

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Таким чином, вибір раціональних параметрів технології стабілізації показників якості коксу в промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі з урахуванням недопущення великих втрат доменного коксу дозволяє значно знизити собівартість чавуну в доменній плавці. При річному виробництві чавуну на печі об'ємом 5000 м<sup>3</sup> рівному 3,5 млн тонн отриманий прибуток складе 34,86 млн \$.

Отже, використання та вдосконалення процесу механічної обробки кусків коксу є актуальним напрямком досліджень та дозволить не тільки стабілізувати властивості коксу, а й істотно поліпшити їх аж до отримання заданих, бажаних показників гранулометричного складу, міцності і стійкості до тертя.

#### *Список літератури*

1. **Лялюк В.П.** Проблемы реализации вдувания пылеугольного топлива и альтернативных технологий доменной плавки / В.П. Лялюк, И.Г. Товаровский, А.К. Тараканов // Черная металлургия: Бюллетень института “Черметинформация”. – 2011. – №11. – С. 20-26.
2. **Товаровский И.Г.** Альтернативные коксоберегающие технологии – перспектива развития доменного производства / И.Г. Товаровский, В.И. Большаков, В.П. Лялюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – №2. – С. 10-13.
3. **Lyalyuk, V.P.** Influence of the properties raw coal materials and coking technology on the granulometric composition of coke. Message 1. Analysis of changes in particle size distribution of coke on the example of the coke plant in Kriviy Rig / V.P. Lyalyuk, K.O. Shmeltser, D.A. Kassim, I.A. Lyakhova // Petroleum and coal. – 2019. – Vol. 62(1). – pp. 173-177.
4. **Lyalyuk V.P.** Influence of the properties raw coal materials and coking technology on the granulometric composition of coke. Message 2. Granulometric composition of the coke as a function of the coal batch properties / V.P. Lyalyuk, K.O. Shmeltser, D.A. Kassim, I.A. Lyakhova // Petroleum and coal. – 2019. – Vol. 62(2). – pp. P. 309-315.
5. **Lyalyuk V.P.** Changes in granulometric composition of blastfurnace coke / V.P. Lyalyuk, K.O. Shmeltser, D.A. Kassim, I.A. Lyakhova // Coke and Chemistry. – 2013. – vol. 56. – pp. 456–460.
6. **Лялюк В.П.** О гранулометрическом составе кокса для доменной плавки / В.П. Лялюк, Е.О. Шмельцер, Ляхова И.А., Д.А. Кассим // Вісник Криворізького національного університету. Серія: Технічні науки. – Кривий Ріг: Криворізький національний університет – 2014. – вип.36. – С. 141–146.
7. Требования к качеству кокса для мощных доменных печей. Кокс и химия. – 1976. – №2. – С.8-10.
8. **Лазовский И.М.** Эффективность механической обработки кокса восточных коксохимических предприятий / И.М. Лазовский, Е.В. Беляев, Т.П. Варшавский, А.П. Фомин, П.В. Акулов, В.П. Холощев // Кокс и химия. – 1970. – №11. – С.20-24.
9. **Лялюк В.П.** О рациональной степени дробления угольных шихт для коксования с высоким содержанием жирных углей / Лялюк В.П., Соколова В.П., Шмельцер Е.О., Кассим Д.А., Ляхова И.А. // Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. – Кривий Ріг: Криворізький національний університет. – 2013. – вип.97. – С. 170–173.
10. **Мучник Д.А., Лялюк В.П.** Высокоэффективная внекамерная технология повышения качества кокса для доменной плавки. ФЛ-П Чернявский Д.А., Кривой Рог: 2019. – 184 с.
11. **Lyalyuk, V.P., Shmeltser, E.O., Kassim, D.A.** Improving the technology production of coke for blast furnace smelting. Octan Print, Praha: 2022. – 197 p.
12. Патент України, 2018, № 127112. Спосіб механічної обробки доменного коксу / **Мучник Д.А., Товаровський Й.Г., Лялюк В.П., Шмельцер К.О.** Опубл. бюл. № 13.

УДК 622.752:544.722.23

Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук, проф., Д.О. РУМНИЦЬКИЙ, аспірант,  
Л.В.СКЛЯР, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

### **СЕГРЕГАЦІЯ ЧАСТИНОК ПРИ ГРАВІТАЦІЙНІЙ СЕПАРАЦІЇ МІНЕРАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

**Метою** даної роботи є аналіз механізмів сегрегації у процесі гравітаційної сепарації руди для розробки методики проведення досліджень із встановлення закономірностей процесу розділення частинок на похилій поверхні гвинтових сепараторів, які засновані на особливостях розширювання зернистого матеріалу в залежності від крупності та щільності частинок.

