

класичної теорії експериментам. Розраховано відстані до місця появи «шийки» в зразку, що розтягується, і розподіл внутрішніх зусиль уздовж осі.

Безперечною перевагою розрахунку систем на основі дослідження внутрішньої енергії є можливість постановки та вирішення суттєво нелінійних задач будівельної механіки, задач на температурні впливи та інші впливи, що змушують відстежувати зміну їх величин та положення.

Дослідження функціоналу внутрішньої енергії деформації конструктивної системи призводить до математичної моделі завдань на власні значення. Спільність формулювання дозволяє стверджувати, що подібна постановка задачі охоплює всі види задач будівельної механіки: проектна, перевірна та оптимізаційна. Наведена методика може використовуватися у вивченні розвитку деформацій в основах будівель та споруд, фундаментних конструкцій.

Список літератури

1. **Баженев В.А., Перельмутер А.В., Шинков О.В.** Будівельна механіка. Комп'ютерні технології і моделювання. – К.: ПАТ «ВІПОЛ», 2013. – 896 с.
2. **Гольдштейн Ю.Б., Соломеш М.А.** Вариационные задачи статики оптимальных стержневых систем. - Л.: изд. Ленинградского ун-та, 1980.- 208 с.
3. **Золотов А.Б., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Мозгалева М.Л.** / Математические методы в строительной механике (с основами теории обобщенных функций). М.: Издательство АСВ, 2008. - 336 с.
4. **Ступишин Л.Ю.** Критические уровни внутренней потенциальной энергии деформации твердых деформируемых тел: монография / **Л.Ю. Ступишин**; Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, г. Москва, 2022. - 387 с. DOI 10.47581/2022/Stupushin.01.
5. **Баженев В.А.** Варіаційні принципи і методи будівельної механіки: Підручник. – К.: Каравела, 2012. – 720с.
6. **Тарапов И.Е.** Механика сплошной среды. Ч.2. Общие законы кинематики и динамики.-- Харьков: Золотые страницы, 2002.—516 с.
7. **Баженев В.А.,** Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок./ – К.: КНУБА, 2000. –386 с.
8. **Лучко Й. Й., Мимлін С. В.** Динаміка стержневих систем та споруд. - Львів: Каменяр, 2018. - 524 с.
9. **Czichos H.** Physics of failure//Handbook of technical diagnostics / Berlin: Springer-Verlag, 2013. Pp. 23-40.
10. **Беллман Р., Энджел Э.** Динамическое программирование и уравнения в частных производных. М.: Мир, 1974. 207 с.
11. **Курант Р., Гильберт Д.** Методы математической физики. Т. I. М.: Гос-техиздат, 1951. - 476 с.
12. **Михлин С.Г.** Вариационные методы в математической физике. - М.: Наука, 1970. - 512 с.

Рукопис подано до редакції 17.04.2023

УДК 622.788.36

С.Г. САВЕЛЬЄВ, д-р техн. наук, проф., **О.В. БАБАЄВСЬКА**, асист.,
Т.П. ЯРОШ, канд. техн. наук, доц., **М.М. КОНДРАТЕНКО**, ст. викладач
Криворізький національний університет

АНАЛІЗ ПРИЙОМІВ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ВОЛОГОСТІ ШИХТИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ

Відзначено існування декількох прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів, більшість яких ґрунтуються на використанні водно-фізичних характеристик шихти або показниках гранулометричного складу грудкуватого матеріалу. Проведено аналіз використовуваних методик, що визначення характеристичних вологостей шихти, що застосовуються для визначення оптимальної вологості тонкодисперсних матеріалів, а також формул для її розрахунку. Результати аналізу вказують на певну перевагу застосування прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів, які базуються на характеристичних вологостях шихти, що піддається огрудкуванню, завдяки їх більшій універсальності. Вказано на доцільність формування стандартних методів визначення характеристичних вологостей матеріалів, які входять до складу шихти для виробництва залізрудних окатишів.

Метою роботи є порівняльна оцінка достовірності результатів визначення за різними методиками і формулами оптимальної вологості тонкодисперсних матеріалів, які використовуються при виробництві окатишів.

Методи дослідження. В роботі використані загальнологічні методи наукового дослідження – аналіз і синтез, аналогія, узагальнення.

Наукова новизна роботи. На основі проведеного аналізу встановлено, що основні прийоми визначення оптимальної вологості шихти з тонкодисперсних матеріалів, яка використовується для виробництва залізорудних окатишів, мають приблизно однакову достовірність, але більшу перспективу мають такі, що базуються на застосуванні характеристикних вологостей і грудкуємості матеріалу.

