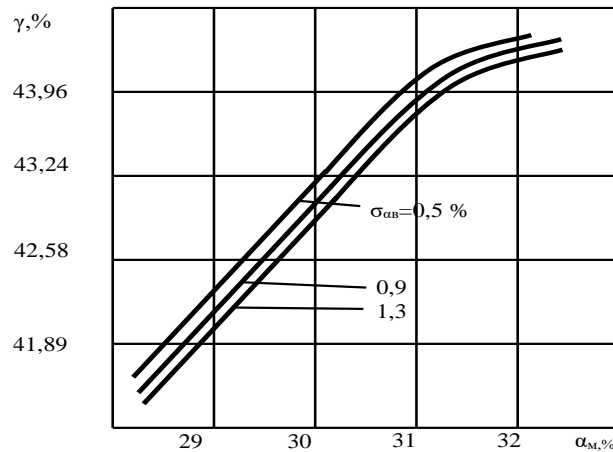


Рис. 4. Залежність виходу концентрату (γ) від вмісту заліза магнітного (α_M) в рудопотоці, що надходить на збагачувальний переділ

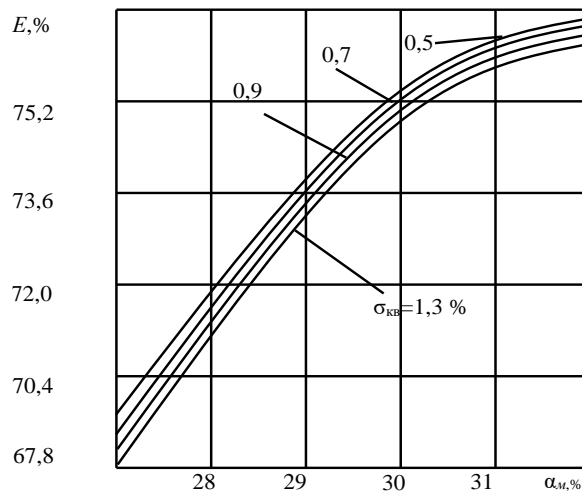


Рис. 5. Залежність витягу заліза в концентрат (E) від вмісту заліза магнітного (α_M) в рудопотоці, що надходить на збагачувальний переділ

Вимоги до формування рудопотоку виражаються таким чином:

$$\text{- за обсягами } P_{nl} = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (2)$$

$$\text{- за якістю } \alpha_{nl} = \frac{\sum P_i \alpha_i}{P_{nl}}, \quad (3)$$

$$\text{- за відхиленнями } \alpha_{nl} - \Delta\alpha \leq \alpha_{nl} \leq \alpha_{nl} + \Delta\alpha, \quad (4)$$

де P_{nl} – планові обсяги видобутку і переробки залізної руди, т; P_i – обсяги видобутку сирової руди i -м екскаватором, т; α_i – вміст заліза магнітного у обсягах видобутку руди i -м екскаватором, %.

Відхилення якісних показників руди у рудопотоці від заданих характеризуються різними показниками: дисперсією, коефіцієнтом варіації, амплітудою та частотою. Тому для визначення показників коливання якості і обсягів руди у рудопотоці, рух яких описується виразами

$$\alpha'(t) = \frac{1}{T} \int_t^T \alpha(t) \delta t; \quad P'(t) = \frac{1}{T} \int_t^T P(t) \delta t, \quad (5)$$

пропонується користуватися середньоквадратичними відхиленнями σ , наведеними до поточних значень якості $\alpha_i(t)$ й обсягам переробки сировини $P_i(t)$.

Дослідження показали, що на всіх гірничо-збагачувальних підприємствах Кривбасу збільшення середньоквадратичного відхилення ($\sigma_{кв}$) вмісту заліза загального й магнітного в рудопотоці, що надходить на переділ збагачення, призводить при збагаченні до зменшення виходу концентрату, вмісту заліза в концентраті і витягу металу в концентрат і відповідно до збільшення втрат заліза у хвостах.

Встановлені залежності доцільно використовувати при прогнозуванні технологічних показників збагачення залістих кварцитів за складної геологічної будови родовищ.

Наприклад, в умовах ПрАТ «Інгулецького ГЗК» з кар'єру на збагачення надходить сировина, в якій рудні мінерали представлені магнітом, гематитом, мартитом та гідроокислами – лімонітом і гетитом, а нерудні мінералами представлені кварцем, силікатами, карбонатами, сульфідами. Силікати представлені кумінгтонітом, біотитом, егірином; карбонати – сидероплезитом, доломітом, кальцитом; сульфіди – піритом і піротином. Переважаючим силікатом майже всіх технологічних різновидностей є кумінгтоніт, який характеризується довгопризматичною формою. При флотаційному процесі кумінгтоніт такої форми переходить у флотаційний концентрат, зменшуючи масову частку заліза в ньому. При більш тонкому подрібненні (від 97 до 98 % класу мінус 0,05 мм) форма зерен кумінгтоніту стає близькою до ізометричної. Зерна кумінгтоніту такої форми при флотаційному процесі переходять в пінний продукт, який далі направляється в хвости [43].