**Методи дослідження.** Узагальнення, аналіз науково-технічної інформації стосовно сегрегації частинок у гравітаційних сепараторах різного типу для дослідження процесу розширювання та концентрації частинок у потоці пульпи, що дозволить створити оптимальні умови розділення мінеральних зерен за крупністю та щільністю на похилій поверхні гвинтового сепаратору.

**Наукова новизна.** Запропоновано механізм розділення частинок на похилій поверхні гвинтових сепараторів, який на відміну від існуючих, враховує гідродинамічні та відцентровані сили, співвідношення яких міняється в залежності від зміння швидкості течії пульпи та перерозподілу концентрації мінеральних зерен різної крупності.

**Практична значимість.** Розроблено методику проведення досліджень гравітаційного збагачення магнетитових кварцитів в умовах АТ «ПВДГЗК» з урахуванням особливостей сегрегації мінеральних частинок, їх агрегатів на похилій поверхні гвинтового сепаратору.

**Результати.** В умовах АТ «Південний ГЗК» на секції №5 РЗФ-1 на однозахідному гвинтовому сепараторі проведено попереднє тестування проміжних продуктів з визначенням їх гранулометричного складу, щільності пульпи, масової частки заліза у продуктах розділення. Досліджено режим розділення за щільністю живлення (1150-1350 г/л). В результаті проведених досліджень отримано промпродукти магнітної сепарації першої стадії, в яких підвищено масову частку заліза загального на 3,6-9,8 % – з 47,7-48,7% до 51,3-58,5%. З пісків II стадії класифікації, з масовою часткою заліза загального 49,8-53,2 % за рахунок застосування гвинтової сепарації отримано товарні продукти з масовою часткою заліза загального 65,5-68,4 %.

**Ключові слова.** сегрегація, розшарування, сепарація гравітаційна, розділення, крупність, щільність, потік, сепаратор гвинтовий.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-47-54

**Проблема та її зв'язок із науковими та практичними завданнями.** Гравітаційні процеси мають значне поширення в практиці збагачення руд чорних, кольорових і рідкісних металів, вугілля, розсипів та неметалевих корисних копалин. Серед усього різноманіття гравітаційних апаратів заслуговує на окрему увагу гвинтова сепарація [1]. При гвинтовій сепарації розподіл руди здійснюється за щільністю зерен, завдяки впливу на частинки відцентрової сили та сили тяжіння в умовах руху потоку пульпи по похилій гладкій або рифленій площині [1,2].

Важливими етапами процесу концентрації у гвинтових апаратах є розшарування та сепарація мінеральних зерен. При цьому, розшарування – це розподіл за крупністю мінеральних зерен (за глибиною жолоба); а сепарація – розсігнування вже розподілених частинок [1]. У процесі розшарування мінеральних зерен у потоці по похилій площині жолоба механізм руху частинок і їх концентрації вивчено не досконало. Для оцінки цього явища створено багато моделей, але жодна з них не надала повного уявлення про процес розшарування та концентрації різних за крупністю частинок потоку пульпи у жолобі гвинтового сепаратору.

Отже, одним з найважливіших науково-технологічних завдань при розробці технологій гравітаційного збагачення мінеральної сировини із застосуванням гвинтової сепарації є дослідження процесу розшарування та концентрації частинок у потоці пульпи (сегрегації), що дозволить створити оптимальні умови розділення мінеральних зерен за густиною та крупністю. Актуальними є дослідження, які мають на меті виявлення механізмів і кінетичних закономірностей сегрегації частинок для найбільш загальних і практично значущих випадків течії зернистих середовищ.

**Аналіз досліджень.** У всіх гравітаційних апаратах розподілення часток здійснюється у зважених розпушених шарах, тобто в шарах, в яких тверді частинки знаходяться у зваженому стані, що обумовлюється впливом на них рідини, газу або віброуючих твердих стін.

Розділення частинок при гравітаційних процесах можна класифікувати на два основних його види: сегрегаційні (частки стикаються один з одним та розподіляються за крупністю) та гідравлічні (частки розділені прошарком води). До процесів, наслідком протікання яких є ті або інші ефекти сегрегації, віднесені:

просіювання і проникнення, що є процесом проникнення дрібних частинок у зазори між великими частинками, коли останні або рухаються щодо один одного (просіювання), або перебувають у нерухомому стані (проникнення);

течія дисперсних середовищ з різним вмістом глинистих компонентів;

процеси спливання або занурення, обумовлені різною плавучістю частинок, внаслідок їх відмінності за щільністю та формі;

виштовхування як процес, що протікає внаслідок різноманітних ефектів розклинюючого впливу частинок друг на друга;

взаємодія частинок та їх агрегатів, що визначає різну динаміку поведінки частинок, що відрізняються за розміром, формою, щільністю, пружністю і т.д. (перекочування, відскок, захоплення тощо);

вимивання частинок поперечними та зустрічними потоками міжчасткового середовища;

«захоплення» одних частинок іншими, обумовлене різною геометрією частинок та динамічними факторами взаємодії;

стирання частинок з наступним відділенням тонких та дисперсних частинок;

розділення, яке обумовлено псевдозрідженням окремих компонентів зернистого середовища, що мають низьку швидкість псевдозрідження, що супроводжується зміною вектору швидкості різних частинок за модулем або напрямом;

розділення частинок у шарі сипучого матеріалу;

поперечне циклічне розшарування неоднорідних частинок у безперервному спіральному обертовому потоці зернистого матеріалу;

розшарування неоднорідних частинок у вібраційному шарі.