Практична значимість роботи полягає у представленні практичних рекомендацій щодо використання прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів, що мають високу представницькість результатів і не вимагають багато часу на їх визначення.

Результати роботи дають підстави вважати, що розробка і застосування прийомів визначення оптимальної вологості залізорудної шихти для ефективного протікання процесу її грануляції є одним з важливих напрямків розвитку теорії і технології виробництва окатишів, подальший розвиток якого пов'язаний з встановленням стандартних методів визначення водно-фізичних характеристик (характеристичних вологостей) шихт, які піддаються огрудкуванню, і ефективним використанням їх для визначення вмісту вологи в шихті, який сприяє отриманню сирих окатишів кондиційної якості.

Ключові слова: вологості, матеріал, метод визначення, гранулометричний склад, окатиш, вологість

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. На сучасному етапі розвитку металургії чорних металів залізорудні окатиші залишаються, поряд з агломератом, основним компонентом шихти доменних печей, а також найбільш поширеною сировиною для процесів прямого відновлення заліза. На першій стадії технології виробництва цього виду металургійної сировини відбувається отримання сирих окатишів шляхом огрудкування зволоженої тонкодисперсної шихти. Ефективність цього процесу вирішальною мірою визначається величиною вологості шихти, що піддається огрудкуванню, яка повинна мати оптимальне значення. Тому питання, пов'язані з визначенням оптимальної вологості шихти, що піддається огрудкуванню, вже десятки років привертають увагу вчених-дослідників і виробників, які працюють на фабриках огрудкування.

В той же час залишаються невизначеними і потребують уточнення деякі особливості застосування прийомів розрахунку значень оптимальної вологості шихти огрудкування, доцільності використання окремих методів в конкретних умовах виробництва. Таким чином аналіз прийомів визначення оптимальної вологості шихти для огрудкування сприятиме більш ефективному використанню цього важливого елемента технології отримання сирих окатишів, що забезпечить в цілому покращення техніко-економічних показників роботи фабрик огрудкування – підвищення якості окатишів і продуктивності випалювальних агрегатів.

Аналіз досліджень і публікацій. Найбільш поширене уявлення серед дослідників і виробників щодо оптимальної вологості шихти в процесі огрудкування асоціюється з наявністю в шихті такого вмісту вологи, який сприяє отриманню сирих окатишів максимальної міцності [1; 2, с. 133]. В той же час відоме дещо інше розуміння цього терміну. Згідно авторитетного інформаційно-технічного довідника з найкращих доступних технологій в галузі видобутку і збагачення залізних руд [3, с. 75], вважається, що оптимальною вологістю є такий вміст вологи в шихті, який забезпечує максимальний вихід з процесу огрудкування сирих окатишів заданого розміру. Так чи інакше, обидва трактування оптимальної вологості шихти для огрудкування пов'язані з отриманням кращих результатів роботи агрегату, який виробляє сирі окатиші.

Теоретичним підґрунтям для розробки прийомів визначення оптимальної вологості тонкодисперсного матеріалу, яким є шихта для виробництва окатишів, є аналіз фізико-хімічної взаємодії рідкої та твердої фаз в процесі огрудкування. Подрібнені залізорудні матеріали є гідрофільними дисперсними системами, для яких характерна інтенсивна взаємодія з водою. Система «тонкоподрібнений залізорудний концентрат – вода» намагається знизити свою енергію шляхом зменшення поверхневого натягу на межі розділення фаз, а також за рахунок зменшення ступеню дисперсності частинок концентрату. Це означає, що дана система має термодинамічне прагнення до огрудкування [4, с. 9].

Поверхня будь-якої рідини і твердого тіла володіє силовим полем, здатним захоплювати і утримувати сторонні атоми і молекули. Аналогічні сили зчеплення з'являються між двома макроскопічними тілами, поверхні яких зближені до дуже малих відстаней. Однак дія цього ефекту не поширюється на частинки крупніше 0,005 мм тому, що мікрорельєф їх поверхні не дозволяє зближення на відстань, де проявляється взаємодія силових полів. На відміну від твердих частинок, рідина здатна змінювати свою поверхню, повторюючи рельєф поверхні твердої частинки.

В результаті виникає необхідний контакт – сила зв'язку частинки з рідиною досягає значної величини. Таким чином, шар рідини між двома частинками здатний зв'язувати сусідні частинки. Для цього необхідно, щоб достатня сила зчеплення була не тільки між рідиною і частинкою, але й між молекулами самої рідини. Такими специфічними властивостями має вода, яка для частинок залізорудних матеріалів є доволі сильною «клеючою» речовиною [5, с. 55, 56].

