

Балов Микола Сергійович

Магістерська робота

**Аналіз конструкцій та перспектив розвитку
механічного обладнання для гравітаційного збагачення
мінеральної сировини**

Керівник

доц., к.т.н. Громадський В.А.

ВСТУП

Видобуток та переробка мінеральної сировини забезпечує людство різноманітними матеріалами для промисловості, будівництва, сільського господарства та усіх інших галузей економіки. З надр Землі надходять до нас паливо, металеві руди, хімічна сировина, будівельні матеріали – усе те, що необхідно для забезпечення поточних потреб та розвитку суспільства [1].

Підземні корисні копалини, що доступні для розробки на даний момент, не є нескінченими. Вони поступово вичерпуються, а їх якість погіршується – адже люди прагнуть у першу чергу узяти найкращі поклади. Внаслідок цього багатих корисних копалин, таких, які можна використати у тому вигляді, в якому вони знаходяться у природі, майже не залишилося. Ми змушені залучати у розробку бідніші родовища, які потребують додаткових зусиль для отримання продуктів належної якості.

Наприклад, метали знаходяться у земній корі у вигляді руд, що представляють собою різноманітні сполуки цих металів (корисних або кошовних компонентів) з порожніми (супутніми) породами. Вміст корисних компонентів в рудах у більшості випадків не відповідає вимогам виробництва, які здійснюють подальший металургійний переділ сировини з метою виділення з неї металу (або декількох металів з поліметалічних руд). Залізні руди, які видобуваються у шахтах і кар'єрах нашої країни і за кордоном, мають на даний момент середній вміст заліза у межах приблизно від 30 до 40%. А металургам для доменного процесу виплавки чавуна потрібна сировина, в якій заліза має бути не менше 65-67%. Подібна картина спостерігається й для інших металів, причому чим дорожче сировина – кольорові метали, рідкісні метали, не говорячи вже про дорогоцінні – тим більш вражаючою є різниця між наявним і необхідним вмістом корисного компоненту в ній [2].

Така ситуація вимагає наявності спеціального виробництва для доведення якості руд до потрібних стандартів, а саме: збагачувальної промисловості, задачею якої є переробка сировини шляхом видалення з неї частини порожніх порід з

метою підвищення вмісту корисного компоненту (компонентів). Крім того, в руді можуть бути шкідливі домішки, що погіршують якість майбутніх металургійних продуктів, наприклад сірка і фосфор, які у надлишкових кількостях підвищують небажану крихкість сталі. Збагачення потребують також й інші види корисних копалин: вугілля, хімічна сировина, нерудні будівельні матеріали тощо.

Відділення порожніх порід від корисних компонентів у корисних копалинах здійснюється різними способами. В основі кожного з них лежать ті чи інші відмінності у фізико-механічних властивостях поділюваних матеріалів: ступеня змочуваності, магнітної сприйнятливості, електричної провідності, здатності випускати, відбивати або поглинати різного роду випромінювання тощо. Але найпростішими і водночас найстарішими є гравітаційні методи збагачення корисних копалин, які люди використовували ще на початку розвитку гірничої справи. Незважаючи на таку довгу історію, вони не втратили свого значення й досі.

В основі численних методів гравітаційного збагачення мінеральної сировини, що використовуються у гірничозбагачувальній галузі, лежить принцип розділення частинок різного розміру та різної густини під впливом сили ваги та інших супутніх сил (наприклад, відцентрової сили, сил опору тощо) у середовищах різної в'язкості. Використання того чи іншого методу залежить від типу і властивостей конкретного перероблюваного матеріалу. Для таких корисних копалин, як вугілля та залізна руда, способи гравітаційного збагачення застосовуються у досить широких масштабах. Як правило, вони потребують менших капітальних та експлуатаційних витрат, у тому числі енергетичних [3].

Усе вищесказане переконливо свідчить на користь подальшого удосконалення методів і технічних засобів гравітаційного збагачення різноманітних видів корисних твердих копалин. Такий напрямок розвитку збагачувальної галузі забезпечить підвищення її загальної техніко-економічної ефективності за рахунок досягнення високих виробничих показників з одночасним зниженням капітальних та експлуатаційних витрат.

З огляду на це, важливість подальших досліджень, спрямованих на створення нового та удосконалення існуючого механічного обладнання гравітаційного

збагачення корисних копалин, а також успішного практичного впровадження його на підприємствах гірничозбагачувальної галузі, не підлягає сумніву. Тому можна стверджувати, що тема представленої магістерської роботи, яка присвячена аналізу конструкцій та перспектив розвитку механічного обладнання для гравітаційного збагачення мінеральної сировини, є цілком актуальною.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси гравітаційного збагачення мінеральної сировини.

Предмет дослідження – механічне обладнання для гравітаційного збагачення корисних копалин.

Наукове положення – в результаті проведеного дослідження встановлено, що гравітаційні методи збагачення мінеральної сировини залишаються актуальними у світовій та вітчизняній гірничозбагачувальній промисловості і мають широкі перспективи в майбутньому за рахунок використання в конструкціях гравітаційних сепараторів динамічних режимів експлуатації та вібраційних впливів на оброблюваний матеріал.

1 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ

1.1 Основні переваги та проблеми методів гравітаційного збагачення мінералів

Принципи гравітаційного збагачення відомі дуже давно, принаймні з античних часів. Віками воно залишалося основним видом переробки корисних копалин, аж поки не почалися розвиватися такі сучасні методи збагачення, як флотація, магнітна, електрична та радіометрична сепарація тощо. Проте, гравітаційне збагачення не втрачає своїх позицій. У першу чергу це стосується вугілля та залізної руди, але справедливо й для цілої низки інших промислових мінералів, особливо для бідних руд розсипних родовищ.

Така картина пояснюється, передусім, простотою та універсальністю гравітаційних способів, які, разом із тим, забезпечують ефективну переробку сировини з мінімальними витратами енергії і коштів. Наприклад, експлуатаційні витрати у розрахунку на 1 т переробленої руди у таких випадках суттєво менші у порівнянні, скажімо, з флотацією. Гравітаційне збагачення не вимагає значних потужностей обладнання, не потребує застосування додаткових шкідливих хімічних реагентів, а його небажаний вплив на довкілля при цьому набагато менший.

На даному етапі розвитку гірничозбагачувальної галузі методи гравітаційної сепарації використовуються для переробки різноманітних мінералів: андалузиту, циркону, вугілля, алмазів, мінеральних пісків, оксидів металів, промислових мінералів, рідкісних металів тощо. Для цього сьогодні створюється високопродуктивне, високоефективне, але недороге сучасне обладнання, яке забезпечує найкращі характеристики отримуваних продуктів.

Разом із тим, досі не існує повного наукового розуміння процесів гравітаційного збагачення, яке б давало їхню модель та математичний опис. Через це ми маємо дуже багато різноманітного обладнання, яке часто використовується нерационально. Тому теоретичний аналіз та експериментальні дослідження у цій галузі так важливі та актуальні.

1.2 Загальна класифікація способів і засобів гравітаційного збагачення

Гравітаційне збагачення здійснюється у середовищах різної в'язкості. Менше розповсюдження має повітря, набагато частіше використовується вода через її суттєво більшу густину, а також важкі середовища – рідини з густиною більше 1 г/см^3 (1 т/м^3).

Усе без винятку збагачувальне обладнання, у тому числі гравітаційне, повинно виконувати дві основні функції:

- першу – ефективне розділення складових мінералів перероблюваної корисної копалини на дві або більше окремі фази;
- другу – ефективне розвантаження цих фаз у різні приймальні відсіки [4-7].

Важливою вимогою при цьому є наступна: сили, що використовуються для виконання першої функції, не повинні заважати виконанню другої. Під час гравітаційного збагачення частинки мінеральної суміші різної густини набувають відносного руху під впливом дії сили тяжіння та декількох інших сил (сил тертя між частинками та ними і стінками машини; сил опору руху, що викликається в'язкістю середовища, в якому відбувається процес сепарації; архімедової сили; відцентрових сил).

Усі гравітаційні апарати тим чи іншим чином забезпечують відносне переміщення частинок і зміну їх взаємного положення (розпушення, ущільнення, сегрегації тощо). З огляду на характер цього переміщення можна виділити наступні режими гравітаційної сепарації та обладнання, яке їх використовує (рис. 1.1):

- за густиною, коли в'язкі рідини, що використовуються у ролі робочого середовища, мають густину, проміжну між густинами мінералів, які розділяються. При цьому один мінерал (мінерали) набуває позитивної плавучості (його густина менше густини рідини) і спливає на її поверхню, а інший (інші) має негативну плавучість (його густина більше густини рідини) і потопає у ній (рис. 1.1а).

На такому режимі працює обладнання для важкосередовищного збагачення, а також апарати магнітогідростатичної та магнітогідродинамічної сепарації (МГС- та МГД-сепарації);

- шляхом розшарування мінеральних складових, якого можна досягти за рахунок ритмічної флюїдизації суміші, створюваної пульсацією рідини у вертикальній площині (рис. 1.1б).

Такий режим використовується у відсаджувальних машинах різних типів;

- у тонкому потоці пульпи, коли мінеральні складові розділяються у потоці пульпи, що стікає похилою площиною під дією сили тяжіння (рис. 1.1в).

Описана схема роботи використовується з давніх часів і залишається актуальною у таких апаратах, як шлюзи, звужувальні жолоби, конусні та гвинтові сепаратори тощо;

- шляхом струшування (хитання) матеріалу. Мінеральні компоненти при цьому розшаровуються під дією вібраційного впливу або обертального руху (рис. 1.1г).

У першому випадку можна згадати різного роду струшувальні столи (наприклад, концентраційні), у другому – сепаратори або концентратори спеціальних типів.

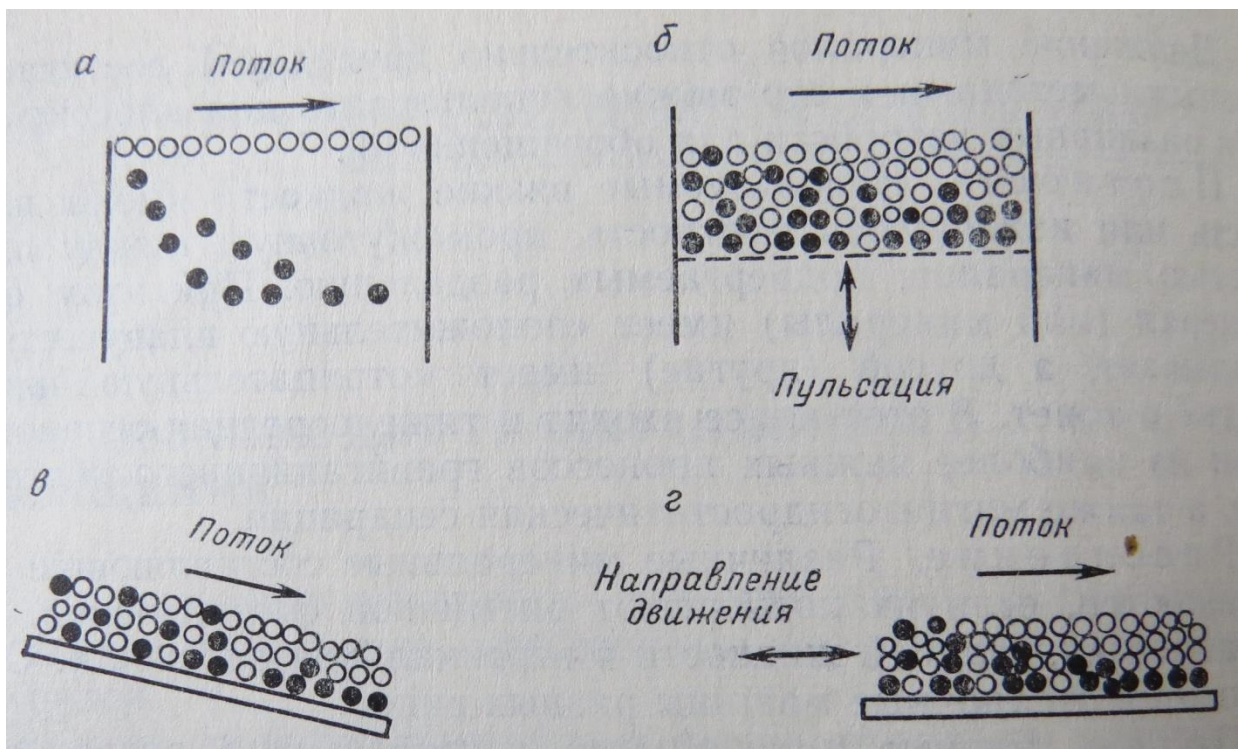


Рисунок 1.1 – Класифікація процесів гравітаційного збагачення за характером відносного переміщення мінеральних частинок в процесі розділення:

а – за густиною; б – шляхом розшарування; в – у тонкому потоці;

г – шляхом струшування (хитання)

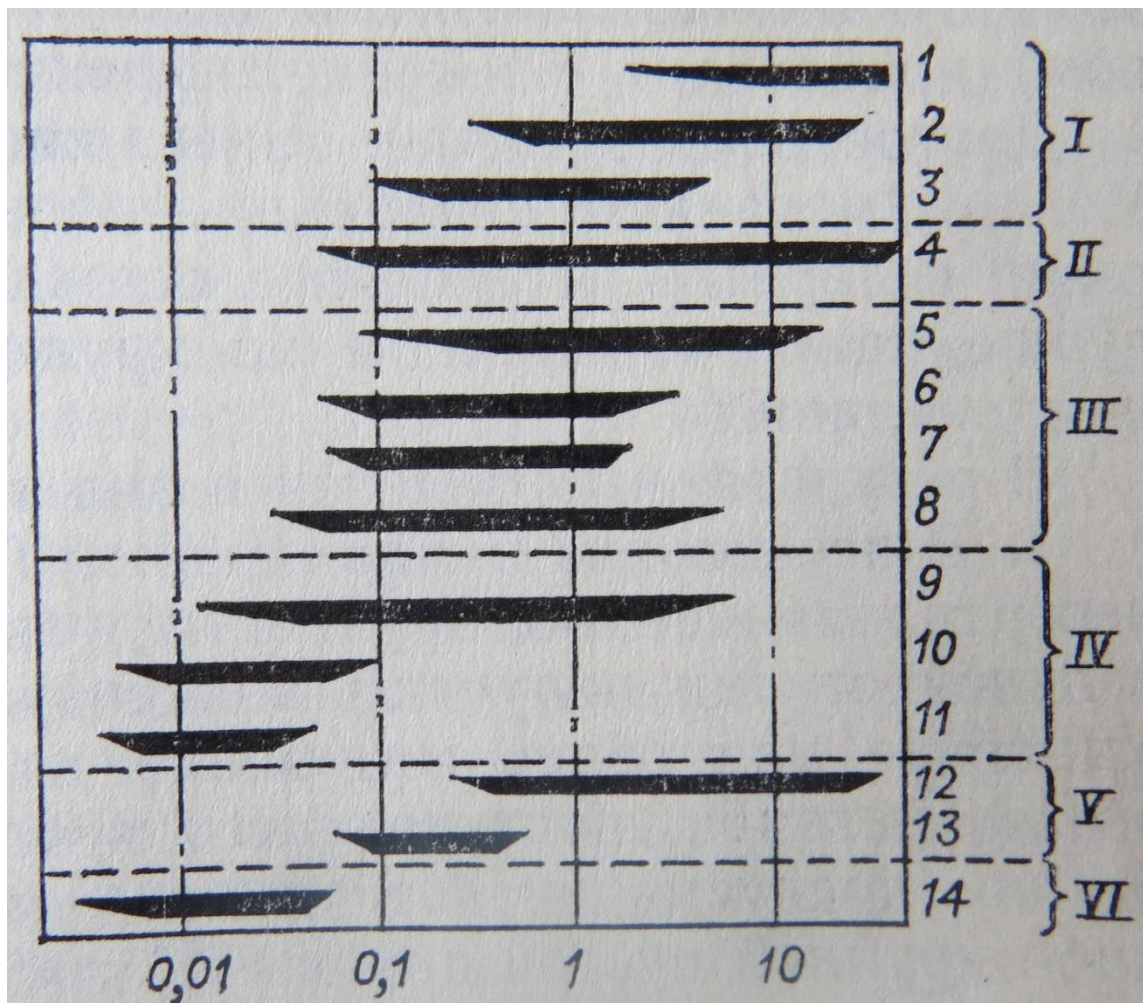
Вибір того чи іншого типу обладнання для виконання згаданих процесів гравітаційної сепарації залежить від багатьох факторів. Це потрібні показники роботи, крупність частинок, що підлягають розділенню, продуктивність машини чи апарату, очікувана ефективність, вартість агрегату, інші капітальні та експлуатаційні витрати.

1.3 Порівняльний аналіз гравітаційного обладнання

Незважаючи на те, що у будь-якому збагачувальному обладнанні підвищення вмісту цінного компоненту у рудному матеріалі досягається відділенням його від порожніх порід, практично неможливо зробити це за одну операцію. У кращому випадку можна дістати або остаточний концентрат потрібної якості, або відвальні хвости з мінімальним вмістом втраченого корисного мінералу. Дуже рідко, принаймні за виключенням важкосередовищної сепарації, вдається отримати і те і інше. Тобто, практично усі пристрої для гравітаційної сепарації вимагають здійснення більше однієї стадії збагачення. Останні можуть бути основними, контрольними та перечистними у різних комбінаціях в залежності від використовуваного обладнання.

Збагачувальне обладнання гравітаційного типу відрізняється від решти інших типів більшим загальним діапазоном крупності перероблюваного матеріалу. Верхня межа крупності сировини, яка теоретично може бути оброблена у гравітаційних апаратах, залежить лише від механічної здатності пристрою. Деякі апарати спроможні переробляти шматки крупністю до 1 м, проте максимальною величиною прийнято вважати 500 мм. Що стосується нижньої межі гравітаційного збагачення, то це приблизно 6 мкм.

Повністю такий вражаючий діапазон не може забезпечувати жодний конкретний тип обладнання для гравітаційної сепарації мінеральної сировини. Практично усі вони спроможні переробляти лише якусь конкретну частину цього діапазону. На рис. 1.2 показані порівняльні можливості найбільш важливих типів обладнання згідно з класифікацією, приведеною вище.



Крупність частинок, мм

Рисунок 1.2 – Інтервали раціонального використання різних типів механічного обладнання для гравітаційного збагачення мінеральної сировини: 1 – статичне обладнання; 2 – динамічне обладнання; 3 – обладнання, що використовує лише воду; 4 – відсаджувальні машини; 5 – шлюзи; 6 – конус Рейхерта; 7 – звужувальні шлюзи; 8 – гвинтовий сепаратор; 9 – струшувальний стіл; 10 – сепаратор Бартлез-Мозлі; 11 – концентратор Бартлез-Кросбелт; 12 – пневматична відсаджувальна машина; 13 – пневматичний стіл; 14 – відцентрові апарати; I – важкосередовищні пристрої; II – пристрої, що працюють на принципі розшарування; III – пристрої збагачення у тонкому потоці пульпи; IV – пристрої, що працюють на принципі струшування; V – пневматичні пристрої; VI – проміжне обладнання

За продуктивністю гравітаційне обладнання також має дуже великий діапазон можливостей – від одиниць до сотень тонн переробленого матеріалу за годину. Коли різні конструкції збагачувальних пристроїв придатні для роботи в аналогічних умовах та на матеріалах однакової крупності, продуктивність апарату може

стати вирішальним фактором під час вибору потрібного обладнання. Слід також враховувати потужність збагачувального підприємства, адже далеко не на кожному можна використовувати апарати із занадто високою продуктивністю. З іншого боку, на великих підприємствах можуть застосовуватися й порівняно низькопродуктивні апарати, об'єднані у батарейні комплекси.

Найбільш продуктивним обладнанням є статичні важкосередовищні конуси чи барабани, а також відсаджувальні машини, які можуть переробляти більше 300 тонн матеріалу за годину у розрахунку на один апарат.

Що стосується ефективності процесів гравітаційного збагачення мінеральної сировини, то тут першість потрібно віддати важкосередовищній сепарації, яка одночасно є й найпростішим з усіх них. В інших процесах на частинки суміші, які завжди мають густину, більшу за густину середовища, діють різні сили з часто протилежними впливами на них. У випадку ж важкосередовищного збагачення єдиним критерієм розділення частинок є відношення їхньої густини до густини середовища, в якому відбувається процес.

Ефективність окремих типів обладнання залежить від багатьох факторів: швидкості подачі живлення у порівнянні з продуктивністю пристроїв, коливання швидкості подачі або мінерального складу живлення, діапазону крупності та вмісту твердого у пульпі тощо.

Що стосується вартості гравітаційного обладнання, то цей показник обов'язково потрібно узгоджувати з його ефективністю у кожному конкретному випадку промислового використання. У цілому, як вже було зауважено вище, вартість пристроїв для гравітаційного збагачення мінеральної сировини нижче у порівнянні з іншими типами обладнання. Проте, у багатьох випадках підвищення ефективності важливіше вартості, адже перероблюваний матеріал складає лише частину загальної продуктивності збагачувального підприємства.

Висновки:

- сучасна світова гірничозбагачувальна галузь характеризується широким використанням методів гравітаційної сепарації для переробки різноманітної міне-

ральної сировини. Для цього створюється та впроваджується високопродуктивне, високоефективне, але недороге обладнання, яке забезпечує найкращі характеристики отримуваних продуктів;

- в результаті проведеного аналізу існуючих способів гравітаційного збагачення запропонована їх загальна класифікація, що ґрунтується на характері відносного переміщення частинок і зміни їх взаємного положення при цьому. Для кожного такого режиму існують відповідні типи сепараційного обладнання, яке забезпечує якісне розділення корисних компонентів та порожніх порід. Кожен з цих типів здатний переробляти матеріали певного діапазону крупності;

- вибір того чи іншого типу обладнання для виконання згаданих процесів гравітаційної сепарації залежить від багатьох факторів. Це потрібні показники роботи, крупність частинок, що підлягають розділенню, продуктивність машини чи апарату, очікувана ефективність, вартість агрегату, інші капітальні та експлуатаційні витрати;

- слід зауважити, що досі не існує повного наукового розуміння процесів гравітаційного збагачення, яке б давало їхню модель та математичний опис. Тому теоретичний аналіз та експериментальні дослідження у цій галузі так важливі та актуальні.

1.4 Мета і задачі дослідження

Мета роботи – дослідження та вибір раціональних параметрів механічного обладнання для гравітаційного збагачення мінеральної сировини.

Проведений під час виконання роботи аналіз способів гравітаційного збагачення гірничої маси, особливостей конструктивного виконання пристроїв для їхньої механізації та результатів експлуатації такого обладнання на практиці, а також перспектив подальшого його розвитку забезпечив можливість намітити наступні задачі, які потрібно вирішити під час здійснення даного дослідження:

- вибрати методи теоретичних та експериментальних досліджень;
- проаналізувати технологічні особливості основних процесів гравітаційного

збагачення мінеральної сировини, зокрема відсадки, сепарації у важких середовищах та у тонкому шарі рухомої рідини;

- розглянути теоретичні основи процесів гравітаційного збагачення, що пояснюють характер та закономірності розділення частинок матеріалу під дією сили тяжіння та відцентрових сил;

- проаналізувати сучасний стан механічного обладнання для підготовки живлення апаратів гравітаційної сепарації гірничої маси;

- обґрунтувати раціональні параметри обладнання для збагачення матеріалів у важких середовищах;

- обґрунтувати раціональні параметри відсаджувальних машин;

- обґрунтувати раціональні параметри стаціонарних та звужувальних шлюзів, гвинтових сепараторів, концентраційних столів та концентраторів тонких матеріалів;

- оцінити перспективи подальшого використання технологій і техніки гравітаційного збагачення для переробки різноманітних корисних копалин, у тому числі залізних руд.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси гравітаційного збагачення мінеральної сировини.

Предмет дослідження – механічне обладнання для гравітаційного збагачення корисних копалин.