Процес сегрегації зернистого матеріалу при механічному впливі найбільш досконало вивчено при грохоченні корисних копалин.

При моделюванні процесу сегрегації сипучих матеріалів автори [3] виділяють чотирнадцять видів характеристик властивостей дисперсних матеріалів, які можуть впливати на сегрегацію. При цьому, кожна з властивостей окремо визначає поведінку відповідних частинок у тому чи іншому фізичному полі. В умовах певного поля домінуючий вплив на сегрегацію може надавати різницю в тій або іншій властивості частинок дисперсного середовища. При оцінці характеру впливу властивостей частинок на сегрегацію необхідно взяти до уваги, що сегрегація є результатом взаємодії неоднорідних частинок під впливом фізичного поля або комбінації різних полів. Тому властивості можна умовно поділити на дві категорії:

властивості, що визначають сили, що діють на окремі частинки з боку поля, і тим самим впливають на динаміку їх переміщень у просторі впливу полів;

властивості, що впливають на ефект взаємодії неоднорідних частинок, тобто. на напрямок та інтенсивність відносного переміщення частинок.

Звідси випливає, що схильність суміші частинок до сегрегації визначається не тільки сукупністю їх властивостей за зазначеними категоріями, а й сукупністю та інтенсивністю фізичних полів та додаткових факторів, що сприяють і перешкоджають сегрегації.

Комплекс таких властивостей для зернистих матеріалів включає в першу чергу розмір, щільність, шорсткість, пружність, форму частинок та адгезійні властивості їх поверхні.

Першорядне значення для сегрегації має розмір і співвідношення розмірів частинок [4], Цей висновок дійсний, наприклад, для багатьох випадків сегрегації та зсувних потоках зернистих матеріалів. Однак, беручи до уваги різноманітність можливих механізмів сегрегації та умов взаємодії неоднорідних частинок, обумовлених сукупністю фізичних полів та граничних умов, слід визнати певну умовність такого висновку. Це тим більше справедливо, якщо врахувати, що взаємодія частинок у дисперсному середовищі, у переважній більшості випадків протікає у присутності дисперсійної (міжчасткового) середовища, яке в певних умовах також може істотно впливати на ефект взаємодії неоднорідних частинок.

У роботі [3] здійснено спробу систематизації механізмів сегрегації. Для підвищення струнності системи автор пропонує розділити всі фактори, що сприяють сегрегації, на дві категорії:

1) сили, що ініціюють прояви ефектів сегрегації;

2) процеси, що призводять до сегрегації частинок.

При цьому до сил, які ініціюють прояв тих чи інших механізмів сегрегації, віднесені: гравітаційний вплив;

сили, що виникають при міжчастковому контакті;

тертя частинок при їх контакті з поверхнями, що обмежують;

ударні сили, що виникають під час взаємодії частинок;

розклинюючі сили, що виникають в агрегатах, які складаються з неоднорідних частинок;

сили пружності, які виникають при контакті частинок з поверхнями, що їх обмежують;

моменти кочення, при взаємодії частинок один з одним або з обмежувачами поверхнями;

сили опору, що виникають під час переміщення частинок щодо міжчасткового середовища;

сили поверхневого зчеплення частинок, спричиненого адгезією, електростатичними ефектами та іншими.

У зв'язку з викладеними загальними уявленнями про природу сегрегації стає зрозумілим, що математичний опис кінетичних закономірностей процесу повинно відображати залежність швидкості розподілу неоднорідних частинок від комплексу їх фізико-механічних властивостей, властивостей міжчасткового середовища та комплексу факторів фізичних полів, що ініціюють та гальмують сегрегацію. Різноманітність властивостей частинок та умов їх взаємодії є причиною безлічі різних механізмів розділення частинок, які можуть виявлятися або окремо, або у деяких

їх поєднаннях. Зауважимо, що кінетичні характеристики сегрегації мають визначатися з урахуванням діючих механізмів розділення частинок.

У роботах [5,6] авторами проаналізовано явище сегрегації зернистого матеріалу на основі існування «дисперсійного тиску», при якому крупні частинки переміщуються в шар потоку з меншою швидкістю зсуву, а дрібні – в шар, із найбільшою швидкістю зсуву.