Міцність агрегату (грудки) визначається трьома чинниками:

міцністю контактної пари, що залежить від типу зволожувальної рідини, гранулометричного складу матеріалу і визначається відомою формулою Лапласа;

кількістю контактів в одиниці об'єму матеріалу;

кількістю води в точці контакту (*ММВ*, *МКВ*).

Максимальна молекулярна вологоємність матеріалу (*ММВ*) є величиною вологості, що відповідає максимальній товщині міцно сорбованого шару води.

Вологість матеріалу, що відповідає заповненню вільного об'єму контактної пари без утворення манжети між ними, є нерухомою капілярно-стиковою вологоємністю (*НКВ*) і характеризує нижню межу робочої вологості грудкуваного матеріалу.

Максимальна капілярна вологоємність (*МКВ*) – це величина вологості під час заповнення капілярів агрегату дисперсних частинок водою за збереження трифазної системи повітря – рідина – тверде (верхня межа робочої вологості матеріалу) [6, с. 222].

Вітчизняними і закордонними вченими теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена пряма залежність між величинами питомої поверхні шихти і капілярної сили в сирому окатиші та його опором роздавлюванню [7, с. 33, 34].

На міцність зчеплення часток впливають наступні фактори: 1) вміст води в залізорудній шихті; 2) гранулометричний склад сипкого матеріалу; 3) природа грудкуемого матеріалу; 4) умови утворення гранул. Міцність грудки P' підпорядковується залежності [8, с. 64]:

$$P' = kSp[(1 - \varepsilon)/\varepsilon], \quad (1)$$

де k – коефіцієнт, що враховує природу матеріалу; S – питома поверхня шихти; ρ – густина матеріалу; ε – пористість окатиша.

Вплив питомої поверхні шихти на міцність окатишів наведено на рис. 1 [6, с. 224].

Однак роль питомої поверхні залізорудного концентрату проявляється не тільки в позитивному впливі на зчеплення частинок. Тенденція до зростання міцності окатишів внаслідок збільшення кількості контактів може перекриватися негативним впливом звуження діапазону коливання розміру частинок і, отже, зниженням густини окатишів. Крім того, зростання питомої поверхні призводить до збільшення робочої вологості шихти, що спричиняє зростання пористості сухих окатишів і, отже, менш сприятливі умови для протікання процесу зміцнення. За результатами дослідження процесу огрудкування та зміцнення окатишів з лебединського концентрату різної питомої поверхні спостерігається екстремальний зв'язок між питомою поверхнею концентрату та металургійними властивостями обпалених окатишів [8, с. 64].



Рис. 1. Залежність міцності сирих окатишів від величини питомої поверхні шихти: 1 – неофлосовані; 2 – офлосовані до основності 0,8–1,0

Таким чином, треба розуміти [4, с. 9], що грудкуємість неможливо визначити однозначно, оскільки вона є результатом одночасної дії багатьох факторів, насамперед гранулометричного складу матеріалу, форми і властивостей поверхні зерен, хіміко-мінералогічного складу.

Суттєве зауваження щодо використання характеристичних вологоємностей для розрахунку коефіцієнта грудкуємість [9] пов'язане з застосуванням закону фільтрації Дарсі для визначення швидкості насичення матеріалу водою. За допомогою цього закону неможливо певною мірою описати швидкість насичення, зважаючи на те, що він є емпіричним і адекватно описує характер руху порової рідини лише за відносно малих градієнтів тиску, не враховуючи механічних впливів при грануляції.

Крім того, оцінка грудкуємості на основі характеристичних вологоємностей не враховує вплив на сили зчеплення факторів, що визначається станом шару зерен частинок шихти, і, насамперед, наявністю полярних радикалів і атомів з великим негативним електростатичним потенціалом. При тому, що теоретичний аналіз вказує на те, що магнетитовий концентрат піддається великому впливу електростатичних і магнітних сил [10].

Однак, попри всі зауваження щодо недоліків використання водно-фізичних характеристик для оцінки придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування, саме вони, наряду з гранулометричним складом, залишаються найбільш поширеним підґрунтям для встановлення коефіцієнтів грудкуємості й оптимальної вологості шихти, що піддається огрудкуванню.