На основі аналізу наукової літератури і практики роботи гірничо-збагачувальних підприємств Кривбасу можна систематизувати за вагомістю основні характеристики неокислених магнетитових кварцитів, які впливають на ефективність технологічних процесів видобутку та переробки руди, а також рівня енерговитратності, зокрема:

1. Технологічний тип та сорт залізної руди;
2. Вміст заліза: загального ($Fe_{\text{заг}}$); магнітного ($Fe_{\text{маг}}$);
3. Вміст шкідливих домішок: кремнезем (SiO_2); глинозем (Al_2O_3); сірка, фосфор (S, P та ін.);
4. Тектурно-структурні характеристики: шаруватість; потужність шарів; розмір рудних агрегатів; пористість; змашуваність;
5. Фізико-механічні властивості: магнітне сприйняття; щільність руди; тріщинуватість; міцність; об'ємна маса;
6. Гранулометричний склад руди.

Проведені дослідження показали, що якість вихідної руди впливає на технологічні показники збагачення. При цьому зі збільшенням вмісту заліза у вихідній руді всі технологічні показники збагачення збільшуються. Однак достатньо високу щільність зв'язку має тільки залежність між вмістом заліза магнітного (α_m) та виходом концентрату (γ) $\gamma = -0,2217 + 1,5589 \cdot \alpha_m$, $r = 0,8848$. Залежність вмісту заліза у концентраті $\beta = 59,266 + 0,2024 \cdot \alpha_m$ та витягу заліза в концентрат $\varepsilon = 63,0188 + 0,5885 \cdot \alpha_m$ від вмісту заліза магнітного мають низькі коефіцієнти кореляції, відповідно $r = 0,2907$ та $r = 0,2205$.

Такий результат пояснюється тим, що за високого ступеня подрібнювання промпродуктів збагачення (95–97 % класу – 0,074 мк) з руд з різним вмістом заліза отримують при заданих умовах концентрат практично однакової якості. Однак, коли руда перед збагаченням не усереднена, спостерігається коливання виходу концентрату. У зв'язку з цим були проведені дослідження одночасного впливу вмісту заліза магнітного у руді та витягу загального заліза у концентрат на вміст заліза в концентраті (рис. 6).

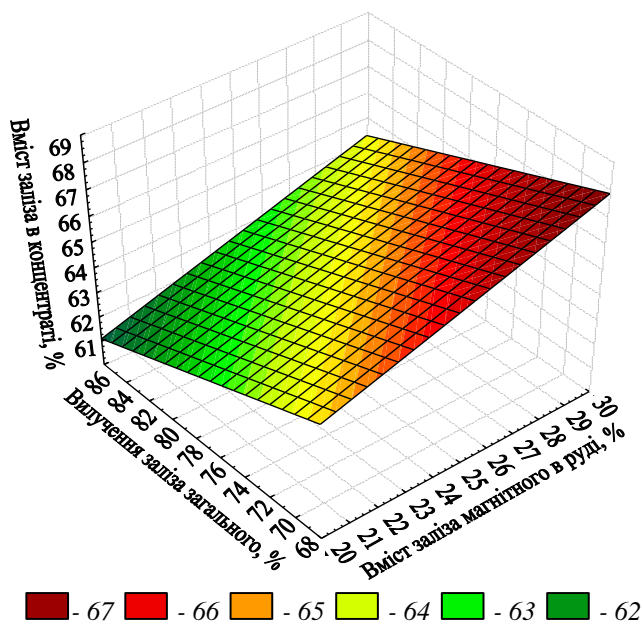


Рис. 6. Залежність вмісту заліза у концентраті від вмісту заліза магнітного у руді та його витягнення у процесі збагачення

З графіка видно, що зі збільшенням заліза магнітного в руді на 1 % та його витягу у концентрат також на 1 % вміст заліза у концентраті підвищується на 0,5 %. Однак при цьому необхідно врахувати той факт, що технологія виробничого процесу під час проведення досліджень не змінювалася. Тобто, якщо при збільшенні заліза магнітного у рудопотоці вчасно коригувати режим роботи рудозбагачувальної фабрики, то вміст заліза у концентраті відповідно те ж збільшиться.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Доведено, що при формуванні рудопотоків у кар'єрі необхідно враховувати не тільки вміст заліза загального та магнітного, але й фізико-механічні властивості типів і сортів руд, їх текстурно-структурні особливості, наявність шкідливих домішок та гранулометричний склад руди у кар'єрі, що суттєво впливають на ефективність процесу збагачення та його енерговитратність (який становить не менше 50 % поточних експлуатаційних витрат видобутку і переробки залізорудної сировини). Наведені вище залежності відображають зв'язок між технологією видобутку руди у кар'єрі та технологією її збагачування, що дає можливість визначитися з оптимальними параметрами видобутку та транспортування залізорудної сировини для формування оптимального вихідного рудопотоку з кар'єру на дробарно-збагачувальну фабрику з метою отримання кінцевої продукції запланованої якості.