Однак, ця аналогія з «ефектом парціальних тисків» є недостатньо коректною, оскільки явище сегрегації має місце і в однорідному швидкості зсуву потоці. Крім того, як показує досвід [6], переміщення великих частинок може відбуватися і в протилежному напрямку, наприклад, до відкритої поверхні гравітаційного потоку, у бік якої швидкість зсуву збільшується.

Існує також інтерпретація механізму руху частинок, як механізм проникнення, який полягає у проникненні дрібних частинок під дією сили тяжіння в міжчастковий простір, що утворюється між більшими частинками в рухомому шарі суміші частинок [7, 8]. Внаслідок цього механізму крупні частки видавлюватимуться дрібними у зворотному напрямку. Наприклад, рух частинок до відкритої поверхні рушійного або вібруючого шару.

Інший механізм названо механізмом різних траєкторій, який зумовлений різницею в траєкторіях руху неоднорідних частинок при взаємодії їх з міжчастковим середовищем та має місце, в першу чергу, під час руху частинок у відкритих поверхнях зсувних потоків. Відмінність траєкторій для неоднорідних частинок є наслідком різного співвідношення сил опору та інерційних сил для частинок, що відрізняються один від одного від друга за розміром та щільністю [7-11].

При русі частинок має місце також механізм розшарування, при якому сегрегація відбувається у розріджених зернистих середовищах, які аналогічні псевдозрідженим системам. Кінетика цього механізму сегрегації залежить від комплексу фізико - механічних характеристик самих частинок, а не визначається лише їх розміром або щільністю як у рідких середовищах.

При гідравлічному розділенні діють сили тяжіння, гідродинамічні сили та сили зіткнення частинок, а при сегрегаційному – основними є взаємодія частинок при їх зіткнення та розподіленням за крупністю [12].

У роботі [13] вивчено декілька способів розшарування, у тому числі змивну дію потоку води, що тече по похилій площині. Виявлено, що у процесі розшарування мінеральних зерен велике значення має розклинювальна дія зерен, які лежать вище. Крім того, експериментально встановлено збільшення швидкості розшарування при сегрегації зі збільшенням крупності та різниці в щільностях частинок, що розділяються, підвищенням інтенсивності вібрацій та зменшенням товщини шару. Дані дослідження мають загальний характер так як вони показували явище розшарування і розкривали лише деякі закономірності.

У теорії гравітаційної сепарації руд розшарування частинок, які рухаються по похилій поверхні, розглядається з урахуванням на них турбулентних вихорів, взаємного впливу на частинки, обумовленого градієнтом швидкості за глибиною [1]. Частина, що знаходиться в деякому шарі, отримує удари від частинок, розташованих вище; виникає їх обертання та має ефект Магнуса. Вважається, що підйомна сила від впливу частинок між собою є основною з причин розпушування, а отже, і розшарування частинок. Концентрація за висотою для дрібних частинок змінюється менш різко, ніж для крупних, а найбільш дрібні частинки за глибиною потоку похилої поверхні розподілені практично рівномірно.

У роботі [13], показано що при зважуванні в зернистих сумішах при накладанні кругових горизонтальних коливань виявляються в'язкісні властивості. При цьому крупні частинки серед дрібних частинок поведуться як у псевдорідині. Частинки меншої щільності, ніж середовище, спливають, а частинки більшої густини тонуть.

У роботі [14] наведено результати дослідження формування концентрату в відцентровому полі. Згідно аналізу цих результатів доведено, що сегрегація важких частинок за щільністю та крупністю відбувається за меншою кількістю води, сегрегація за масою – за більшою кількістю води. Автори визначили, що в основі відцентрового збагачення лежить інтенсифікація процесів взаємодії твердих частинок один з одним у згуртованому та розпушеному стані, а збільшення різниці між гідравлічною крупністю частинок різної питомої ваги у відцентровому полі має другорядну роль.

Слід зазначити, що деякі з нововиявлених механізмів є результатом акцентування уваги на окремих елементарних актах складні механізми. Наприклад, у роботах [7, 8] автори зазначають, що механізм сегрегації «розшаруванням» цілком асимілює в собі сегрегацію виштовхуванням і

переміщенням частинок і є по відношенню до них найбільш загальним механізмом. Певною мірою сказане відноситься і до механізму, зумовленого різною схильністю частинок до кочення, оскільки названий механізм може бути представлений як один із елементарних актів складнішої взаємодії.

При цьому важливо відзначити, що за визначенням [7, 8] «розшарування» є наслідком відмінності частинок не тільки за розміром та щільністю, але і залежить від комплексу фізико-механічних властивостей. Такий підхід є, зрозуміло, найадекватнішим наближенням до реального процесу і дозволяє врахувати різну плинність, тобто, відмінність у кутах природного укусу окремих фракцій дисперсного середовища.