Для характеристики гранулометричного складу залізорудного концентрату – основного компонента шихти для виробництва окатишів – звичайно використовують вміст у ньому певних часток (наприклад, менше 0,074; 0,050; 0,044 мм.) і питому поверхню. Практика огрудкування показує, що у випробуваних межах деяке збільшення частки дрібних часток у шихті сприятливо позначається на процесі грануляції і якості сирих і обпалених окатишів. Міцність окатишів тим вища, чим більше число контактів між окремими частками, кількість яких збільшується зі зменшенням розміру часток [11, с. 25, 26].

Сирі окатиші задовільної міцності можна одержати при подрібненні концентрату до крупності $\leq 0,2$ мм. Однак існують і більш жорсткі вимоги, відповідно до яких весь матеріал розмелюють, наприклад, до крупності $\leq 0,15$ мм, у тому числі 75 % матеріалу – до крупності $\leq 0,044$ мм. У деяких випадках вимоги до ступеня здрібнювання ще вище: 85-90 % матеріалу мають бути здрібнені до крупності $\leq 0,044$ мм [4, с. 10]. Поширеною є практика використання для виробництва окатишів концентрату, який має вміст фракції $<0,075$ мм на рівні 80 %, як, наприклад, в роботі [12].

Якщо для оцінки грудкуємості матеріалів користуватися величиною їх питомої поверхні, то для придатних матеріалів вона складає 1500–2500 $\text{см}^2/\text{г}$, тобто $\approx 2000 \text{ см}^2/\text{г}$, що відповідає вимогам до крупності: 100 % фракції $<0,15$ мм, в тому числі 75 % фракції $<0,04$ мм [4, с. 12].

За кордоном значення питомої поверхні зазвичай називають індексом Блейна, який має розмірність $\text{см}^2/\text{г}$. Як правило вважають, що будь-який матеріал, призначений для огрудкування, повинен мати індекс Блейна $>1200 \text{ см}^2/\text{г}$, хоча відомі [12] приклади отримання позитивних результатів при використанні залізорудного концентрату з індексом Блейна 1180 $\text{см}^2/\text{г}$.

Розробка показників грудкуємості на базі водно-фізичних характеристик матеріалу вимагає попереднього розгляду можливих зв'язків (станів) води в шарі дрібних частинок.

Свого часу академіком П.О. Ребіндером запропоновано класичну класифікацію форм зв'язку вологи з матеріалами засновану на величині її енергії зв'язку, згідно якої існують форми зв'язку трьох типів: хімічна, фізико-хімічна та фізико-механічна. Дещо інакше виглядає класифікація форм зв'язку капілярно-пористих тіл з поглиненою рідиною в залежності від величини і природи енергії зв'язку, представлена професором Д.А. Ковальовим зі співробітниками [13, с. 105]. Пропонується розрізняти чотири форми зв'язку води з дисперсними системами: хімічно зв'язану; капілярно зв'язану; адсорбційно зв'язану; осмотично зв'язану (вода, яка знаходиться в розбавлених розчинах). Для умов згрудкування залізорудних матеріалів найбільший інтерес представляє адсорбційно і капілярно зв'язана вода.

Характеризуючи різні стани води в шарі дрібного матеріалу ті самі автори розрізняють воду [13, с. 97] адсорбовану – міцно зв'язану; слабо орієнтовану – рихло зв'язану; вільну – капілярну і гравітаційну.

Міцно зв'язана вода, яка має максимальну гігроскопічну ($МГ$), і сумісно з максимальною кількістю рихло зв'язану воду, утворює категорію максимальної молекулярної вологоємності ($ММВ$) матеріалу. В свою чергу $ММВ$ і максимальна кількість вільної капілярної вологи, що утримується структурою, формують категорію максимальної капілярної вологоємності ($МКВ$). Величини $МГ$ і $ММВ$ характеризують енергію взаємодії поверхні часток з водою, а величина $МКВ$ – структуру пористого матеріалу (наприклад, структуру гранули) [13, с. 97, 98].

В тому ж навчальному посібнику [13, с. 142] вказано, що товщина плівки адсорбованої води знаходиться в межах 0,05–0,2 мм, тому не залишається місця для капілярної вологи. З цієї причини величина $ММВ$, що дорівнює 7–12 %, включає $МГ$, яка дорівнює 0,5–2,6 %, і найменшу капілярну вологоємність ($НКВ$).

Використання водно-фізичних характеристик шихти для визначення коефіцієнта грудкуємості K , а згодом і оптимальної вологості шихти започатковано наприкінці 60-х років минулого століття В.М. Вітюгіним зі співробітниками.