Отже, оцінку варіантів впровадження енергозберігаючих, екологічних та технологічних заходів при визначенні енергетичної складової ВГТ в умовах формування екоіндустріального парку необхідно здійснювати з використанням показника енергорентабельності як критерію ефективного використання енергії на всіх етапах технологічного процесу видобутку і переробки залізорудної сировини з урахуванням інтегрального ефекту. Як підтвердження зазначеного варто зазначити, що для умов ПрАТ «ІнГЗК» встановлена залежність енергоемності екскавації від якості підривної підготовки гірських порід, зокрема, при розмірі середнього куска 450 мм питомі витрати електроенергії на екскавацію та подрібнення становлять відповідно 1,58 кВт·год/м³ та 3,13 кВт·год/т, тоді як за розміру куска 200 мм енергоемність екскавації та подрібнення не перевищує відповідно 0,6 кВт·год/м³ та 2 кВт·год/т. Це вказує на необхідність зниження енергоемності виробництва товарної продукції шляхом оптимізації розміру середнього куска при вибуховій підготовці руди з перерозподілом енергетичних витрат між вибуховим дробленням (в сторону вибухових робіт) і механічним подрібненням на збагачувальній фабриці, що дозволить підвищити продуктивність як виймально-навантажувального, так і подрібнювального устаткування на 6...10 %.

Таким чином, проведене дослідження дозволяє зазначити, що подальший розвиток наукових основ формування відкритої гірничої технології в контексті створення і функціонування потужних екоіндустріальних парків має базуватися на встановленні залежностей та взаємозв'язків природно-геологічних, фізико-механічних, технологічних, технічних і організаційних факторів, сукупний вплив яких на енергоефективність технологічних процесів видобутку та переробки залізистих кварцитів на гірничо-збагачувальних підприємствах оцінюється показниками якості товарної залізвмісткої продукції за умови дотримання раціональної енерговитратності.

Список використаної літератури:

1. Бардась А.В. Науково-технічні принципи впровадження ресурсозберігаючих екологічно безпечних геотехнологій / А.В. Бардась, К.С. Богач // Сталій розвиток економіки. – 2013. – № 1. – С. 177–180. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/sre_2013_1_40.
2. Анистратов Ю.И. Расчетно-теоретические предпосылки энергосбережения на рудных карьерах / Ю.И. Анистратов, С.А. Гончаров // Горный журнал. – 2009. – № 11. – С. 21–23.
3. Енергоефективність України: виклики часу / Є.О. Бережний та ін. // Вісник Національної академії наук України. – 2013. – № 7. – С. 61–69.
4. Давидова Ю.В. Досвід Європейського Союзу у сфері підвищення енергоефективності / Ю.В. Давидова, В.О. Струк // Ефективність державного управління. – 2013. – Вип. 34. – С. 165–172.
5. Денисенко Л.О. Система енергетичного менеджменту як основа ефективного управління енергоспоживанням / Л.О. Денисенко, Р.Л. Малоголовець // Технології та дизайн. – 2013. – № 3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2013_3_19.
6. Домбровський З.І. Напрями удосконалення управління проектами енергоефективності / З.І. Домбровський // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2012. – № 6. – С. 54–57.
7. Ляхомский А.В. Управление энергетическими ресурсами горных предприятий / А.В. Ляхомский, Г.И. Бабокин. – М. : Горная книга, 2011. – 232 с.
8. Ляхомский А.В. Энергетические показатели и критерии оценки энергоэффективности технологических процессов горного производства / А.В. Ляхомский, А.В. Пичуев, Е.Н. Перфильева // Труды международного научного симпозиума «Неделя Горняка-2014». Сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). – 2014. – С. 450–459.
9. Троицкий-Марков Т.Е. Принципы построения системы мониторинга энергоэффективности / Т.Е. Троицкий-Марков, Д.В. Сенновский // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2011. – Т. 4. – С. 34–39.
10. Новиков В.В. Интеллектуальные измерения на службе энергосбережения / В.В. Новиков // Энергоэксперт. – 2011. – № 3. – С. 68–70.