Разом з тим, тут слід зазначити, що в залежності від умов взаємодії неоднорідних частинок може домінувати те чи інше їхня відмінна властивість, а, відповідно, той чи інший елементарний акт у їхній комплексній взаємодії може стати визначальним. Ці обставини забезпечують формальні умови для розгляду таких елементарних актів як окремих механізмів сегрегації. Водночас це не заважає враховувати такого роду механізми у складі механізмів вищого порядку.

Аналіз механізмів сегрегації свідчить не лише про їх надзвичайну різноманітність, але й про відсутність досить строгої класифікації, складеної з урахуванням принципово розмежованих класифікаційних ознак. Навіть при допущенні структурної однорідності зсувного гравітаційного потоку математичний опис динаміки сегрегації викликає серйозні труднощі у зв'язку з відсутністю єдиного судження щодо фізичного механізму процесу.

Наслідком використання різних механізмів при описі сегрегації у гравітаційних потоках частинок є те, що частинки різняться, наприклад, в одному випадку за густиною [15], а в іншому – за розміром [16]. Для опису динаміки сегрегації частинок різної густини в роботі [15] використаний механізм плавучості, а в роботі [16] сегрегація частинок за розміром описана з урахуванням неоднорідного розподілу тиску між частинками дрібною та крупною фракцій. При цьому важливо зазначити, що у обох випадках опис динаміки сегрегації не враховує залежність швидкості процесу від швидкості зсуву, ні концентрації твердої фази. Це тим більше важливо, якщо врахувати, що швидкість зсуву і концентрація твердої фази істотно впливають на швидкість сегрегації, а значення названих параметрів в обсязі гравітаційного зсувного потоку, загалом випадку, змінюються в широкому діапазоні.

З метою врахування впливу швидкості зсуву на процес розділення неоднорідних частинок у роботі [17] проведено дослідження динаміки сегрегації частинок, що відрізняються за розміром і щільністю, у швидких зсувних потоках зернистих матеріалів. Динаміку сегрегації проаналізовано на базі різних вищезгаданих її механізмів для частинок, що відрізняються за розміром [16] та щільністю [15]. Моделювання сегрегації за щільністю проведено з використанням механізму плавучості [15], формально аналогічного для спливання тіл, занурених у рідину. Кінетика сегрегації частинок за розміром змодельована на базі механізму розділення частинок під дією градієнта літостатичного тиску, що є наслідком гравітації [16]. Відповідно до цього механізму напруги, що генеруються гравітацією в зсувному потоці, деяким чином розподілені між частинками, що розрізняються за розміром, пропорційно деякому індивідуальному коефіцієнту парціального тиску. При цьому, у загальному випадку, значення цих коефіцієнтів не збігаються із відносною концентрацією частинок відповідного розміру. Передбачається [18], що частинки, для яких частка парціальних напруг перевершує їх локальну відносну концентрацію в суміші, переміщуються в область потоку з більш низьким літостатичним тиском. Навпаки, частинки, внаслідок розміру яких припадає на них частка парціальних напруг менше їх локальної відносної об'ємної концентрації в суміші, переміщуються в область потоку з вищим літостатичним тиском. У всіх названих роботах ефект перемішування частинок змодельований з використанням квазидифузійної моделі.

За відсутності теоретичної бази для прогнозування залежності кінетичних характеристик сегрегації та перемішування від кінематичних та структурних параметрів потоку в роботах [14 – 16] коефіцієнти сегрегації частинок за розміром, щільністю та коефіцієнт квазидифузійного перемішування апроксимувалися константами, які визначалися в процесі математичного моделювання. Проте, результати досліджень, виконаних у низці наступних робіт, наприклад [19 – 21], свідчать про суттєву залежність від перерахованих коефіцієнтів від швидкості зсуву, яка, в загальному випадку, в обсязі потоку має високу неоднорідність. У цих роботах показано, що встановлення залежності коефіцієнтів сегрегації та квазидифузії від швидкості зсуву дозволяє покращити відповідність між експериментальними та розрахунковими результатами.

Проте, до сьогодні не втрачає актуальності завдання визначення залежностей коефіцієнтів сегрегації та дифузії від параметрів зсувного потоку [16]. Більше того, як вірно зазначено в роботі [16], при всій гнучкості розроблених математичних моделей сегрегації [19 – 21], що лежать в їх основі модельні уявлення не дозволяють врахувати ефекти розділення частинок внаслідок неоднорідності швидкості зсуву та безпосередньо пов'язаної з нею температури зернистого середовища у зсувному потоці матеріалу. Про необхідність встановлення ефектів розділення, викликаних просторовою неоднорідністю параметрів зсувного потоку зернистого середовища, свідчать результати досліджень, виконаних у роботах [16, 22-26].