Зокрема В.М. Вітюгіним запропонований показник грудкуємості у такому вигляді, ч. од. [8, с. 64]

$$K = (HKB - W_{\text{вз}})/(МКВ - HKB), \quad (2)$$

де $МКВ$ – найбільша, а $НKB$ – найменша капілярна вологість; $W_{\text{вз}}$ – внутрішньозеренна вологість, яка не відіграє активної ролі в процесі гранулоутворення.

Відома також інша пропозиція цього дослідника щодо формули для визначення коефіцієнта грудкуємості [7, с. 34]

$$K = (МКВ - МMB)/МКВ. \quad (3)$$

На підґрунті характеристичних вологоємностей запропонована формула для орієнтовного визначення оптимального значення робочої вологості грудкуємого матеріалу (W_{opt}^p) [13]

$$W_{\text{opt}}^p = HKB + (W_{\text{макс}}^p - HKB)(1 - K_{\text{відн}}), \quad (4)$$

при цьому

$$W_{\text{макс}}^p = HKB + (HKB - МГ)(1 - K_{\text{відн}}); \quad (5)$$

$$K_{\text{відн}} = (HKB - МГ)/(МКВ - HKB). \quad (6)$$

Вважаючи, що характеристичні вологоємності матеріалу $МMB$ і $МКВ$ в достатньому ступені відображають властивості, зв'язані з процесом грануляції, В.І. Коротич з посиланням на В.М. Вітюгіна в підручнику [5, с. 60] наводить формулу для визначення оптимальної вологості матеріалу на основі цих параметрів, яка дещо схожа на формулу (4),

$$W_{\text{opt}} = HKB + (МКВ - HKB)(1 - K). \quad (7)$$

Нарешті в науковій монографії [15, с. 114] без будь-яких посилань наведена формула для визначення оптимальної вологості огрудкування

$$W_{\text{opt}} = HKB + (HKB - МГВ)(1 - K)^2, \quad (8)$$

яка відрізняється від формули (5) лише зведенням у квадрат виразу у дужках.

В той же час відома [1] значно простіша формула для визначення оптимальної вологості шихти для огрудкування

$$W_{\text{opt}} = МКВ/2. \quad (9)$$

Вказані відмінності і розбіжності у визначенні оптимальної вологості свідчать про необхідність перевірки наведених формул.

Існує думка [16], що характеристичні вологоємності ($МКВ$, $НKB$ та $МГ$) не дають достовірної інформації про необхідну величину оптимальної вологості при огрудкуванні залізрудних шихт. Визначені за ними величини знаходяться поблизу верхньої межі оптимуму або навіть вище, що негативно позначається на кінцевих результатах виробництва окатишів. Для підвищення показників виробництва і при визначенні оптимальної вологи залізрудних шихт, що піддаються огрудкуванню, необхідно враховувати вплив відношення об'ємів води і пір на міцність сирих окатишів. Це дозволить здійснити огрудкування при вологості, що відповідає нижній межі оптимуму або близько до нього, що позитивно позначиться на міцності готових окатишів і енергетичних витратах.

Незалежно від розробки та дослідження методів визначення оптимальної вологості шихти, які базуються на використанні характеристичних вологоємностей, відбувались пошуки методів встановлення оптимальної вологості на підґрунті показників крупності матеріалу, що піддається огрудкуванню.

В межах зміни вмісту в шихті фракцій -50 мкм (f) $20-90$ % та її питомої поверхні (S) $125-300$ м²/кг, оптимальна вологість (W_{opt}) та допустимі її коливання (ΔW_{opt}) за умов отримання достатньо міцних та пластичних окатишів описуються рівняннями, % [13, с. 142, 143]

$$W_{\text{opt}} = 6,055 - 0,072 \cdot f + 0,055 \cdot S, \text{ при } R = 0,846; \quad (10)$$

$$\Delta W_{\text{opt}} = 0,33 - 0,01 \cdot f + 0,004 \cdot S + 0,092 \cdot W_{\text{opt}}, \text{ при } R = 0,9. \quad (11)$$

За даними роботи [17] отримано наступну залежність оптимальної вологості шихти від величини питомої поверхні в межах від 160 до 300 м²/кг:

$$W_{\text{opt}} = 9,0 + 0,01(S_{\text{шт}} - 160). \quad (12)$$

Відповідно до цієї залежності при збільшенні питомої поверхні від 160 до 200 м²/кг оптимальна вологість огрудкування підвищується на $0,4$ %.

Крім двох розглянутих шляхів визначення оптимальної вологості, заснованих на використанні показників характеристичних вологоємностей або крупності грудкуємих матеріалів, відома розробка експрес-методу визначення оптимальної вологості, яка базується на значенні наведеної порозності віброущільненого шару і питомої ваги матеріалу [18].