11. *Singh S.P.* New trends in drilling and blasting technology / *S.P. Singh* // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 2000. – № 14 (4). – P. 305–315. DOI: 10.1080/13895260008953338.
12. *Blom M.* Short-term planning for open pit mines: a review / *M.Blom, A.R. Pearce, P.J. Stuckey* // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2018. – № 33 (5). – P. 318–339. DOI: 10.1080/17480930.2018.1448248.
13. *Brennan T.J.* Energy efficiency resource standards: Economics and policy / *T.J. Brennan, K.L. Palmer* // Utilities Policy, 2013. – № 25, P. 58–68. DOI: 10.1016/j.jup.2013.02.001.
14. *Haiko H.* The Philosophy of mining: Historical aspect and future prospect / *H.Haiko, P.Saik, V.Lozynskyi* // Philosophy & Cosmology. – 2019. – № 22. – P. 76–90. DOI: 10.29202/phil-cosm/22/6.
15. *Maiorano J.* Beyond technocracy: Forms of rationality and uncertainty in organizational behaviour and energy efficiency decision making in Canada / *J.Maiorano* // Energy Research and Social Science. – 2018. – № 44. – P. 385–398. DOI: 10.1016/j.erss.2018.05.007.
16. Sustainability in mining, minerals and energy: New processes, pathways and human interactions for a cautiously optimistic future / *C.J. Moran, S.Lodhia, N.C. Kunz, D.Huisingsh* // Journal of Cleaner Production. – 2014. – № 84. – P. 1–15. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.016.
17. *Smith C.B.* Industrial energy efficiency and energy management / *C.B. Smith, B.L. Caphart, W.M. Rohrer* // Energy efficiency and renewable energy: Handbook, 2015. – P. 723–808. DOI: 10.1201/b18947.
18. Energy Consumption Model and Energy Efficiency of Machine Tools: A Comprehensive Literature Review / *L.Zhou, J.Li, F.Li and other* // Journal of Cleaner Production. – 2016. – № 112. – P. 3721–3734. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.093.
19. A time dependency prediction of the number of mining subsidence events over a large mining field with uncertainties considerations / *O.Decka, H.Baroudib, A.Hosnic, Y.Gueniffey* // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – № 105. – P. 62–72. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2018.03.010.
20. *Medvedeva O.* Development and exploitation of storages of enrichment process wastes as anthropogenic deposits / *O.Medvedeva* // New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining, 2015. – P. 567–573. DOI: 10.1201/b19901-98.
21. *Shashenko O.M.* Comparative analysis of two failure criteria for rocks and massifs / *O.M. Shashenko, O.S. Kovrov* // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2016. – № 6. – P. 54–59.
22. *Filippov L.O.* An Overview of the Beneficiation of Iron Ores via Reverse Cationic Flotation / *L.O. Filippov, V.V. Severov, I.V. Filippova* // International Journal of Mineral Processing. – 2014. – № 127. – P. 62–69. DOI: 10.1016/j.minpro.2014.01.002.
23. *Hellmer S.* The Iron Ore World Market in the Early Twenty-first Century – the Impact of the Increasing Chinese Dominance / *S.Hellmer, J.Ekstrand* // Mineral Economics. – 2012. – № 25 (2–3). – P. 89–95. DOI: 10.1007/s13563-012-0021-1.
24. *Ma W.* Forecasting Iron Ore Import and Consumption of China Using Grey Model Optimized by Particle Swarm Optimization Algorithm / *W.Ma, X.Zhu, M.Wang* // Resources Policy. – 2013. – № 38 (4), P. 613–620. DOI: 10.1016/j.resourpol.2013.09.007.
25. *Yellishetty M.* Iron Ore and Steel Production Trends and Material Flows in the World: Is this Really Sustainable? / *M.Yellishetty, P.G. Ranjith, A.Tharumarajah* // Resources, Conservation and Recycling. – 2010. – № 54 (12). – P. 1084–1094.
26. *Темченко А.Г.* Научные основы оценки и выбора энергосберегающих технологий открытой разработки железорудных месторождений : дисс. ... д.т.н. : 05.15.03 / *А.Г. Темченко*. – Днепропетровск : НГУ, 2001. – 355 с.
27. *Бизов В.Ф.* Управління якістю продукції гірничих підприємств : підручник для вузів за напрямом «Гірництво» в 14 т. / *В.Ф. Бизов* / Бібліотека гірничого інженера. – Кривий Ріг : Мінерал, 2001. – Т. 8. – 293 с.
28. *Бастан П.П.* Теория и практика усреднения руд / *П.П. Бастан, Е.И. Азбель, Е.И. Ключикин*. – М. : Недра, 1979. – 255 с.
29. *Швец И.Н.* Магнитные свойства горных пород и руд Криворожского бассейна / *И.Н. Швец, Г.В. Тохтуев*. – К., 1976. – 56 с.
30. *Пілов П.І.* Методи математичної статистики та теорії ймовірностей в збагаченні корисних копалин : навч. посібник для вузів / *П.І. Пілов, М.Т. Анісімов, В.М. Анісімов* / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, ДВНЗ «Нац. гірничий університет». – Дніпропетровськ : НГУ, 2012. – 125 с.
31. Исследование надёжности функционирования карьерных рудопотоков / *Н.И. Дядечкин, А.А. Темченко, Г.В. Константинов, Г.В. Шиповский* // Горный журнал. – 2013. – № 12. – С. 82–83.
32. *Анистратов Ю.И.* Технологические потоки на карьерах (Энергетическая теория открытых горных работ) / *Ю.И. Анистратов*. – М. : Глобус, 2005. – 304 с.
33. *Авдохин В.М.* Современное состояние и основные направления развития процессов глубокого обогащения железных руд / *В.М. Авдохин, С.Л. Губин* // Горный журнал. – 2007. – № 2. – С. 58–64.
34. *Кармазин В.В.* Перспективное развитие технологии обогащения железорудного сырья / *В.В. Кармазин* // Горный журнал. – 2008. – № 12. – С. 70–73.
35. *Зимин А.В.* Флотационная доводка магнетитовых концентратов и экологические аспекты ее воздействия на окружающую среду / *А.В. Зимин, Ю.П. Назаров, Н.А. Юрлова* // Горный журнал. – 2012. – № 11. – С. 91–96.
36. *Темченко А.А.* Система оперативной оценки и управления качеством железорудного сырья на ГОКах Кривбасса с применением геофизических методов контроля / *А.А. Темченко* // Оперативный контроль управления качеством минерального сырья при добыче и переработке : сборник научных трудов второго международного симпозиума. – Ялта, 1999. – С. 168–174.