Наукове положення – в результаті проведеного дослідження встановлено, що гравітаційні методи збагачення мінеральної сировини залишаються актуальними у світовій та вітчизняній гірничозбагачувальній промисловості і мають широкі перспективи в майбутньому за рахунок використання в конструкціях гравітаційних сепараторів динамічних режимів експлуатації та вібраційних впливів на оброблюваний матеріал.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

В представленій роботі виконана спроба загальної оцінки місця методів гравітаційної сепарації мінеральної сировини у сучасній світовій гірничозбагачувальній галузі. Тема надзвичайно важлива, адже в умовах зростаючих обсягів видобутку корисних копалин, необхідних для забезпечення потреб і розвитку цивілізації, та одночасного зниження їхньої якості внаслідок поступового вичерпування запасів багатой на корисні компоненти сировини роль переробки гірничої маси з метою доведення її до кондицій, яких вимагають споживачі (металургійна, хімічна, будівельна, енергетична та інші галузі економіки), стає визначальною. В таких умовах усі існуючі технології збагачення та техніка для їхньої механізації набувають неабиякого значення. У тому числі це стосується й таких здавна відомих, як гравітаційні.

З огляду на це, аналіз сучасного стану гравітаційного збагачення вимагає ґрунтового наукового підходу, використання різноманітних методів наукових досліджень, що забезпечують отримання достовірної інформації, потрібної для створення та практичного впровадження високоефективного сепараційного обладнання.

Під час виконання роботи головним методом наукового дослідження був аналітичний. За його допомогою вивчалися способи збагачення мінеральної сировини, роль гравітаційних серед них, технологічні схеми сепарації, типи й види обладнання для їхньої механізації, здійснювалося порівняння можливостей тих чи інших апаратів в різних умовах експлуатації.

Теоретичні методи досліджень використовувалися для розуміння фізики процесів, що відбуваються під час таких процесів сепарації, як відсадка, важкосередовищне збагачення, розділення матеріалів за густиною і крупністю у тонкому потоці води тощо. Перевірка отриманих даних здійснювалася експериментальним шляхом.

Результати проведених досліджень дали змогу зробити відповідні висновки та сформулювати рекомендації щодо впровадження їх на практиці.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЗБАГАЧЕННЯ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ

3.1 Особливості процесу відсадки

Для кращого розуміння процесів гравітаційного збагачення потрібно розглянути деякі найбільш важливі механізми розділення частинок, що відбуваються при цьому. Усі ці механізми можна класифікувати на дві основні групи:

- ті, що характеризуються рухом частинок у вертикальній площині під час збагачення в об'ємі пульпи;
- ті, що відносяться до руху частинок похилою площиною в процесі збагачення у тонкому шарі пульпи.

Першу з них краще розглянути на прикладі відсадки. Це метод сортування частинок шляхом їх розшарування під час відносного періодичного переміщення шару частинок (постелі) і водного (рідше повітряного) середовища. При цьому постіль може рухатися відносно нерухомого середовища і навпаки. У більшості випадків використовується другий варіант – середовище рухається відносно нерухомої постелі. Остання розташовується безпосередньо на решеті або на штучній постелі з крупних частинок, що лежить на цьому решеті.

Принципова схема відсадки показана на рис. 3.1. Пристрій для водяної відсадки складається з ємності, заповненої водою, з горизонтальним або трохи похилим відсаджувальним решетом у верхній частині, яке підтримує частинки (постіль) і через яке вода протікає у змінному напрямку. В конструкції відсаджувальної машини присутні також пристрої для безупинного прийому сирової руди, для пульсації води в регульованому режимі, а також для розділення розшарованої постелі на два чи більше потоки продуктів. Водяне середовище рухається крізь постіль за допомогою того чи іншого пристрою (поршневого, діафрагмового, повітряно-золотникового) у вертикальному напрямку (догори і вниз) у циклічному режимі. Під час руху середовища нагору (прямий хід) постіль розпушується динамічним впливом потоку, а вниз (зворотний хід) – ущільнюється [8,9].

Найпростішим циклом відсадки є гармонійний (синусоїдальний). Його графіки для машини поршневого типу показані на рис. 3.2.

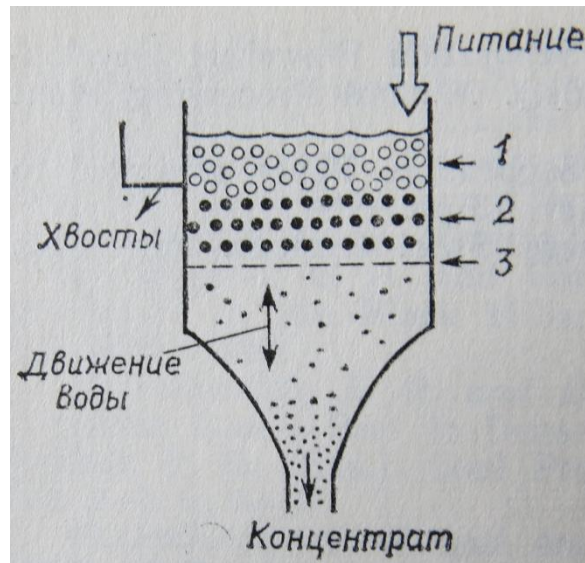


Рисунок 3.1 – Принципова схема відсадки:
1 – відсаджувальна постіль; 2 – дроблена руда; 3 – відсаджувальне решето

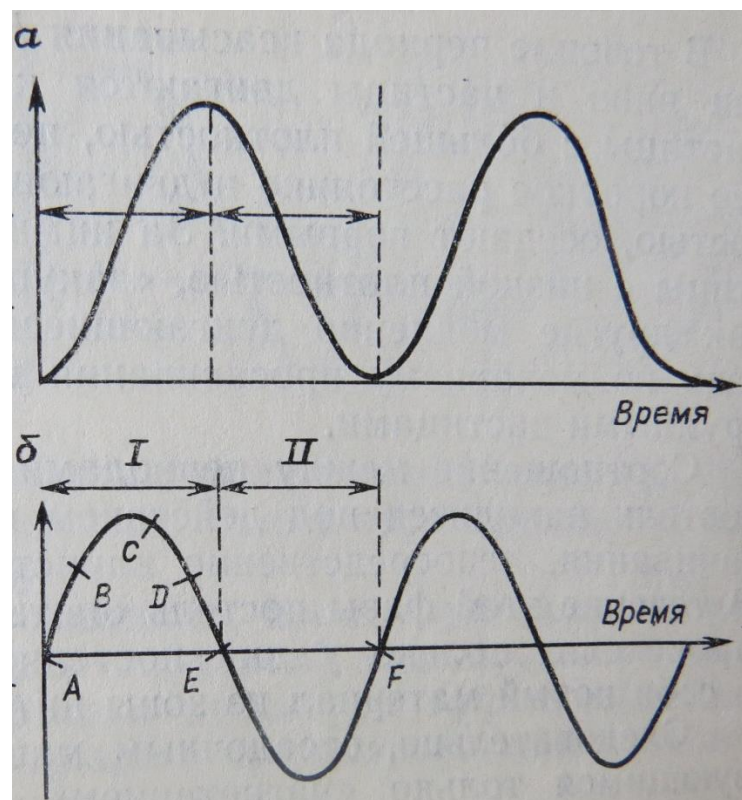


Рисунок 3.2 – Гармонійний цикл руху у поршневій відсаджувальній машині:
а – переміщення середовища; б – швидкість потоку;
I – нагнітання; II - всмоктування

Описані циклічні потоки характеризуються певною тривалістю та амплітудою циклів. Для ефективності процесу відсадки ці змінні величини надзвичайно важливі. Частота циклів зазвичай знаходиться в інтервалі від 100 до 300 за хвилину. В результаті відбувається процес розшарування постелі по вертикалі.

Механізм цього процесу надзвичайно складний і досі остаточно не вивчений. Існують різні теорії, що пояснюють його, але жодна з них не в змозі зробити це достатньо ясно, вичерпно та переконливо. Скоріше за все, усі вони у тому чи іншому ступені мають рацію і повинні враховуватися під час аналізу.

Наприклад, в циклі відсадки при прямому ході частинок вони рухаються нагору і шар матеріалу розпушується. У верхній точці руху швидкість частинок зменшується до нуля. Після цього вони починають зворотний рух, тобто падають із стану спокою з певним початковим прискоренням. Швидкість цього падіння є функцією густини частинок і не залежить від їх розміру. Тобто частинки різної густини падатимуть з різними прискореннями.

Рівняння руху падіння частинки у рідині має наступний вигляд:

$$\frac{m}{\frac{dv}{dt}} = (m - m')g - F_D, \quad (3.1)$$

де m – маса частинки, кг; v – швидкість частинки, м/с; t – час, с; m' – маса рідини, що витиснулася, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; F_D – сила гальмування (опору рідини), Н.

У перший момент сила F_D дорівнює нулю і:

$$\frac{dv}{dt} = (m - m') - (\sigma - \sigma')g = \left(1 - \frac{\sigma'}{\sigma}\right)g. \quad (3.2)$$

Оскільки такі падіння повторюються достатньо часто внаслідок циклічного характеру відносного руху шару матеріалу і середовища, їх тривалість досить незначна, тому можна вважати, що відстані, які пройдуть частинки, будуть визначатися не стільки кінцевими швидкостями, скільки початковими прискореннями. За таких умов розшарування відбуватиметься лише на основі густини.

Тобто з точки зору розшарування частинки С і В є рівнопадаючими, тоді як частинки А і В – ні. Таким чином, у кількісному відношенні процес відсадки може бути вивчений шляхом розгляду рівняння для відстані s (м), пройденої частинками до моменту досягнення ними кінцевої швидкості:

$$\text{де } v_m = \sqrt{\frac{3,33(\sigma - \sigma')gd}{\sigma}}; B = \frac{\sigma v_m}{2(\sigma - \sigma')g}; d - \text{діаметр частинки, м.}$$

На базі рівняння (3.3) можна побудувати графіки залежності (для даної серії

з певними d , σ і σ') відстані, пройденої за секунду $\left(\frac{s_x}{t_x}\right)$ від тривалості процесу багаторазового падіння t_x (рис. 3.4). Вони свідчать, що для кожної з тонких частинок вольфрамиту є певна тривалість падіння t_x , при якій відстань $\frac{s}{t}$, пройдена за секунду, аналогічна відстані для кварцу діаметром 16 мм, тобто вони осаджуються однаково. Відношення діаметрів рівно падаючих частинок різної густини називається відношенням відсадки σ_j . Воно збільшується із зменшенням тривалості падіння, тобто чим коротше цикл відсадки, тим більше інтервал крупності частинок, які можуть бути розділені (рис. 3.5).

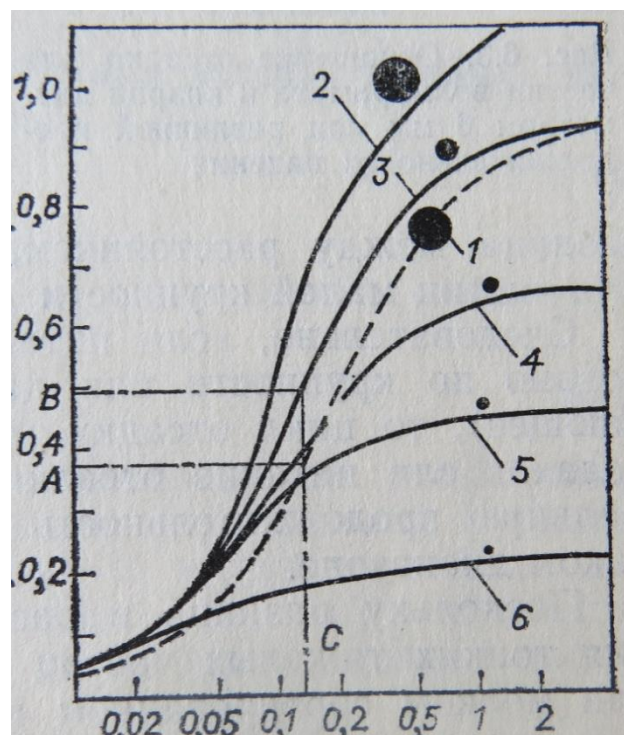


Рисунок 3.4 – Залежність середньої швидкості падіння від часу для різних частинок:

- 1 – частинки кварцу діаметром 16 мм;
- 2-6 – частинки вольфрамиту діаметром відповідно 16, 4, 2, 1 і 0,2 мм

Якщо живлення відсаджувальної машини відсортовано за крупністю або навіть класифіковано (рівнопадаюче), то цикл відсадки може змінюватися у широких межах. Якщо ж живлення не класифіковано, то оптимальну тривалість циклу слід вибрати у дуже вузькому діапазоні.