Постановка задачі. Задача представленого дослідження полягає в аналітичній порівняльній оцінці існуючих шляхів і методів визначення оптимальної вологості шихти, що піддається огрудкуванню, з метою встановлення прийомів, які найбільше відповідають реальним умовам процесу огрудкування при виробництві залізрудних окатишів з концентратів магнітного збагачення залізістих кварцитів.

Викладення матеріалу та результати. На початку дослідження було з'ясовано питання щодо реальних значень вологості шихти на фабриках огрудкування. Для магнетитових залізрудних концентратів, які є основною сировиною для виробництва окатишів на переважній більшості підприємств, вона перебуває в межах $9,2 \pm 0,2$ % [19]. Таку вологість мають концентрати практично на всіх вітчизняних і закордонних фабриках огрудкування (%): на Соколовсько-Сарбайській – 9,17, Качканарській – 9,08, Михайлівській – 9,11, Центрально-Криворізькій – 9,08, Північній – 9,4, Костомукшській – 9,3, Хіббінг і Хоговенс – 9,0–9,2. Зі зростанням питомої поверхні частинок від 140 до 180 м²/кг оптимальна вологість огрудкування збільшується від 9,1 до 9,4 %, але при цьому залишається в зазначених вище межах.

Наведені значення реальної вологості шихти відповідають умовам виробництва окатишів, зокрема якості вихідного концентрату, характерним для останніх років ХХ сторіччя. Зараз, у зв'язку з намаганнями і досягненнями збагачувальників у напрямку підвищення вмісту заліза в концентраті, його крупність значно зменшилася, що спричинило зростання робочої вологості шихти, яка піддається огрудкуванню. Так, магнетитовий концентрат Північного ГЗК з масовою часткою заліза на рівні 70,0 % містить близько 99 % фракції –54 мкм і має питому поверхню >3000 см²/г. Робоча вологість шихти за участю подібного концентрату знаходиться у межах $9,5 \pm 0,1$ %. Таким чином, можна вважати, що в сучасних умовах виробництва окатишів із залізрудних концентратів значення оптимальної вологості шихти знаходиться на рівні $9,4 \pm 0,2$ %.

Наступний етап дослідження стосувався оцінки суттєвості розбіжностей у визначенні терміну «оптимальна вологість шихти для огрудкування», а саме визначенні, який показник є більш представницьким критерієм оптимальності – максимальна міцність сирих окатишів чи максимальний вихід з процесу огрудкування сирих окатишів заданого розміру. І хоча обидва критерії спрямовані на покращення роботи агрегату, який виробляє окатиші, в окремих випадках вони можуть вступати в протиріччя один з одним. При порівнянні цих критеріїв оцінки приходимо до висновку, що більше переваг має показник міцності сирих окатишів, який є одним з вирішальних і незмінних ознак якості окатишів, в той час як вихід кондиційних по крупності окатишів є показником, що може бути відкоригованим наступною операцією класифікації окатишів. В той же час існує можливість «примирення» існуючих критеріїв оцінки шляхом їх поєднання, а саме: оптимальною вологістю шихти огрудкування вважати таку, що забезпечує максимальну міцність сирих окатишів за умови найбільшого виходу фракції кондиційної крупності.

Порівняльний аналіз схожих за структурою розрахункових формул (4), (7), (8) для визначення оптимальної (робочої) вологості шихти шляхом підстановки в формули відповідних значень характеристичних вологоємностей показав, що найбільш адекватною є формула (8), яка дає розрахункові значення вологості, які найбільше наближені до реальних показників. Тому саме ця формула була використана для порівняльної оцінки різних шляхів і методів визначення оптимальної вологості шихти, яка піддається огрудкуванню, що було зазначено головною метою дослідження.

Для аналізу прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів були використані необхідні для розрахунків характеристики дев'яти залізрудних концентратів руд різного походження і отриманих різними методами збагачення, які наведені в першому томі довідника «Сырье для черной металлургии» [6, с. 223, табл. 5.1]. Результати розрахунків оптимальної вологості двома шляхами (на основі характеристичних вологоємностей та характеристик крупності), кожен з яких представлений двома методами з використанням формул (8)–(10), (12), наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики залізорудних концентратів різного походження