37. Темченко А.А. Обоснование и совершенствование этапов стабилизации качества рудопотоков / А.А. Темченко, В.Н. Коробко // Новое в технологии, технике и экономике переработки минерального сырья : сб. научн. труд. института «Механообрчермета», 1999. – Ч. 3. – С. 144–147.
38. Темченко А.А. Перспективы внедрения информационно-оперативной технологии стабилизации качества железорудного сырья / А.А. Темченко, С.А. Харин, А.Ю. Гук // Разработка рудных месторождений. – 2001. – Вып. 76. – С. 70–74.
39. Темченко О.А. Інформаційна система стабілізації якості рудопотоків для підвищення ефективності роботи залізородних кар'єрів / О.А. Темченко, Г.В. Константінов, О.В. Шамрай // Вісник КТУ. – 2006. – № 11. – С. 137–141.
40. Темченко О.А. Управління технологічними потоками з урахуванням застосування засобів оперативного контролю вмісту корисного компонента в кар'єрі / О.А. Темченко, О.В. Шамрай // Пути решения проблем открытой и подземной разработки МПИ : сб. научн. трудов. – Кривой Рог : ГП «НИГРИ», 2007. – С. 170–181.
41. Темченко О.А. Систематизация кар'єрних технологічних схем рудопотоків / О.А. Темченко, О.В. Шамрай // Вісник КТУ. – 2007. – № 19. – С. 209–213.
42. Темченко А.А. Формирование оптимальных карьерных рудопотоков в контексте повышения эффективности железорудного производства / А.А. Темченко // Рациональное освоение недр : научно-технич. и методич. журнал. – 2014. – № 1. – С. 44–47.
43. Особенности флотации железных руд / Т.А. Олейник, Л.В. Скляр, М.О. Олейник, А.Ю. Скляр // Збагачення корисних копалин. – 2017. – Вып. 67 (108). – 13 с.
44. The Role of Higher Education Institutions in the Development of EcoIndustrial Parks in Terms of Sustainable Development / S.Tulchynska, N.Shevchuk, A.Kleshchov and other // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. – 2021. – Vol. 21. – № 10. – P. 317–323.
45. Conceptual Principles of the Transformation of Industrial Parks into Eco-Industrial Ones in the Conditions of Sustainable Development / N.Shevchuk, S.Tulchynska, L.Severyn-Mrachkovska and other // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. – 2021. – Vol. 21. – № 12. – P. 349–355.
46. Yakovlieva A. Energy Efficient Renewable Feedstock for Alternative Motor Fuels Production: Solutions for Ukraine / A.Yakovlieva, S.Boichenko // Studies in Systems, Decision and Control this link is disabled. – 2020. – № 298. – P. 247–259.

References:

1. Bardas', A.V. and Bogach, K.S. (2013), «Naukovo-tehnichni pryncypy vprovadzhenja resursozberigajuchykh ekologichno bezpechnykh geotehnologij», *Stalij rozvytok ekonomiky*, No. 1, pp. 177–180, [Online], available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sre_2013_1_40
2. Anistratov, Yu.I. and Goncharov, S.A. (2009), «Raschëtno-teoreticheskie predposylki energosberezheniya na rudnykh kar'erakh», *Gornyi zhurnal*, No. 11, pp. 21–23.
3. Berezhnyj, Je.O. et al. (2013), «Energoeffektivnist' Ukrainy: vykyky chasu», *Visnyk Nacional'noi' akademii' nauk Ukrainy*, No. 7, pp. 61–69.
4. Davydova, Ju.V. and Struk, V.O. (2013), «Dosvid Jevropejs'kogo Sojuzu u sferi pidvyshhennja energoeffektivnosti», *Efektivnist' derzhavnogo upravlinnja*, Issue 34, pp. 165–172.
5. Denysenko, L.O. and Maloglovec', R.L. (2013), «Systema energetychnogo menedzhmentu jak osnova efektyvnogo upravlinnja energospozhyvannjam», *Tehnologii' ta dizajn*, No. 3, [Online], available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2013_3_19.
6. Dombrovs'kyj, Z.I. (2012), «Napryamy udoskonalennja upravlinnja proektamy energoeffektivnosti», *Visnyk L'viv's'kogo derzhavnogo universytetu bezpeky zhyttjedijal'nosti*, No. 6, pp. 54–57.
7. Lyakhomskii, A.V. and Babokin, G.I. (2011), *Upravlenie energeticheskimi resursami gornykh predpriyatij*, Gornaya kniga, M., 232 p.
8. Lyakhomskii, A.V., Pichuev, A.V. and Perfil'eva, E.N. (2014), «Energeticheskie pokazateli i kriterii otsenki energoeffektivnosti tekhnologicheskikh protsessov gornogo proizvodstva», *Trudy mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma «Nedelya Gornyaka-2014»*, Sbornik statei. Otdel'nyi vypusk Gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenya (nauchno-tehnicheskogo zhurnala), pp. 450–459.
9. Troitskii-Markov, T.E. and Sennovskii, D.V. (2011), «Printsipy postroeniya sistemy monitoringa energoeffektivnosti», *Monitoring. Nauka i bezopasnost'*, Vol. 4, pp. 34–39.
10. Novikov, V.V. (2011), «Intellektual'nye izmereniya na sluzhbe energosberezheniya», *Energookspert*, No. 3, pp. 68–70.
11. Singh, S.P. (2000), «New trends in drilling and blasting technology», *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, No. 14 (4), pp. 305–315, doi: 10.1080/13895260008953338.
12. Blom, M., Pearce, A.R. and Stuckey, P.J. (2018), «Short-term planning for open pit mines: a review», *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, No. 33 (5), pp. 318–339, doi: 10.1080/17480930.2018.1448248.
13. Brennan, T.J. and Palmer, K.L. (2013), «Energy efficiency resource standards: Economics and policy», *Utilities Policy*, No. 25, pp. 58–68, doi: 10.1016/j.jup.2013.02.001.
14. Haiko, H., Saik, P. and Lozynskiy, V. (2019), «The Philosophy of mining: Historical aspect and future prospect», *Philosophy & Cosmology*, No. 22, pp. 76–90, doi: 10.29202/phil-cosm/22/6.
15. Maiorano, J. (2018), «Beyond technocracy: Forms of rationality and uncertainty in organizational behaviour and energy efficiency decision making in Canada», *Energy Research and Social Science*, No. 44, pp. 385–398, doi: 10.1016/j.erss.2018.05.007.