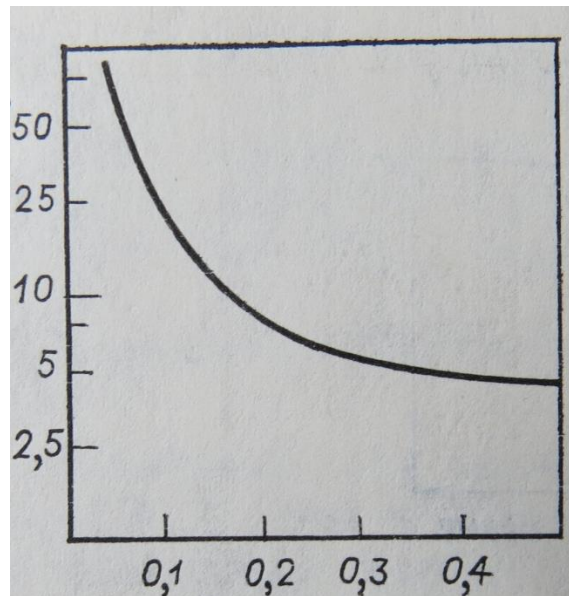


Рисунок 3.5 – Відношення відсадки для частинок вольфраміту і кварцу діаметром 6 мм при різній тривалості падіння

Оскільки різниця у відстані, пройденої за секунду, для тонких важких частинок менша, то при несортованому або дрібному сортованому живленні потрібна більша кількість періодів відсадки, тобто продуктивність відсаджувальної машини падає. Аналогічно, якщо густина частинок мало відрізняється, то навіть за умови збільшення тривалості циклу у розумних межах різниця у пройдених відстанях буде малою і знову потрібна буде більша кількість періодів відсадки, що знову зменшить продуктивність. Подібні графічні залежності можуть бути отримані для будь-яких інших пар мінералів з використанням приведених вище рівнянь.

Слід однак пам'ятати, що останні є досить наближеними, адже вони не враховують форму частинок, характер їх взаємодії та ефект просочування струменю у проміжки між ними під час ущільнення шару матеріалу.

Друга теорія, що пояснює процес відсадки, ґрунтується на понятті стисненого падіння частинок. Як відомо, осадження частинок у нерухомій рідині залежить від їх густини, форми і розміру [6]. Швидкість цього процесу можна визначити як функцію густини частинки σ_s відносно води ($\sigma_s - 1$) і діаметру. Якщо дві частинки мають однакову густина, то частинка з більшим діаметром має більшу кінцеву швидкість осадження.

В міру збільшення вмісту твердого у пульпі вплив взаємодії між частинками стає більш значним і середовище діє як важка рідина з густиною більшою, ніж реальна густина рідини.

Вважається, що у відсаджувальній машині із суспензією високої густини перегрупування частинок відбувається в умовах стисненого падіння. Проте цей процес обмежується коротким періодом часу і супроводжується швидким розпушенням постелі кожного циклу відсадки.

Ще одна теорія (теорія Маєра [8]) стверджує, що постіль у вигляді суміші частинок у початковому незайманому стані має певну потенційну енергію. А в розпушеній постелі мінеральні частинки різної густини намагаються зайняти такі положення, які б забезпечили системі мінімальну потенційну енергію (процес розшарування).

Таким чином, розшарування потребує зменшення енергії, яке, в решті решт, і є фізичною причиною розшарування. Проте, ця теорія може застосовуватися лише тоді, коли є фактичний фізичний контакт між частинками рухомої (розпушеної) постелі, адже у протилежному випадку перегрупування частинок, що зменшує рівень потенціальної енергії, відбуватися не може.

Нарешті, слід згадати ефект взаємного просочування частинок. Внаслідок того, що частинки різної крупності або густини за один період осадження проходять неоднакові відстані, вони досягають стану спокою у різні моменти. Наприклад, крупні частинки залишаються у суспензії менше часу у порівнянні з дрібними. В результаті крупні частинки взаємно зчіплюються, а дрібні продовжують за певних умов осаджуватися у проміжках між ними. Для приблизного кількісного опису цього процесу можна розрахувати максимальний відносний діаметр d' частинки, яка може просочитися між чотирма рівнорозмірними сферичними частинками діаметром d (рис. 3.6):

$$d' = \sqrt{2d^2} - d = 0,41d. \quad (3.4)$$

Як вже говорилося вище, процес відсадки дуже складний і його неможливо описати за допомогою будь-якої однієї з описаних теорій. Тому, вибираючи конк-

ретний тип відсаджувальної машини, потрібно виходити з розподілення частинок руди за мінеральним і гранулометричним складом, а також з вимог до якості кінцевих продуктів та бажаної ефективності розділення. Кожна така машина дозволяє у певному ступені регулювати процес розшарування частинок.

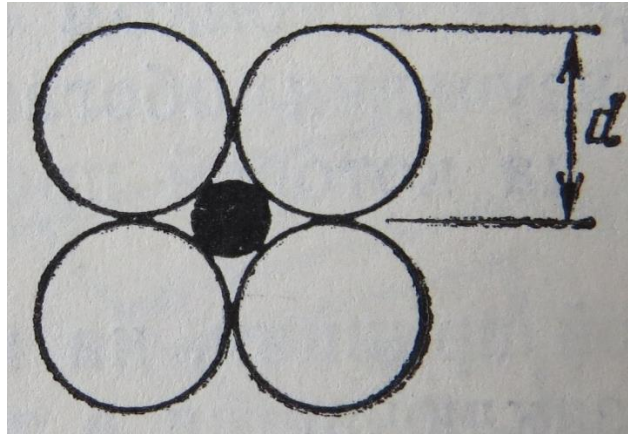


Рисунок 3.6 – Процес просочування у щілини

3.2 Процеси сепарації матеріалів у тонкому шарі рідини

Даний режим збагачення слід розділити на два основні випадки:

- власне збагачення у тонкому шарі, коли маємо близькі значення товщини шару рідини і крупності частинок, а швидкість зсуву відносно низька;
- збагачення у тонкому потоці, коли шар рідини суттєво більший, що викликає й більшу швидкість зсуву (як природного, так і прикладеного ззовні).

Для першого випадку основним принципом, що описує режим, є ламінарний рух шару рідини (наприклад, води) гладкою похилою поверхнею, при якому значення швидкості руху змінюється за параболічною залежністю – від нуля на рівні поверхні до максимальної величини у верхній частині шару. Величина швидкості v_y на глибині y становитиме:

$$v_y = \frac{\sigma g \sin \alpha (2x - y)y}{2\eta}, \text{ м/с}, \quad (3.5)$$

де σ – густина рідини, кг/м^3 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; α – кут нахилу похилої поверхні відносно горизонту, град.; x – товщина шару рідини, м; η – динамічна в'язкість рідини, $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2$. Усі приведені параметри показані на рис. 3.7.

Мінеральні частинки у такому ламінарному тонкому шарі розташовуються на похилій площині в наступному порядку (зверху вниз): дрібні важкі; великі важкі і дрібні легкі; великі легкі (рис. 3.8). В залежності від форми частинок цей ряд може змінюватися, адже плоскі частинки розташовуються у потоці вище круглих.

За допомогою рівняння (3.5) можна визначити товщину шару x для даних значень нахилу площини α та швидкості потоку v і навпаки. Величина x збільшується із зростанням швидкості потоку при постійному нахилі, а також із зменшенням нахилу при постійній швидкості потоку.

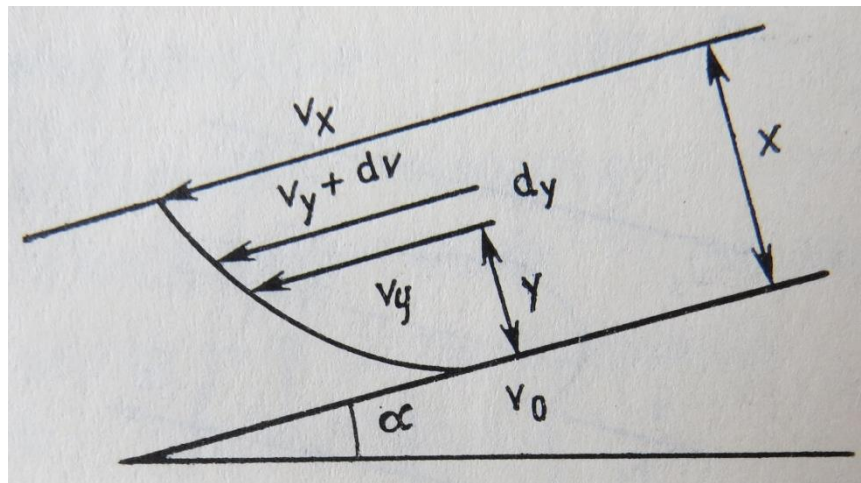


Рисунок 3.7 – Позначення, використані у рівнянні (3.5)

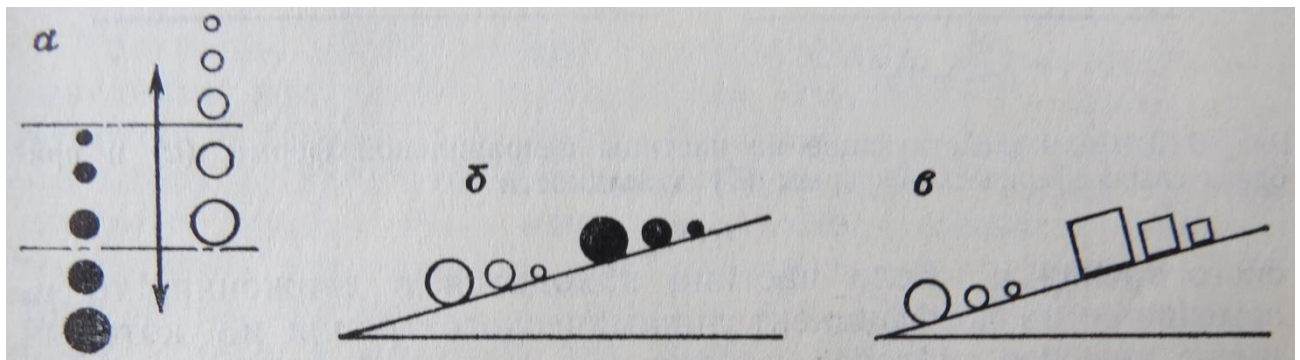


Рисунок 3.8 – Розташування частинок (● – важких; ○ – легких):
а – гідралічна класифікація; б – частинки різної крупності і густини;
в – частинки різної крупності і форми

Розглянемо частинку, що знаходиться на гладкій похилій поверхні, по якій тече тонкий шар води (рис. 3.9). На неї діють три сили:

- $F_1 = (m - m')g \sin \alpha$ – сила тяжіння;
- $F_2 = -(m - m')g\mu \sin \alpha$ – сила тертя;
- F_3 – сила впливу рідини.

У цих формулах: μ – коефіцієнт тертя між частинкою і похилою поверхнею, який може мати будь-яке значення від 0 і до коефіцієнту статичного тертя μ_s . Якщо частинка рухається, то останній замінюється на коефіцієнт динамічного тертя μ_D , який має менше значення і є функцією швидкості v частинки.