Концентрати	Вміст Fe _{заг} , %	Вміст класів, %		$S_{\text{пирит}}$, см ² /г	HKB, %	МКВ, %	$W_{\text{вг}}$, %	K, ч.од.	$W_{\text{опт}}^*$, %	$W_{\text{опт}}^{**}$, %	$W_{\text{опт}}^{***}$, %	$W_{\text{опт}}^{****}$, %
		<50 МКМ	<10 МКМ									
Флотаційні												
ПівдГЗК:												
1	64,60	95,2	25,0	2000	7,6	20,0	0,5	0,57	8,90	10,0	10,20	9,40
2	62,80	92,7	19,5	2000	7,3	18,0	0,5	0,64	8,20	9,0	10,38	9,40
3	61,30	89,8	16,6	1800	7,0	19,7	0,5	0,51	8,55	9,85	9,49	9,20
МихГЗК:												
флотаційний	63,60	93,1	36,3	2000	8,0	18,0	0,8	0,72	8,56	9,0	10,35	9,40
магнітно-												
флотаційний	63,0	87,0	7,9	1800	8,0	20,5	0,8	0,58	9,29	10,25	9,69	9,20
магнітний	59,70	84,6	5,5	1550	7,2	19,0	0,8	0,54	8,54	9,50	8,49	8,95
Магнетитові:												
ЛебГЗК	68,0	86,1	14,4	1700	7,0	19,3	0,4	0,54	8,42	9,65	9,21	9,10
СтГЗК	65,60	94,0	18,3	2000	7,0	18,0	0,4	0,60	8,06	9,0	10,29	9,40
МихГЗК	64,5	92,1	15,3	1800	7,0	19,0	0,5	0,54	8,37	9,50	9,32	9,20

* – оптимальна вологість, визначена за формулою (8);

** – оптимальна вологість, визначена за формулою (9);

*** – оптимальна вологість, визначена за формулою (10);

**** – оптимальна вологість, визначена за формулою (12)

Аналіз отриманих результатів по флотаційним концентратам Південного ГЗК показує в цілому відсутність чіткої закономірності впливу крупності на оптимальну вологість (як і на коефіцієнт грудкуємості). Однак, якщо для збільшення інтервалу розходжень характеристик видалити проміжний другий зразок флотаційного концентрату, то всі методи вказують на закономірне збільшення оптимальної вологості при зменшенні крупності матеріалу. При цьому найбільш реальні результати показує розрахунок за формулою (12), яка базується на характеристичній крупності матеріалу (питомій поверхні).

Схожі висновки витікають з аналізу результатів розрахунків по другій групі концентратів (Михайлівський ГЗК): якщо видалити проміжний результат по масовій частці заліза і відповідній крупності, то в цілому, крім результатів за формулою (9), отримуємо вірну залежність оптимальної вологості від характеристик концентрату. Але, на відміну від результатів по концентратах Південного ГЗК, в цій групі цілком логічні результати по всім трьом зразкам матеріалів показують методи засновані на показниках крупності, представлені в двох останніх стовпцях табл. 1.

Що стосується результатів розрахунків по третій групі концентратів магнітного збагачення залістистих кварцитів родовищ Курської магнітної аномалії, то, враховуючи різну збагачувальність сировини представлених комбінатів, аналіз результатів потрібно робити окремо по кожному ГЗК. Лебединський концентрат (найбільш багатий і в той же час найбільш «грубий» по крупності) кращим чином оцінюється методами з використанням показників крупності. По концентрату Стойленського ГЗК більш достовірні результати показує метод, заснований на водно-фізичному показнику матеріалу за формулою (9). Оптимальна вологість концентрату Михайлівського ГЗК, найбільш наближена до реального результату, представлена результатом розрахунку за формулою (12), яка базується на значенні питомої поверхні матеріалу.

Безвідносно до особливостей всіх представлених в таблиці 1 концентратів, в цілому занижене значення оптимальної вологості показують в переважній більшості результати розрахунків за формулою (8), в той час як непоодинокі випадки завищених результатів дають розрахунки за формулою (10). Найбільш пристойно виглядають значення оптимальної вологості розраховані за формулою (12), але ця формула має певні обмеження щодо області використання.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Проведений аналіз прийомів визначення оптимальної вологості шихти за двома основними шляхами, заснованими на водно-фізичних характеристиках і показниках крупності матеріалу, вказує на доцільність використання обох цих прийомів для прогнозування реальних (робочих) значень вологості без проведення дорогих і довгих прямих визначень цього важливого параметра технологічного режиму огрудкування. Порівняння вказаних прийомів свідчить про певну перевагу методів, які базуються на водно-

фізичних характеристиках матеріалів завдяки їх більшій універсальності і чутливості до вмісту і властивостей досліджуваних проб. Важливою умовою отримання представницьких результатів прийомками, які базуються на водно-фізичних характеристиках, є правильний вибір методів визначення характеристичних вологостей.