16. Moran, C.J., Lodhia, S., Kunz, N.C. and Huisingh, D. (2014), «Sustainability in mining, minerals and energy: New processes, pathways and human interactions for a cautiously optimistic future», *Journal of Cleaner Production*, No. 84, pp. 1–15. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.09.016.
17. Smith, C.B., Capehart, B.L. and Rohrer, W.M. (2015), «Industrial energy efficiency and energy management», *Energy efficiency and renewable energy, Handbook*, pp. 723–808, doi: 10.1201/b18947.
18. Zhou, L., Li, J., Li, F. et al. (2016), «Energy Consumption Model and Energy Efficiency of Machine Tools: A Comprehensive Literature Review», *Journal of Cleaner Production*, No. 112, pp. 3721–3734, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.093.
19. Decka, O., Baroudib, H., Hosnic, A. and Gueniffey, Y. (2018), «A time dependency prediction of the number of mining subsidence events over a large mining field with uncertainties considerations», *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, No. 105, pp. 62–72, doi: 10.1016/j.ijrmmms.2018.03.010.
20. Medvedeva, O. (2015), «Development and exploitation of storages of enrichment process wastes as anthropogenic deposits», *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, pp. 567–573, doi: 10.1201/b19901-98.
21. Shashenko, O.M. and Kovrov, O.S. (2016), «Comparative analysis of two failure criteria for rocks and massifs», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No. 6, pp. 54–59.
22. Filippov, L.O., Severov, V.V. and Filippova, I.V. (2014), «An Overview of the Beneficiation of Iron Ores via Reverse Cationic Flotation», *International Journal of Mineral Processing*, No. 127, pp. 62–69, doi: 10.1016/j.minpro.2014.01.002.
23. Hellmer, S. and Ekstrand, J. (2012), «The Iron Ore World Market in the Early Twenty-first Century – the Impact of the Increasing Chinese Dominance», *Mineral Economics*, No. 25 (2–3), pp. 89–95, doi: 10.1007/s13563-012-0021-1.
24. Ma, W., Zhu, X. and Wang, M. (2013), «Forecasting Iron Ore Import and Consumption of China Using Grey Model Optimized by Particle Swarm Optimization Algorithm», *Resources Policy*, No. 38 (4), pp. 613–620, doi: 10.1016/j.resourpol.2013.09.007.
25. Yellishetty, M., Ranjith, P.G. and Tharumarajah, A. (2010), «Iron Ore and Steel Production Trends and Material Flows in the World: Is this Really Sustainable?», *Resources, Conservation and Recycling*, No. 54 (12), pp. 1084–1094.
26. Temchenko, A.G. (2001), Nauchnye osnovy otsenki i vybora energosberegayushchikh tekhnologii otkrytoi razrabotki zhelezorudnykh mestorozhdenii, D.Sc. Thesis of dissertation, 05.15.03 «Otkrytye gornye raboty», NGU, Dnepropetrovsk, 355 p.
27. Byzov, V.F. (2001), *Upravlinnja jakistju produkcii' gimnych pidprijemstv*, pidruchnyk dlja vuziv za naprjamom «Girnyctvo» v 14 t., Biblioteka girnychogo inzhenera, Mineral, Kryvyj Rig, Vol. 8, 293 p.
28. Bastan, P.P., Azbel', E.I. and Klyuchkin, E.I. (1979), *Teoriya i praktika usredneniya rud*, Nedra, M., 255 p.
29. Shvets, I.N. and Tokhtuev, G.V. (1976), *Magnimye svoystva gornyx porod i rud Krivorozhskogo baseina*, K., 56 p.
30. Pilov, P.I., Anisimov, M.T. and Anisimov, V.M. (2012), *Metody matematychnoi' statystyky ta teorii' jmovirnostej v zbagachenni korysnykh kopalyn*, navch. posibnyk dlja vuziv, Ministerstvo osvity i nauky, molodi ta sportu Ukrainy, DVNZ «Nac. gimnychij universytet», NGU, Dnipropetrovsk, 125 p.
31. Dyadechkin, N.I., Temchenko, A.A., Konstantinov, G.V. and Shipovskii, G.V. (2013), «Issledovanie nadezhnosti funkcionirovaniya kar'ernykh rudopotokov», *Gornyi zhurnal*, No. 12, pp. 82–83.
32. Anistratov, Yu.I. (2005), *Tekhnologicheskie potoki na kar'erakh (Energeticheskaya teoriya otkrytykh gornyx robot)*, Globus, M., 304 p.
33. Avdokhin, V.M. and Gubin, S.L. (2007), «Sovremennoe sostoyanie i osnovnye napravleniyai razvitiya protsessov glubokogo obogashcheniya zheleznykh rud», *Gornyi zhurnal*, No. 2, pp. 58–64.
34. Karmazin, V.V. (2008), «Perspektivnoe razvitie tekhnologii obogashcheniya zhelezorudnogo syr'ya», *Gornyi zhurnal*, No. 12, pp. 70–73.
35. Zimin, A.V., Nazarov, Yu.P. and Yurlova, N.A. (2012), «Flotatsionnaya dovodka magnetitovykh konsentratov i ekologicheskie aspekty ee vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredyu», *Gornyi zhurnal*, No. 11, pp. 91–96.
36. Temchenko, A.A. (1999), «Sistema operativnoi otsenki i upravleniya kachestvom zhelezorudnogo syr'ya na GOKakh Krivbassa s primeneniem geofizicheskikh metodov kontrolya», *Operativnyi kontrol' upravleniya kachestvom mineral'nogo syr'ya pri dobyche i pererabotke*, sbornik nauchnykh trudov vtorogo mezhdunarodnogo simpoziuma, Yalta, pp. 168–174.
37. Temchenko, A.A. and Korobko, V.N., (1999), «Obosnovanie i sovershenstvovanie etapov stabilizatsii kachestva rudopotokov», *Novoe v tekhnologii, tekhnike i ekonomike pererabotki mineral'nogo syr'ya*, sb. nauchn. trud. instituta «Mekhanobrchermeta», Part 3, pp. 144–147.
38. Temchenko, A.A., Kharin, S.A. and Guk, A.Yu. (2001), «Perspektivy vnedreniya informatsionno-operativnoi tekhnologii stabilizatsii kachestva zhelezorudnogo syr'ya», *Razrabotka rudnykh mestorozhdenii*, Issue 76, pp. 70–74.
39. Temchenko, O.A., Konstantinov, G.V. and Shamraj, O.V. (2006), «Informacijna sistema stabilizatsii' jakosti rudopotokiv dlja pidvyshhennja efektyvnosti roboty zalizorudnykh kar'jeriv», *Visnyk KTU*, No. 11, pp. 137–141.
40. Temchenko, O.A. and Shamraj, O.V. (2007), «Upravlinnja tehnologichnymy potokamy z urahuvannjam zastosuvannja zasobiv operatyvnogo kontrolju vmistu korysnogo komponenta v kar'jeri», *Puti resheniya problem otkrytoi i podzemnoi razrabotki MPI*, sb. nauchn. trudov., GP «NIGRI», Krivoi Rog, pp. 170–181.
41. Temchenko, O.A. and Shamraj, O.V. (2007), «Systematyzacija kar'jernykh tehnologichnykh shem rudopotokiv», *Visnyk KTU*, No. 19, pp. 209–213.
42. Temchenko, A.A. (2014), «Formirovanie optimal'nykh kar'ernykh rudopotokov v kontekste povysheniya effektivnosti zhelezorudnogo proizvodstva», *Ratsional'noe osvoenie nedr*, nauch.-tekhn. i metod. zhurnal, No. 1, pp. 44–47.
43. Oleinik, T.A., Sklyar, L.V., Oleinik, M.O. and Sklyar, A.Yu. (2017), «Osobennosti flotatsii zheleznykh rud», *Zbagachennya korisnykh kopalyn*, Issue 67 (108), 13 p.