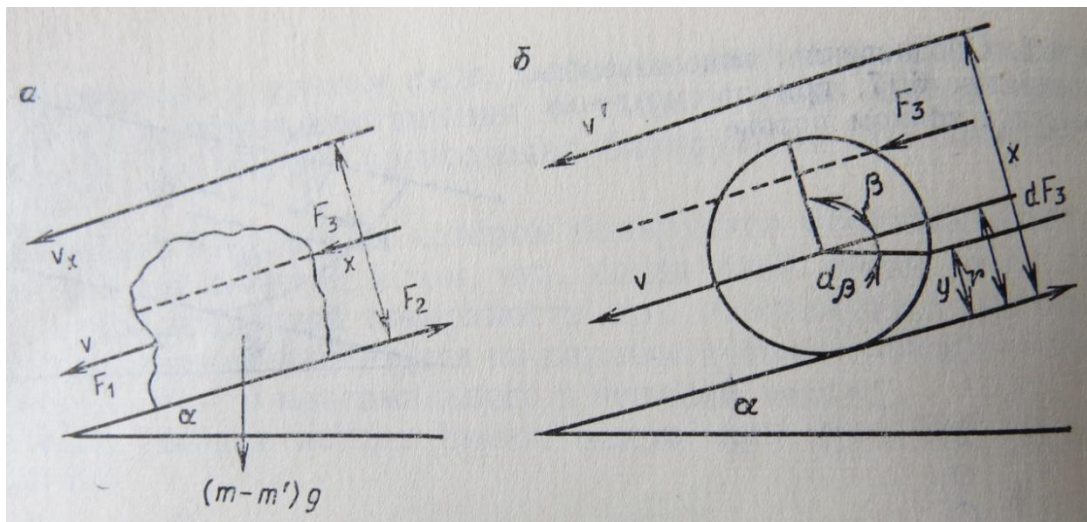


Рисунок 3.9 – Сили, що діють на частинки неправильної форми (а) і приблизно сферичної форми (б) у рідині

Сила F_3 залежить не лише від форми та орієнтації частинки, але й від режимів руху самої частинки та рідини. Більше того, швидкість рідини є функцією глибини потоку. Для переміщення частинок сферичної форми маємо:

$$F_3 = -\frac{9}{2}\pi k \sigma g r^3 \sin \alpha + 6\pi k \sigma g x r^2 \sin \alpha - 6\pi k \eta v r, \quad (3.6)$$

де $k = 2\pi$. Для частинок несферичної форми $k < 2\pi$ (зазвичай для кубічних частинок $k = 1,33$, а для плоских $k = 1$).

Усі ці висновки зроблені для режиму руху частинок у тонкому шарі рідини за рахунок ковзання похилою поверхнею. Але, якщо частинка має більш-менш ок-

руглу форму, вона може котитися цією поверхнею. Утім, для цього поверхня повинна бути гладкою. Якщо ж вона шорстка, з виїмками або частинки утворюють штучну постіль, по якій інші частинки рухаються у тонкому шарі, то нахил поверхні, необхідний для руху частинок як коченням, так і ковзанням, має бути суттєво збільшений.

Таким чином, оптимальні умови для розділення у тонкому шарі можна досягти шляхом правильного вибору нахилу поверхні та товщини шару. Остання має бути пропорційна крупності частинок.

Що стосується другого випадку (збагачення у тонкому потоці), то тут процес відбувається у шарі рідини висотою приблизно 10 діаметрів частинки з відносно невеликою швидкістю зсуву. Він характеризується вертикальним розшаруванням частинок, що відбувається під впливом так названої сили Багнольда F_B , яка діє на частинки пропорційно квадрату їхнього діаметру та швидкості зсуву. Напрямок впливу сили – перпендикулярно площині потоку (а, значить, і площині зсуву). Внаслідок дії цієї сили у верхньому шарі потоку зосереджуються великі легкі частинки, посередині – дрібні легкі та великі важкі, а в нижньому шарі (біля днища) – дрібні важкі.

Різновидами процесу сепарації матеріалів у тонкому шарі рідини є режими збагачення, в яких діють додаткові фактори впливу на частинки мінеральної сировини. До них слід віднести наступні:

- сепарація на мокрих струшувальних (концентраційних) столах;
- сепарація на гвинтових пристроях;
- збагачення на шламових концентраторах.

В концентраційних столах під час збагачення у тонкому шарі використовуються горизонтальний зворотно-поступальний асиметричний рух робочого органу (деки), спрямований перпендикулярно до тонкого потоку, а також додатковий вплив рифлів (перегородок), розташованих упоперек потоку і паралельно руху деки. Щільність розташування останніх має бути достатньою для збудження потоку і сприяти створенню його ламінарного режиму у верхній частині шару та турбулентного у нижній (на днищі деки між рифлями).

На рис. 3.10 показана схема концентраційного стола. Рух мінеральних частинок, що знаходяться на його деці і сприймають вплив її зворотно-поступального переміщення, залежить від максимального прискорення робочого органу стола. При цьому на частинку діють дві протилежні сили:

- сила, що визначається прискоренням деки $m \frac{dv}{dt}$ та надає частинці горизонтальний рух;
- сила тертя між декою і частинкою.

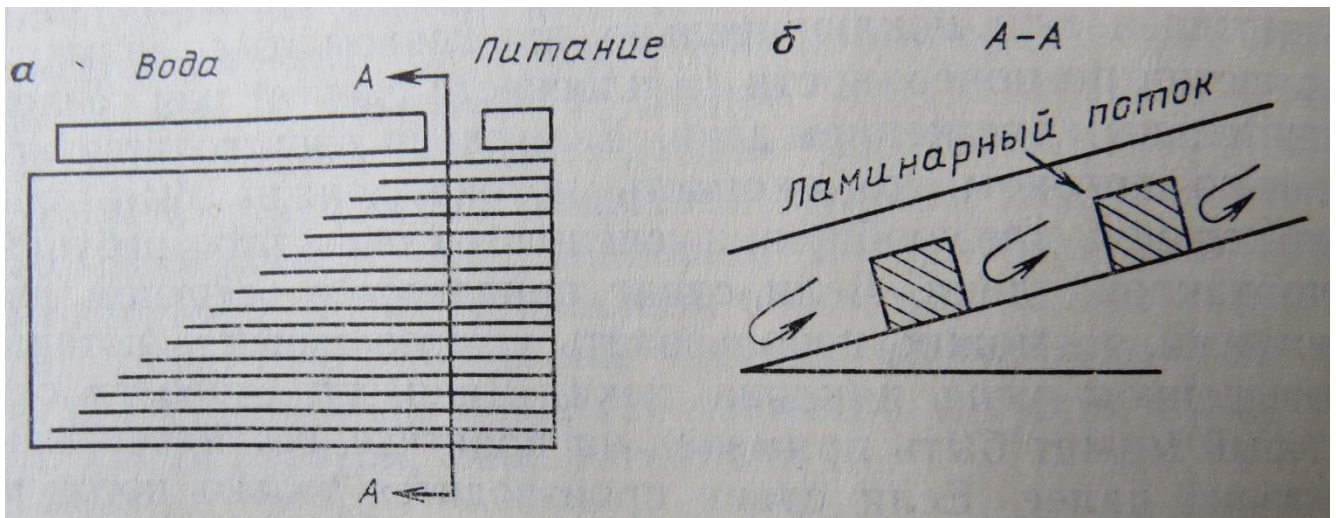


Рисунок 3.10 – Схема струшувального концентраційного стола:
а – вигляд зверху; б – поперечний перетин по А-А

В міру зростання прискорення деки сила тертя буде збільшуватися до значення, що відповідає коефіцієнту статичного тертя μ_s , незалежно від крупності і густини частинок. Коли $\frac{dv}{dt} < g\mu_s$, частинка рухатиметься разом з декою, а якщо $\frac{dv}{dt} > g\mu_s$, то дека вислизатиме з-під частинки. Внаслідок того, що рух деки зворотно-поступальний та асиметричний, частинка повинна рухатися в однаковому напрямку з декою ($\frac{dv}{dt} > g\mu_s$) – повільно дрейфувати на відстань, що буде залежати від максимуму $\frac{dv}{dt}$.

Під час прямого (вперед) ходу асиметричного руху деки дрібні частинки, що знаходяться у шарах рідини, які рухаються разом з декою, будуть залучатися

до спільного з нею руху. Ковзання послідовно зростатиме із збільшенням крупності та зменшенням густини частинок при зменшенні значення сили гальмування F_D .

В основному дрібні та важкі частинки дрейфуватимуть далі, ніж крупні й легкі, що робить цей процес практично зворотнім по відношенню до простого збагачення у тонкому шарі. В результаті комбінації двох ефектів частинки рухаються, розподіляючись у вигляді віял з розвантаженням в різних частинах деки (рис. 3.11).

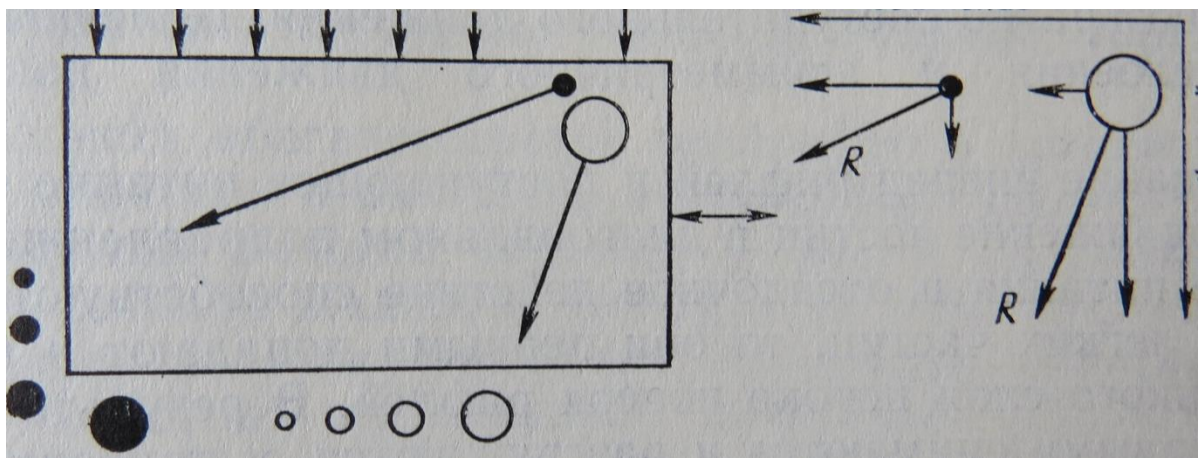


Рисунок 3.11 – Відносний рух частинок на гладкій деці струшувального стола:
 R – результуючий рух

Поєднання режимів концентрації у шарі та асиметричного зворотно-поступального руху ефективно з точки зору чіткого розподілення матеріалу, але має досить обмежену продуктивність через можливість обробки лише моношару матеріалу (шару глибиною в одну частинку). Використання рифлів, паралельних деці, створює пульсуючу постіль глибиною у декілька частинок, що дає можливість суттєво збільшувати продуктивність. Кожна западина між рифлями може розглядатися як мініатюрна відсаджувальна машина, в якій розшарування матеріалу контролюється наступними механізмами:

- стисненого падіння;
- досягнення мінімального рівня потенційної енергії (зниження центру ваги постелі);

- просмоктування у проміжках.

Звуження вперед рифлів та живлення, що надходить на деку стола, забезпечують просування частинок у діагональному напрямку. Тиск живлення та відсаджувальний ефект сприяють підйому крупних легких частинок, внаслідок чого вони першими потрапляють у поле дії тонкого шару потоку зверху рифлів і першими знімаються та розвантажуються у приводній частині стола. За ними йдуть дрібні легкі частинки ближче до дальнього краю стола. З іншого боку стола у біля його дальнього краю розвантажуються важкі дрібні частинки, а ближче до переднього краю – крупні важкі.

В результаті відбувається розподілення частинок у віялові смуги згідно з їхніми крупністю та густиною. Основне розташування частинок на частково рифленій деці показано на рис. 3.12.