Напрямок подальших досліджень пов'язаний з розробкою стандартних методів визначення показників характеристичних вологостей тонокодисперсних рудних матеріалів.

Список літератури

1. **Серебряник Г.И.** Комкуемость тонкозернистых шихт. Сталь, 1984, № 8. – С. 8-10.
2. **Папушин Ю.Л., Смирнов В.О., Біленький В.С.** Дослідження корисних копалин на збагачуваність. Навчальний посібник. Частина 1. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2006. – 334 с
3. Добыча и обогащение железных руд. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 25-2017. – М.: Бюро МДТ. 2017. – 239 с.
4. **Маерчак Ш.** Производство окатышей. М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
5. **Коротич В.И.** Основы теории и технологии подготовке сырья к доменной плавке. М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
6. Сырье для черной металлургии: Справочное издание в 2-х т. Т. 1. Сырьевая база и производство окискованного сырья (сырье, технологии, оборудование) / [Ладыгичев М.Г., Чижикова В.М., Лобанов В.И. и др.] : под ред. В.М. Чижиковой. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 896 с.
7. **Бережной Н.Н., Булычев В.В., Костин А.И.** Производство железорудных окатышей. М.: Недра, 1977. – 240 с.
8. Производство агломерата и окатышей: справ. изд. / [Базилевич С.В., Астахов А.Г., Майзель Г.М. и др.] : под. общ. ред. Ю.С. Юсфина. – М.: Металлургия, 1984. – 216 с.
9. **Стойкова Я.А., Бережной Н.Н.** Анализ показателей комкуемости тонкодисперсных материалов, / Сборник научных трудов Донбасского гос. ун-та. – Алчевск: ДонГУ. – 2012. – Вып. 38. – С. 140-146.
10. Савельев С.Г., Стойкова Я.А. Оценка комкуемости магнетитовых концентратов / IX Междунар. конгр. обогащения стран СНГ: (сб. материалов). – М.: МИСиС, 2013. – С. 498-501.
11. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей. Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков, Л.К. Антоненко и др. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
12. **Mbele P.** Pelletizing of Sishen concentrate. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. vol. 112, n. 3. Johannesburg, Mar. 2012. http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2225-62532012000300013&script=sci_arttext&tlng=es
13. Теоретические основы производства окискованного сырья. Д.А. Ковалёв, Н.Д. Ванюкова, В.П. Иващенко и др. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. – 476 с.
14. Определение комкуемости и рабочей влажности шихт для производства окатышей. В.М. Витюгин, А.В. Витюгин, Н.Н. Бережной, В.И. Смирнов. Бюллетень ЦНИИЧМ, 1973, №23. – С. 29, 30.
15. Разработка технологий для производства железорудных окатышей с высокими металлургическими свойствами : научная монография / Б.П. Юрьев, Н.А. Спирин, О.Ю. Шешуков и др. ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагильский технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. – 172 с.
16. **Бережной Н.Н., Федоров С.А., Бойковец В.Я.** Некоторые теоретические вопросы окомкования железорудных материалов. Сталь, 1987, №3. – С. 13-17.
17. **Hasnek H.A.** Pellet Production Using a Blend of Ores / Mining Eng. 1972, №31. P. 3-12.
18. **Витюгин В.М., Трофимов В.А.** Экспресс-метод определения оптимальной влажности тонкозернистых материалов перед окомкованием. Известия Томского политехнического института. Том 215, 1974. – С. 68, 69.
19. **Берман Ю.А.** Основные закономерности производства окатышей. Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1991. – 184 с.

Рукопис подано до редакції 17.04.2023

УДК 331.43:[622.7:549.6]

О.Є. ЛАПШИН, д-р техн. наук, проф., Г.М. ЯРОШЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ УМОВ ПРАЦІ В ЦЕХАХ ЗБАГАЧЕННЯ ТИТАНО-ЦИРКОНІЄВОЇ РУДИ ВИРОБНИЦТВА ВІЛЬНОГІРСЬКОГО ГМК

Мета. Метою дослідження є визначення стану умов праці та ефективність вентиляції в цехах збагачення титано-цирконієвої руди.

Методи дослідження. Фактичний аналіз умов праці на робочих місцях в цехах збагачення титано-цирконієвої руди. Аналіз літературних джерел з методів визначення шкідливих речовин при збагаченні руд.

Наукова новизна роботи полягає в розробці методик визначення концентрацій шкідливих речовин на робочих місцях та ефективності вентиляції в цехах збагачення титано-цирконієвих руд.