У роботах [16, 26] величина потоку розділення частинок, що різняться за розміром, визначена як величина, пропорційна градієнту кінетичної складової напруги. При цьому в локальних напругах, що генеруються у зсувному потоці зернистого середовища, виділяються компоненти кінетичних та контактних напружень.

Кінетична складова напруги при зрушенні розглядається як наслідок перенесення імпульсів при флуктуації частинок. Передбачається, що розділення неоднорідних частинок відбувається внаслідок різного розподілу контактних та кінетичних напружень по компонентам зернистого середовища, що розрізняються за розміром частинок.

**Постановка задачі.** Явище сегрегації в даний час описано лише якісно. Відсутні розрахунки швидкості сегрегації, вплив основних факторів на процес розшарування та концентрації частинок у течії пульпи в жолобі гвинтового сепаратора. Тому метою роботи є аналіз механізмів сегрегації у процесі гравітаційної сепарації руди для розробки методики проведення досліджень із встановлення закономірностей процесу розділення частинок на похилій поверхні гвинтових сепараторів, які засновані на особливостях розшарування зернистого матеріалу в залежності від крупності та щільності частинок.

**Викладення матеріалу та результати.** Аналіз вище викладеного матеріалу дозволив розробити методику проведення експериментів зі збагачення продуктів різної крупності та щільності на гвинтових сепараторах в умовах Південного гірничо – збагачувального комбінату на секції №5 РЗФ-1. Метою виробничих досліджень було встановлення можливості отримання концентрату марки КЗВ з масовою часткою  $Fe_{\text{заг}}$  на рівні 68,0+%. Згідно методики визначались такі показники: гранулометричний склад та щільність пульпи, масова частка заліза у продуктах розділення, продуктивність гвинтового сепаратора для визначення механізму сегрегації.

Для досліджень цих факторів використовували апарат, який являє собою однозахідний гвинт сепаратора типу СВШ-2-1000, що працює в замкнутому циклі з зумпфом-змішувачем обладнаним відцентровим насосом модифікації ІГР для забору живлення і подачі через трубу нагнітання, оснащений пристроєм, що розмагнічує, для руйнування флокул.

Дослідження проводились з таких проміжних продуктів: розвантаження першої стадії мокрої магнітної сепарації секції №5 РОФ-1; піски II стадії класифікації секції №5 РЗФ-1; концентрат  $Fe = 66,0\%$ ; концентрат  $Fe = 68,5\%$ .

У результаті аналізу гранулометричного складу продуктів подрібнення та магнітного збагачення встановлено, що у магнітному продукті першої стадії сепарації найбільш багатого за залізом є фракція - 0,04+0 мм, вихід якої складає 39,59 - 40,3 %. Масова частка заліза загального у ній на рівні 65,1 – 66,2 %. У пісках II стадії класифікації, на відміну від магнітного продукту, найбільш багатими фракціями за залізом є класи крупності -0,056+0,04 мм та -0,04+0 мм, вихід яких відповідно складає 23,7-25,97 % та 16,04-16,5 % відповідно. Масова частка заліза загального у цих класах складає 66,6-67,1% та 66-66,2 % відповідно. За мінералогічним аналізом у цих фракціях концентруються мономінеральні частинки магнетиту та кварцу. Кількість зростків у цих фракціях незначна. У матеріалі з крупністю частинок більше 0,05 мм кварц утворює зростки з магнетитом, рідше із силкатами, карбонатами. Вміст мономінеральних частинок незначний. У більш крупнозернистому матеріалі магнетит представлений включеннями частково кварцового, іноді магнетит-кварцового складу.

У процесі проведення тестування та підбору режиму за щільністю живлення в діапазоні 1150-1350 г/л, а також положення шибери (концентрат/промпродукт) гвинтового сепаратора в межах від 9,5 см до 19 см від внутрішнього борту жолоба, отримано «важка» фракція – концентрат та промпродукт.

При розділенні промпродуктів магнітної сепарації першої стадії, в концентраті гвинтового сепаратора підвищено масову частку заліза загального на 3,6-9,8 % – з 47,7-48,7% до 51,3-58,5%.

З пісків II стадії класифікації, з масовою часткою заліза загального 49,8-57,9 % за рахунок застосування гвинтової сепарації отримано товарні продукти з масовою часткою заліза загального 65,5-68,4 % за виходом від операції 41,2 – 5,0 %.

Для покращення технологічних показників розділення мінеральних частинок у гвинтових сепараторах необхідно вивчити механізм розшарування та особливості сегрегації у течії пульпи в його жолобі на похилій поверхні.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Встановлено, що існує багато механізмів опису сегрегації матеріалу при гравітаційній сепарації мінеральних агрегатів у повітряному та водному середовищах. Але збільшення кількості механізмів від однієї класифікації до іншої не призводить до розширення знань про сегрегацію, але, більше того, ускладнює вивчення названого явища.