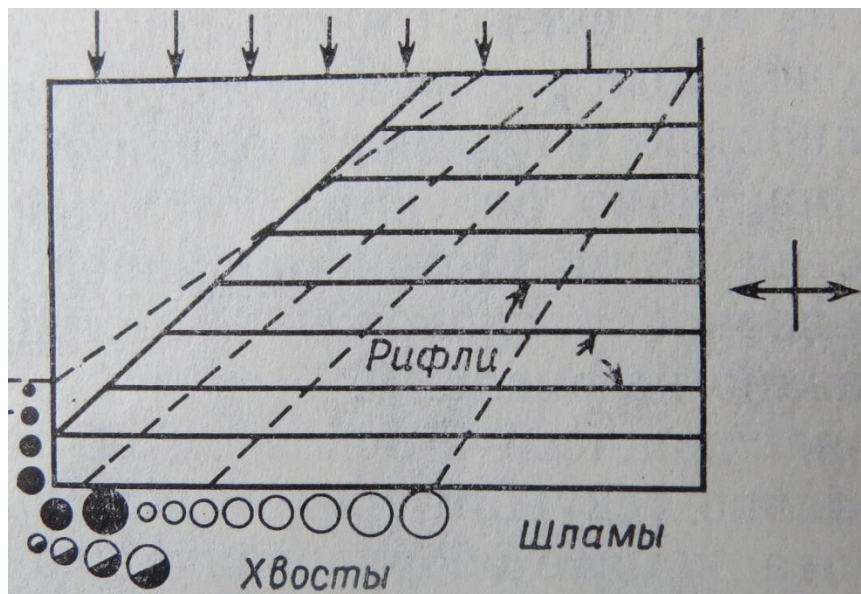


Рисунок 3.12 – Типове розташування продуктів розділення на частково рифленому струшувальному столі

Гвинтові сепаратори зі спірально плинним тонким потоком були свого часу створені в якості дешевого гравітаційного обладнання для первинної сепарації бідних хромітових пісків. Вони можуть мати різні значення нахилу, радіусу та профілю жолобу, але принцип дії в них однаковий.

Спіральний вигин гвинтового сепаратора забезпечує виникнення градієнту швидкості потоку рідини не лише у вертикальному напрямку, але й в радіальному за рахунок дії відцентрової сили. На різні компоненти потоку впливають відцентрові сили різної величини, що викликає створення відцентрового обертання у поперечному напрямку. Частина потоку у безпосередній близькості до поверхні переміщається назовні до точки максимальної швидкості потоку, а потім – вниз у потік ближче до поверхні жолобу. Далі він прямує поверхнею жолобу до внутрішньої межі потоку. Таке обертання у поперечному розрізі потоку переміщає важкі мінерали всередину до вихідного порогу або отвору, а легкі частинки, що рухаються швидше, але осаджуються повільніше, течуть далі мимо порогу. Таким чином, важкі і легкі мінеральні компоненти потоку зсуваються по горизонталі у поперечному напрямку у протилежні боки і відділяються одні від інших. На рис. 3.13 показана ідеалізована діаграма руху частинок у спіральному жолобі.

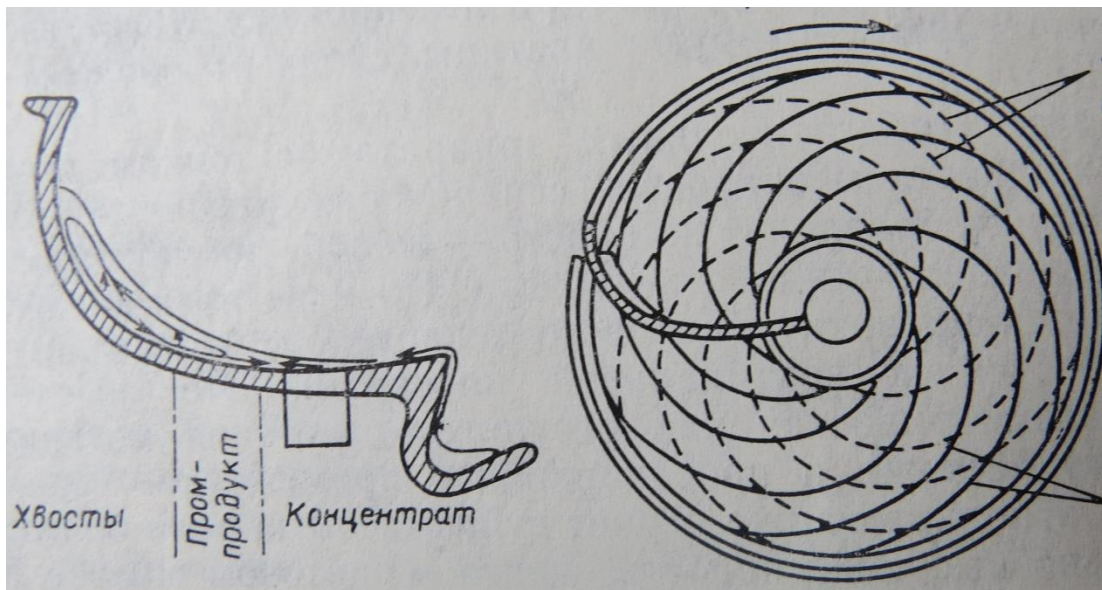


Рисунок 3.13 – Поперечний перетин спіралі, що демонструє рух частинки

Слід зауважити, що досі не існує математичного опису механізму гвинтової сепарації, який би повністю міг задовольнити усіх дослідників цього явища. Тобто, технологія гвинтової сепарації до нашого часу базується скоріше на емпіричних даних, ніж на теоретичних основах.

Нарешті, типовими представниками шламових концентраторів можна вважати сепаратори для вилучення тонких частинок крупністю 10-50 мкм. Робота з таким матеріалом характеризується підвищеною складністю і меншою ефективністю у порівнянні з крупним продуктом, адже в міру подрібнення мінеральних частинок їхня питома маса зменшується, а питома площа поверхні зростає. Наприклад, якщо одну частинку об'ємом 1 см^3 подрібнити до розміру частинок 1 мкм, то кожна така частинка буде важити лише $1 \cdot 10^{-12}$ частку від початкового об'єму, у той час коли загальна площа їхньої поверхні зростає в 10^8 разів.

На сучасному гравітаційному обладнанні нижня межа крупності збагачення складає 5 мкм.

Серед таких конструкцій слід згадати сепаратор Бартлез-Мозлі та концентратор Бартлез-Кросбелт [8].

Сепаратор Бартлез-Мозлі – це відносно простий апарат, схема роботи якого показана на рис. 3.14. Його концентраційна поверхня складається із 40 фібергласових дек товщиною 2 мм, об'єднаних у два пакети 1 по 20 дек кожна (відстань між деками в кожному пакеті 20 мм). Деки вільно підвішені за допомогою тросів 5 під кутом $1-2,5^\circ$ до горизонту на рамі 4. У такому положенні (а) відбувається процес концентрації. Для розвантаження продуктів збагачення у збірні жолоби 3 передбачений пневмоциліндр 6, яким можна нахилити деки у положення б.

У центрі між пакетами дек розташований привод агрегату, який забезпечує орбітальний рух дек в площині, паралельній ним за допомогою обертового зовнішнього балансиру. На рис. 3.15 показані дві точки підвісу дек та точка кріплення пневмоциліндру (а), а також еліпсоїдна траєкторія руху дек з великою віссю, паралельною осі деки (б). Частота обертання $150-200 \text{ хв.}^{-1}$, амплітуда 4-10 мм, швидкість зсуву змінюється в інтервалі від 0,5 до 2 м/хв.

Пульпа подається у кожну деку в чотирьох точках по її ширині через систему простих трубок 2 (див. рис. 3.14). При напрямку зсувних сил, зворотному силам потоку, що стікає вниз по деці, важкі і дрібні частинки матеріалу повільно осідають, а легкі і крупні залишаються у зваженому стані і транспортуються через усю поверхню деки у хвості. У процесі розшарування матеріалу на деці головну

роль відіграє згадана вище сила зсуву Багнольда. Невеликий нахил деки (він не повинен перевищувати $1,2-2,5^\circ$) створює більш глибокий потік у порівнянні з концентраторами з нерухомою поверхнею, що забезпечує підвищення продуктивності пристрою.

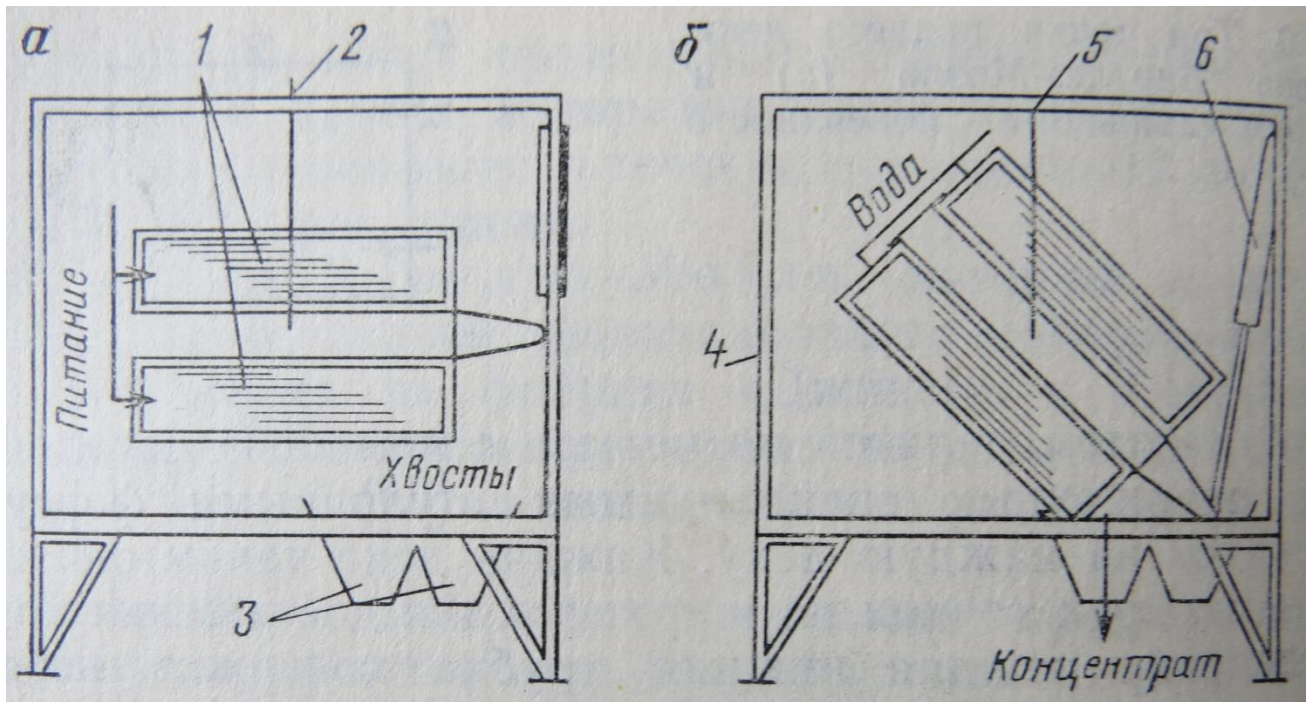


Рисунок 3.14 – Схема роботи сепаратора Бартлез-Мозлі:

а – положення концентрації (збирання); б – положення розвантаження;
1 – два пакети дек; 2 – клапанний пристрій подачі води та живлення; 3 – продук-
тові жолоби; 4 – головна (основна) рама; 5 – підвісні троси; 6 – циліндр нахилу

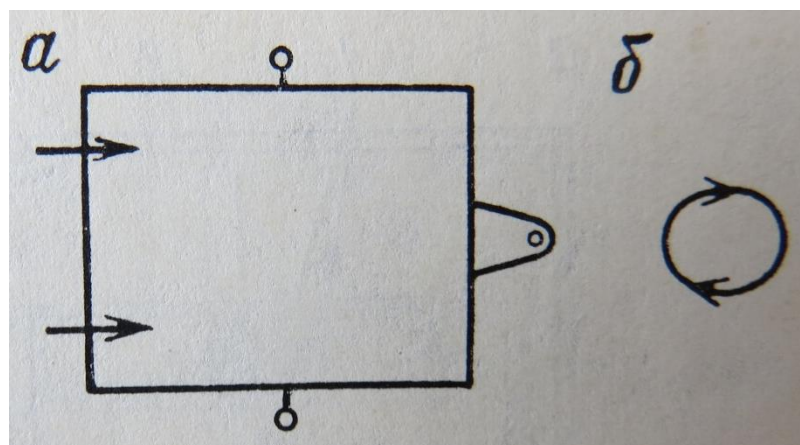


Рисунок 3.15 – Точки кріплення деки сепаратора Бартлез-Мозлі (а)
та траєкторія руху її поверхні (б)

Агрегат працює у повністю автоматичному режимі. Після заповнення деконцентратом (тривалість цього процесу залежить від складу перероблюваного матеріалу) подача живлення припиняється, пневмоциліндр нахиляє деки до кута приблизно 45° і концентрат видаляється з них за допомогою змивної води. Далі деки автоматично повертаються у робоче положення, відновлюється подача живлення в них і цикл повторюється.