44. Tulchynska, S., Shevchuk, N., Kleshchov, A. et al. (2021), «The Role of Higher Education Institutions in the Development of EcoIndustrial Parks in Terms of Sustainable Development», *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 21, No. 10, pp. 317–323.
45. Shevchuk, N., Tulchynska, S., Severyn-Mrachkovska, L. et al. (2021), «Conceptual Principles of the Transformation of Industrial Parks into Eco-Industrial Ones in the Conditions of Sustainable Development», *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 21, No. 12, pp. 349–355.
46. Yakovlieva, A. and Boichenko, S. (2020), «Energy Efficient Renewable Feedstock for Alternative Motor Fuels Production: Solutions for Ukraine», *Studies in Systems, Decision and Control* this link is disabled, No. 298, pp. 247–259.

Темченко Анатолій Георгійович – доктор технічних наук, професор кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. М.Т. Бакка Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

– енергозберігаючі технології відкритої розробки залізрудних родовищ.

E-mail: temchenko_oa50@ukr.net.

Темченко Олександр Анатолійович – доктор технічних наук, професор кафедри економіки та підприємництва Навчально-наукового економічного інституту Державного університету економіки і технологій.

<https://orcid.org/0000-0003-0020-2430>.

Наукові інтереси:

– енергоефективність технологій відкритої розробки родовищ та конкурентоспроможність гірничодобувних підприємств.

E-mail: temchenko_oa50@ukr.net.

Коробійчук Валентин Вацлавович – доктор технічних наук, професор кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. М.Т. Бакка Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-1576-4025>.

Наукові інтереси:

– видобуток та обробка природного каменю;

– гірництво.

E-mail: korobiichykv@gmail.com.

Шевчук Наталія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри економіки і підприємництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0003-0355-9793>.

Наукові інтереси:

– управління підприємством, конкурентоспроможність та енергоефективність підприємств.

E-mail: nata520522@gmail.com.

Піскун Ігор Анатолійович – аспірант кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. М.Т. Бакка Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-1658-5344>.

Наукові інтереси:

– обробка природного каменю;

– розробка родовищ корисних копалин.

Наукові дослідження та приведені результати в статті отримано авторами самостійно в контексті виконання ініціативної творчої науково-дослідної роботи.

Temchenko A.H., Temchenko O.A., Korobiichuk V.V., Shevchuk N.A., Piskun I.A.

Energy efficiency assessment of iron ore enrichment in the context of the formation of eco-industrial parks

Goal. Assessment of the influence of textural-structural and physical-mechanical characteristics of ferruginous quartzites in deep quarries of Kryvbas on the energy efficiency of production and enrichment of raw materials during its technological processing in the conditions of formation of an eco-industrial park.

Methodology. The methodological basis of the research is a systematic approach to the problem of assessing the textural, structural and physical-mechanical characteristics of ferruginous quartzites and the problems of energy efficiency and enrichment of mineral raw materials in the regional consideration of the Kryvyi Rih iron ore basin. In accordance with the specifics of research aimed at achieving the tasks set and obtaining technological dependencies, the following methods were mainly used in the work: analytical, graphoanalytic and mathematical statistics.

Results. Quantitative relationships of iron content depending on the physical and mechanical characteristics of quartzites and technological enrichment indicators are revealed. It is established that when forming ore flows in the quarry, it is

necessary to take into account not only the iron content of general and magnetic, but also the physical and mechanical properties of types and grades of ores, their textural and structural features, the presence of harmful impurities and the granulometric composition of ore in the quarry, which significantly affect the efficiency of the enrichment process and its energy consumption. It is noted that the increase in energy efficiency is achieved by introducing reasonable management and technological measures, taking into account the influence of textural, structural and physical-mechanical characteristics of ferruginous quartzites in the quarry on the quality indicators of further processing of mineral raw materials at the ore processing plant.

Scientific novelty. The dependencies and interrelations of natural-geological, physical-mechanical, technical, organizational and environmental factors, and their combined impact on the efficiency of technological processes of extraction and processing of ferruginous quartzites, provided that rational energy consumption is observed, are established.

Practical significance. The results obtained are important and useful for determining the energy efficiency of enrichment processes in the iron ore industry in the context of persistent environmental deterioration, significant fluctuations in price characteristics in the iron ore raw material markets and difficult business conditions at mining enterprises due to the negative impact of previous non-cost-effective activities and quarantine restrictions due to the global pandemic in recent years.

Keywords: energy consumption; ferruginous quartzites; energy efficiency; enrichment; eco-industrial park.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2022.