Подальші дослідження направлені на визначення механізму переміщення зерен всередині шару при розшаруванні, з подальшим формуванням залежності між цим механізмом і законами різновидів розшарування та врахуванням властивостей частинок, які зумовлюють розташування зерен при сегрегації на гвинтовому сепараторі.

Проведенні попереднє тестування проміжних продуктів технологічної схеми секції РЗФ №1 на гвинтових сепараторах типу СВШ-2-1000, які показали можливість застосування гвинтових сепараторів для удосконалення технологічної схеми збагачення магнетитових кварцитів АТ «ПІВ-ДГЗК» з метою отримання концентрату марки КЗВ з масовою часткою  $Fe_{заг}$  на рівні 68,0+%.

При розділенні промпродуктів магнітної сепарації першої стадії, в концентраті гвинтового сепаратору підвищено масову частку заліза загального на 3,6-9,8 % – з 47,7-48,7% до 51,3-58,5%. З пісків II стадії класифікації, з масовою часткою заліза загального 49,8-57,9 % за рахунок застосування гвинтової сепарації отримано товарні продукти з масовою часткою заліза загального 65,5-68,4 % за виходом від операції 41,2 – 5,0 %.

Для опису механізму сегрегації магнетитових кварцитів у гвинтовому сепараторі необхідно вивчити: форму частинок, швидкість течії пульпи, вплив в'язкості рідкої фази, яка залежить від зміни температури пульпи, на процес гравітаційного збагачення.

З метою створення оптимальних умов розділення мінеральних зерен на похилій поверхні гвинтового сепаратору необхідно розробити метод розрахунку швидкості течії пульпи та розподілу концентрації мінеральних зерен, при якому відбувається розшарування суміші за крупністю та щільністю.

З метою підвищення технологічних показників збагачення магнетитових кварцитів необхідно провести дослідження щодо моделювання процесу розділення мінеральних частинок та їх агрегатів у гвинтовому сепараторі за рахунок встановлення впливу основних фізико – механічних властивостей пульпи у течії на співвідношення гідродинамічних та відцентрованих сил у процесі розшарування частинок на похилій поверхні.

### *Список літератури*

1. **Смирнов В.О., Білецький В.С.** Гравітаційні процеси збагачення корисних копалин: Донецьк: Східний видавничий дім, 2005. 300 с.
2. **Пілов П.І.** Гравітаційні методи збагачення корисних копалин. Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2021. 152 с.
3. **Bates, L.** User Guide to Segregation / L. Bates. – British Materials Handling Board, Elsinore house, United Kingdom, 1997. – 134 p.
4. **Bridgwater, J.** Interparticle Percolation: Equipment Development and mean Percolation Velocities / J. Bridgwater, M. H. A. M. Cooke, Scott // Trans. I Chem. E. – 1978. – P. 157 – 167
5. **Brown, R. L.** The Fundamental Principles of Segregation / R. L. Brown // J. Inst. Fuel. – 1939. – V. 13. – P. 15 – 19
6. **Bagnold, R. A.** Experiments on a Gravity Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear / R. A. Bagnold // Proc. Roy. Soc. – London, 1954. – A 225. P. 49 – 63.
7. **Williams, J. C.** Segregation of Powders and Granular Materials / J. C. Williams // Fuel Society Journal. – 1963. – 14. – P. 29 – 34.
8. **Williams, J. C.** The Segregation of Particulate Materials / J. C. Williams // Powder Technology, 15, 1976. – P. 245.
9. **Enstad, G. G.** Segregation of Powders and its Minimization in Kalman H. Ed. / Enstad, G. G. // The 2-nd Israel Conference for Conveying and Handling of Particulate Solid. Proceedings. – Jerusalem, 1997. – P. 11 – 52.
10. **Shinohara, K.** Some Segregation Mechanisms and their Prevention. Proc. Int. Sump. Reliable flow of Particulate Solids / K. Shinohara, G. G. Enstad. – Oslo, 1993. – P. 819.
11. **Shinohara, K.** Mechanism of Density Segregation of Particles in Filling Vessels / K. Shinohara, S. Miyata // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. – 23(3). – 1984. – P. 423].
12. **Кизевальтер Б.В.** Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. М.: Недра, 1979. 296 с