На відміну від цього напівперіодичного пристрою концентратор Бартлез-Кросбелт використовує принцип колового зсуву з безупинним розвантаженням продуктів розділення. Продуктивність такої конструкції приблизно вчетверо нижча, ніж сепаратора Бартлез-Мозлі, але якість отриманого концентрату набагато вища.

Концентратор Бартлез-Кросбелт представляє собою тонку нескінчену стрічку з полівінілхлоридною поверхнею, яка має поперечний ухил від центрального поздовжнього хребта до обох бічних кромки (рис. 3.16). У поздовжньому напрямку стрічка горизонтальна. Живлення подається по усій лінії центрального гребеню. Важкі частинки концентрату відкладаються на стрічці і розвантажуються на головному шківу установки, а легкий порожній матеріал, що підтримується у зваженому стані за допомогою колового зсуву, розвантажуються через бічні кромки стрічки завдяки змінному поперечному нахилу останньої. Цей продукт вважається проміжним і потребує повторної переробки шляхом повернення в окрему промпродуктову зону на стрічці.

Використання сепаратора Бартлез-Мозлі в якості основного обладнання разом з концентратором Бартлез-Кросбелт в якості перечистного сприяє підвищенню ефективності гравітаційного збагачення шламів. Вони дають можливість суттєво знизити мінімальну крупність вилучених частинок до 6 мкм.

3.3 Процес важкосередовищного збагачення

Як вже говорилося вище, процес важкосередовищного збагачення здійснюється у рідинах (важких суспензіях), що мають проміжне значення густини по від-

ношенню до матеріалів, які піддаються розділенню. При цьому мінерали з густиною меншою у порівнянні з густиною рідинного важкого середовища (легка фракція), спливають в ньому, а частинки з більшою густиною (важка фракція) – потоплюють. Утворюються два різних продукти – відповідно поверхневий та донний – які можна окремо евакуювати із сепаратора за допомогою тих чи інших транспортних механізмів.

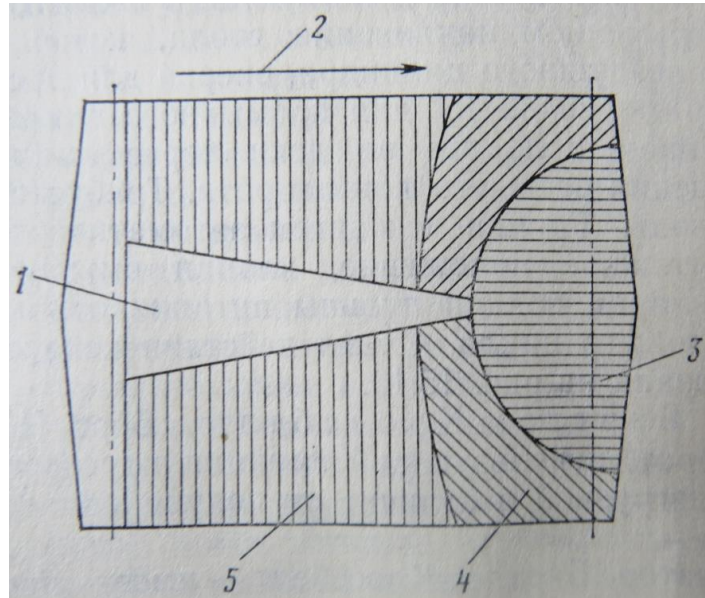


Рисунок 3.16 – Схема концентратора Бартлез-Кросбелт:

1 – живильна коробочка; 2 – напрямок руху стрічки; 3 – промивна (концентратна) зона; 4 – зона промпродукту; 5 – зона живлення або вилучення

В якості важких суспензій у збагачувальній галузі використовують [6]:

- механічні суспензії тонкодисперсних важких мінералів (обважнювачів) у воді. В залежності від густини цих мінералів (піриту, магнетиту, піску, свинцю, сплавів феросиліцію тощо), а вона може коливатися від 2500 до 7500 кг/м³, можна отримати суспензії густиною від 1500 до 3500 кг/м³;

- органічні важкі рідини – бромформ CHBr_3 (2800 кг/м³), тетраброметан $\text{CHBr}_2 \cdot \text{CHBr}_2$ (2960 кг/м³) та інші;

- водяні розчини солей – хлористого кальцію (1650 кг/м³), хлористого цинку (2070 кг/м³) тощо.

Промислове використання того чи іншого типу важкої суспензії залежить, насамперед, від сировини, що підлягає сепарації:

- суспензії густиною $1300-1800 \text{ кг/м}^3$ – для збагачення вугілля та легких мінералів. Здебільшого це магнетитові суспензії густиною вище 1500 кг/м^3 . Для цього природний магнетит подрібнюють у кульовому млині;

- $2700-2900 \text{ кг/м}^3$ – для попереднього збагачення руд різних металів. В такому інтервалі густини застосовують, як правило, подрібнений чистий феросиліцій або в суміші з подрібненим магнетитом (останній варіант більш економічний);

- $2900-3600 \text{ кг/м}^3$ – для спеціального збагачення руд та алмазів. Тут єдиним прийнятним варіантом є сферичний феросиліцій, який має реологічні властивості, відмінні від властивостей згаданого вище подрібненого феросиліцію з частинкам неправильної форми. Він допускає більш високий ступінь засмічення суспензії без надмірного зростання її уявної в'язкості. Але його вартість більше ніж удвічі вища;

- більше 3600 кг/м^3 – для деяких особливих випадків збагачення окремих типів руд. В таких умовах можна використовувати галеніт. Теоретична максимальна густина середовища у цьому випадку може бути біля 4500 кг/м^3 .

Зазвичай більш високій густині рідини відповідають вищі значення вартості та токсичності. Остання характеристика часто призводить до заборони використання подібних матеріалів з точки зору техніки безпеки. З огляду на це, в промислових умовах використовують в основному важкі механічні суспензії.

Для приготування важких суспензій проміжної густини застосовують метод змішування з використанням графічної номограми або наступної формули:

$$\sigma_s = \frac{100}{\frac{s}{\sigma_a} + (100-s)}, \quad (3.7)$$

де σ_s – уявна густина суспензії; σ_a – густина твердих частинок (обважнювача); s – концентрація твердих частинок, %.

Окрім густини, іншими важливими властивостями важких суспензій є стійкість (здатність зберігати однорідність з точки зору густини у різних шарах по висоті апарату) та в'язкість. В залежності від ступеня важливості тієї чи іншої властивості у кожному конкретному випадку вдаються до заходів регулювання суспе-

нзій шляхом додавання тонких матеріалів для підвищення пластичності та в'язкості або спеціальних хімічних реагентів. Утім, останній варіант рекомендується застосовувати лише тоді, коли це абсолютно необхідно. Краще використовувати механічні методи, такі як перемішування суспензії, застосування відцентрової сили, підбір раціонального способу подачі живлення тощо.

Висновки:

- усі відомі процеси гравітаційного збагачення можна розділити на дві основні групи за механізмом розділення частинок, що використовується при цьому: ті, що характеризуються рухом частинок у вертикальній площині під час сепарації в об'ємі пульпи; ті, що відносяться до руху частинок похилою площиною в процесі збагачення у тонкому шарі пульпи;

- до першої групи відноситься процес відсадки. Існують різні теорії, що намагаються пояснити фізику цього надзвичайно складного процесу, але жодна з них не спроможна самостійно й вичерпно описати його. Тому, під час оцінки ефективності використання того чи іншого відсаджувального обладнання потрібно виходити з розподілення частинок руди за мінеральним і гранулометричним складом, а також з вимог до якості кінцевих продуктів та бажаної ефективності розділення. Кожна така машина дозволяє у певному ступені регулювати процес розшарування частинок під час відсадки;

- що стосується режиму збагачення у тонкому шарі рідини, то тут потрібно розрізняти випадки, коли його товщина близька до розміру частинок і коли він суттєво більший. Вони відрізняються як величиною швидкості зсуву потоку, так і характеристиками його руху. У першому випадку це ламінарний рух моношару частинок похилою поверхнею, у другому – процес вертикального розшарування останніх під дією сили Багнольда, в результаті чого вони розподіляються за густиною і розмірами;

- для підвищення ефективності процесу сепарації матеріалів у тонкому шарі рідини використовуються режими збагачення, в яких діють додаткові фактори впливу на частинки мінеральної сировини. На концентраційних столах це асимет-

ричний зворотно-поступальний рух робочого органу, що діє у перпендикулярно-му до потоку пульпи напрямку, та застосування рифлів, які створюють пульсуючу постіль і забезпечують можливість підвищення її глибини, а, значить, і продуктивності збагачення. На гвинтових сепараторах додатковий вплив на характер розділення компонентів потоку чинить відцентрова сила, яка створює відцентрове обертання потоку у поперечному напрямку, завдяки чому важкі і легкі мінеральні частинки розходяться у протилежних напрямках. Щодо теоретичного опису механізму гвинтової сепарації, то тут ситуація схожа з процесом відсадки: технологія збагачення на гвинтових пристроях досі базується лише на емпіричних даних, отриманих в результаті багаторічного досвіду експлуатації подібного гравітаційного обладнання;

- режим збагачення у тонкому шарі рідини, що тече похилою площиною, використовується також у шламовому обладнанні, призначеному для вилучення дрібних частинок розміром 10-50 мкм. Найкращі результати у цьому класі збагачувальної техніки демонструють комплекси у складі сепаратора Бартлез-Мозлі в якості основного обладнання та концентратора Бартлез-Кросбелт для переочищення отриманого промпродукту, що дають можливість суттєво знизити мінімальну крупність вилучених частинок до 6 мкм;

- аналіз процесу важкосередовищної сепарації мінеральної сировини дозволив визначити номенклатуру та області використання важких суспензій, а також особливості регулювання їхніх основних властивостей.

4 АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ГРАВІТАЦІЙНОГО ЗБАГАЧЕННЯ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Загальна класифікація та порівняльний аналіз основних типів механічного обладнання гравітаційного збагачення мінеральної сировини викладені вище, у першому розділі даної роботи. Спробуємо тепер більш докладно розглянути деякі з них, що відрізняються високим рівнем ефективності розділення компонентів корисних копалин.

4.1 Обладнання для підготовки живлення

Для ефективного збагачення мінералів потрібна ефективна підготовка живлення. Це правило справедливо для усіх без виключення методів сепарації, в тому числі для гравітаційного. В залежності від особливостей сировини та вимог, що ставляться до продуктів збагачення, підготовка живлення може бути різного ступеню складності, але головними операціями під час її проведення залишаються усі форми зменшення розмірів шматків (дроблення, подрібнення), сортування за крупністю за допомогою грохочення, класифікація у водяному середовищі, відділення твердого від рідини після виконання підготовчих операцій. Оскільки переважна більшість способів гравітаційного збагачення здійснюється у водяному середовищі, то й підготовку живлення частіше за все проводять в аналогічних умовах. Важливе значення при цьому має правильне регулювання водного балансу.

Для дроблення і подрібнення сировини користуються дробарками і млинами різних типів, що найкраще підходять для даного матеріалу та забезпечують отримання потрібного продукту.