13. Блехман И.И. К теории разделения сыпучих смесей под воздействием колебаний / И.И.Блехман, В.Я.Хайнман // Инженерный журнал «Механика твердого тела». 1968. № 6, С.5-13.
14. Богданович А.В. Сравнительные испытания центробежных концентраторов различных типов / А.В.Богданович, С.В.Петров // Обогащение руд. 2001. № 3. С.38-41.
15. Khakhar, D. V. Radial Segregation of Granular Mixtures in Rotating Cylinders / D. V. Khakhar, J. J. McCarthy, J. M. Ottino // Phys. Fluids. – 1997. – 9. – 3600.
16. Gray, J. Particle-size Segregation and Diffusive Remixing in Shallow Granular Avalanches / J. Gray, V. A. Chugunov // Journal of Fluid Mechanics. – 2006. – 569. – P. 365 – 398.
17. Hill, K. M. Granular Temperature and Segregation in Dense Sheared Particulate Mixtures / K. M. Hill, Y. Fan // Kona. – 2016. – V. 33. – P. 150 – 168.
18. Gray, J. Theory for Particle Size Segregation in Shallow Granular Free-surface Flows / J. Gray, A. R. Thornton // Proceedings of the Royal Society of London A. – 2005. – 461(2057). – P. 1447 – 1473.
19. Tripathi, A. Density Difference-driven Segregation in a Dense Granular Flow / A. Tripathi, D. V. Khakhar // J. Fluid Mech. – 2013. – 717. – P. 643 – 669.
20. Fan Y. Modelling Size Segregation of Granular Materials: the Roles of Segregation, Advection and Diffusion / Y. Fan, C. P. Schlick, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino, R. M. Lueptow // J. Fluid Mech. – 2014. – 741. – P. 252 – 279.
21. Tunuguntla, D. R. A Mixture Theory for Size and Density Segregation in Shallow Granular Free-surface Flows / D. R. Tunuguntla, O. Bokhove, A. R. Thornton // Journal of Fluid Mechanics. – 2014. – 749. – P. 99 – 112.
22. Dolgunin V. N. Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles / A. N. Kudi, A. A. Ukolov, M. A. Tuev // Chemical Engineering Research and Design. – 2017. – 122. – P. 22 – 32.
23. Dolgunin, V. N. Development of the Model of Segregation of Particles Undergoing Granular Flow Down on Inclined Chute / V. N. Dolgunin, A. N. Kudy, A. A. Ukolov // Powder Technology. – 1998. – 56. – P. 211 – 218. 132
24. Dolgunin, V. N. Segregation Kinetics of Particles with Different Roughness and Elasticity under a Rapid Gravity Flow of a Granular Medium / V. N. Dolgunin, A. N. Kudy, A. A. Ukolov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2009. – 43(2). – P. 187 – 196.
25. Fan, Y. Shear-induced Segregation of Particles by Material Density / Y. Fan, K. M. Hill // Phys. Rev. E. – 2015. – 022211.
26. Hill, K. M. Segregation in Dense Sheared Flows: Gravity, Temperature Gradients, and Stress Partitioning / K. M. Hill, D. S. Tan // J. Fluid Mech. – 756. – 2014. – P. 54 – 88.

УДК 622.7: 534

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,  
А. А. ГАПОНЕНКО, Є. Ю. БОБРОВ, аспіранти  
Криворізький національний університет

## МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ У ПРАКТИЦІ БЕЗКОНТАКТНИХ НЕРУЙНІВНИХ ВИМІРЮВАНЬ

**Метою дослідження** є аналіз методів формування ультразвукових хвиль для вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

**Методи дослідження.** У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

**Наукова новизна** полягає в обґрунтуванні використання електромагнітних ультразвукових перетворювачів та визначенні їх можливої конфігурації для вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

**Практичне значення** полягає в тому, що використання електромагнітних ультразвукових перетворювачів запропонованої конструкції дозволить створити вимірювальну систему для мінералогічного аналізу феромагнітних руд для функціонування якої не потрібен контакт з досліджуванним середовищем.

**Результати.** У практиці ультразвукових вимірювань найбільшого поширення знайшли п'єзоелектричні та електромагнітні перетворювачі (ЕМАТ). Ці перетворювачі можуть працювати, як у режимі генерації ультразвуку, так і як його детектор, відрізняються порівняно невеликим споживанням енергії та малими габаритами, перекривають широкий частотний діапазон і здатні формувати різні види ультразвукових хвиль. Вимірювальні системи з ЕМАТ мають усі переваги ультразвукових вимірювань у порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю. Як і з п'єзоелектричними датчиками, за допомогою ЕМАТ можуть бути реалізовані різні методи вимірювань: ехо-імпульсні, з тангажем, наскрізною передачею та ін. Порівняльна характеристика та аналіз різних методів генерації та прийому ультразвуку дозволяють зробити висновок про те, що при реалізації акустичних вимірювань характеристик феромагнітної руди доцільно використовувати електромагнітні перетворювачі ЕМАТ з високоенергетичною імпульсною системою збудження без статичного магнітного зміщення. Це дозволить проводити вимірювання без фізичного контакту між перетворювачем та випробуваним зразком та простіше генерувати різні типи ультразвукових хвиль. Для спрощення налаштування геометрії вимірювального каналу та збільшення його функціональних можливостей, ЕМАТ можуть бути виконані з використанням технології фазованих решіток.

**Ключові слова:** ультразвук, вимірювання, електромагнітний перетворювач, руда, аналіз.