Сортування подрібненого матеріалу за крупністю методом просіювання через отвори робочих органів грохотного обладнання (сита) – операція, надзвичайно широко розповсюджена на будь-якому збагачувальному підприємстві. Матеріал меншого розміру, що проходить крізь отвори сита, утворює так називаний підре-

шітний продукт, а більш крупний, що не може цього зробити – надрешітний. Але для отримання максимальної ефективності просіювання потрібно, щоб усі без виключення частинки живлення грохоту, які можуть за своїми розмірами пройти крізь отвори сита, зробили це. Для цього матеріал має подаватися на сито моношаром. Лише у такому випадку кожна частинка матиме шанс на зустріч зі своїм отвором.

На жаль, в умовах реального виробництва, хоча б з точки зору необхідності забезпечення заданого рівня продуктивності грохотного обладнання, сировина подається на сито товстим шаром, що стає причиною суттєвого зменшення ефективності процесу просіювання. Цей показник також залежить від швидкості руху матеріалу відносно поверхні сита, від довжини і форми останнього, розмірів і форми отворів, величини живого перетину сита, а також від способу примусового розпушення шару частинок для підвищення їхньої рухомості.

Для грохочення мінеральної сировини перед операціями гравітаційного збагачення використовуються здебільшого плоскі грохоти вібраційного типу, а також барабанні і дугові конструкції.

Процес класифікації матеріалу за крупністю у воді заснований на різниці у швидкостях, з якими зерна мінеральної сировини різного розміру і маси падають у в'язкому середовищі, яке створює опір цьому падінню, тим більший, чим більше швидкість останнього. Процес відбувається у колонні, в якій рідина весь час піднімається з постійною швидкістю. При цьому частинки зі швидкістю падіння більшою за швидкість підйому води в решті-решт опустяться на дно судини і стануть нижнім продуктом – пісками, а ті, в яких швидкість падіння буде недостатньою – піднімуться у злив.

В залежності від характеру руху мінеральних частинок у класифікаторі розрізняють три можливі режими процесу: режим вільного падіння, режим стисненого падіння, вихровий режим. У першому випадку заповнення об'єму рідини частинками матеріалу досить незначне (вміст твердого в пульпі не більше 15%) і частинки не заважають одна іншим. В таких умовах при однаковій густині двох частинок більша кінцева швидкість падіння буде у частинки більшого розміру; при

однакових розмірах частинки більша швидкість падіння буде у більш важкої частинки (тієї, що має більшу густину). Зростання вмісту твердого у пульпі збільшує вплив взаємодії частинок між собою, що спричиняє підвищення опору і зменшення швидкості падіння. Останнє стає більш помітним для частинок з меншою густиною та більшими розмірами. Нарешті, вихровий режим настає, коли частинки знаходяться у практичному взаємному контакті і розділяються лише тонкими плівками води. Частинки втрачають здатність до вільного переміщення і залишаються на місці.

Для механізації процесу використовуються механічні та гідравлічні класифікатори різних конструкцій. Перші мають ємність з похилим днищем, на яке осідає важкий матеріал (піски) і далі примусово розвантажується елеваторними, спіральними, чашковими, спірально-лопатевими та іншими типами робочих органів. Легкі частинки йдуть у злив. Найбільш досконалою конструкцією вважається спіральна. На рис. 4.1 показана схема односпірального класифікатора [6].

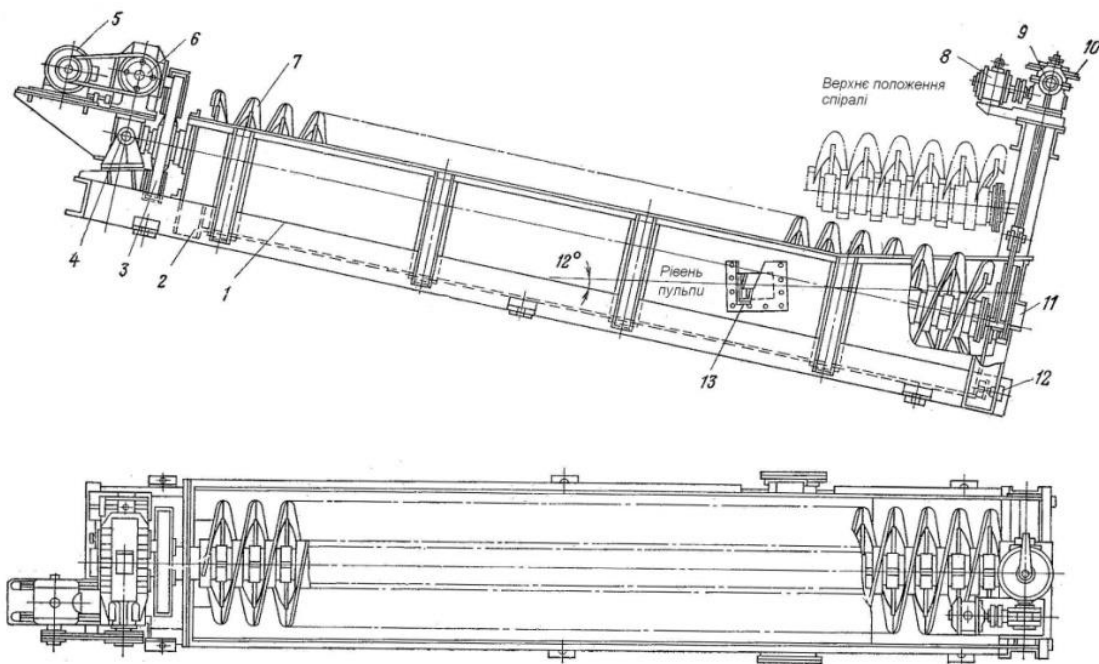


Рисунок 4.1 – Схема односпірального класифікатора механічного типу:
1 – корпус (корито); 2 – жолоб для розвантаження пісків; 3 – зубчаста передача приводу спіралі; 4 – вісь повороту площадки приводу; 5 – електродвигун спіралі;
6 – редуктор; 7 – спіраль; 8 – електродвигун механізму підйому спіралі;
9 – редуктор; 10 – конічна шестірня; 11 – зливний патрубок;
12 – аварійний люк; 13 – прийомний карман

Такого роду обладнання широко використовується у замкнених циклах под-
рібнення, на промивальних фабриках вони діють як сортувальне обладнання, а
можуть також працювати в якості згущувачів, коли уся тверда фаза видаляється у
піски.

Гідравлічні класифікатори працюють за принципом самопливного розван-
таження (згущувальні конуси, пірамідальні відстійники, струминні згущувачі).
Робота цих конструкцій характеризується застосуванням додаткової води для орга-
нізації потоку в напрямку, протилежному напрямку осадження важкого матеріалу.
На рис. 4.2 показана схема конусного піщового класифікатора [6]. Пульпа надхо-
дить у корпус 1 через циліндр 3, розсікач 4 та конус 7. Крупні зерна осаджуються
в нижній частині корпусу і періодично розвантажуються за допомогою випускно-
го пристрою 9. Дріб'язок висхідним потоком додаткової води піднімається нагору
і видаляється через зливний поріг.

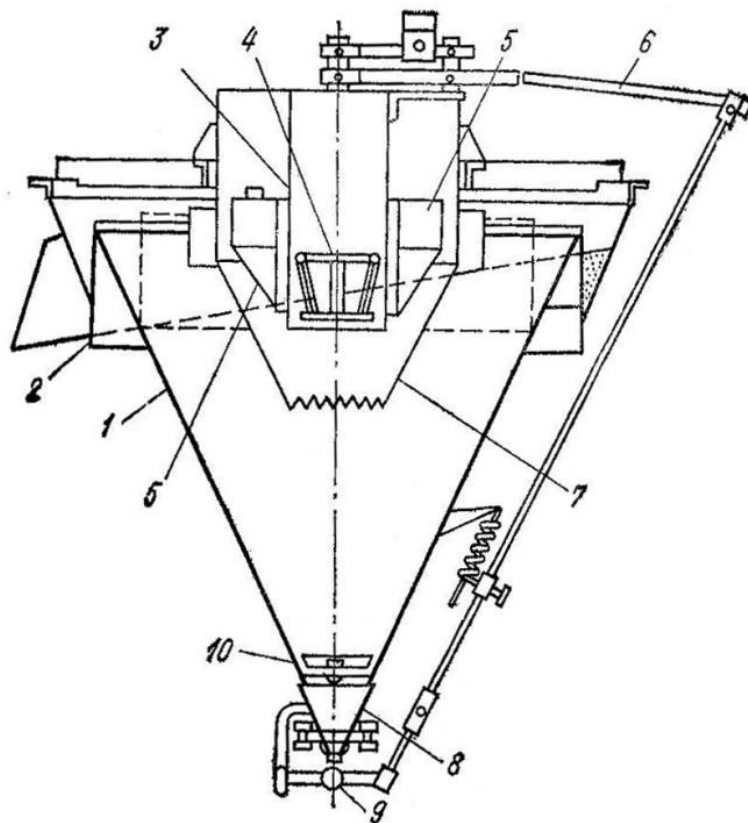


Рисунок 4.2 – Схема конусного піщового класифікатора гідравлічного типу:
1 – корпус; 2 – зливний жолоб; 3 – завантажувальний циліндр; 4 – розсікач;
5 – поплавковий пристрій; 6 – система важелів; 7 – внутрішній конус;
8 – головка; 9 – випускний пристрій; 10 – регулювальна діафрагма

Усі згадані конструкції класифікаторів використовують для розділення матеріалу лише силу тяжіння. На відміну від них існують відцентрові конструкції, серед яких найбільш цікавою та широко відомою є гідроциклон, схема якого показана на рис. 4.3 [6]. Цей безприводний апарат представляє собою циліндро-ко-

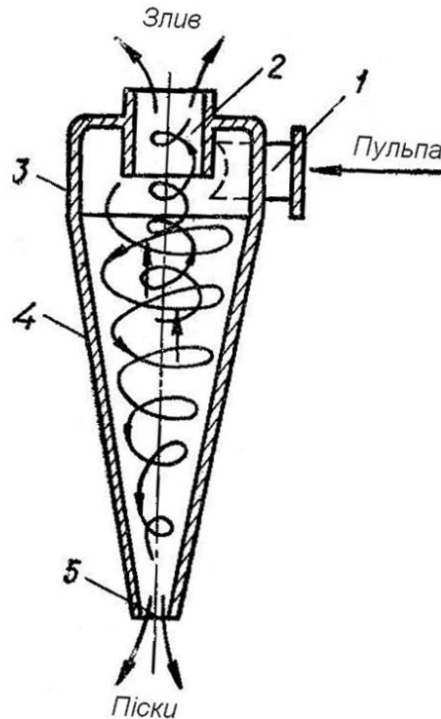


Рисунок 4.3 – Схема гідроциклона:

1 – живильний патрубок; 2 – зливний отвір; 3, 4 – відповідно циліндрична та конічна частини корпусу; 5 – пісковий отвір

нічний корпус 3,4 з двома осьовими отворами (нижнім пісковим 5 та верхнім зливним 2) і тангенціально встановленим живильним патрубком 1. Живлення поступає всередину гідроциклона під тиском і завдяки положенню патрубку 1 забезпечує вихровий рух суспензії, в результаті якого в апараті утворюється вир із зоною зниженого тиску уздовж його осі. У цій зоні виникає повітряний стовп, пов'язаний з атмосферою через пісковий отвір. Крупні частинки матеріалу під впливом відцентрової сили спускаються спіральною траєкторією по внутрішній поверхні апарату та евакуюються через пісковий отвір. Маса рідини разом з дрібними частинками витискається з циклону через зливний отвір, створюючи вторинний вир навколо повітряного стовпа, який активно виштовхує більш крупні частинки назад у

первинний вир. Тобто розділення матеріалу за крупністю відбувається в результаті одночасного двостадійного процесу.

Показана на рис. 4.3 просторова орієнтація гідроциклону не є обов'язковою, адже радіальна відцентрова сила в декілька разів більша за силу тяжіння. Тому робота апарату можлива практично під будь-яким кутом його нахилу.

Гідроциклони використовуються для виконання різноманітних підготовчих операцій при гравітаційному збагаченні: згущення, вилучення твердого, вилучення рідини, фракціонування, протитечійного промивання, видалення піску, а також таких, що мають особливе значення: знешламлення, класифікації та попереднього збагачення. Наприклад, у багатьох сучасних циклах подрібнення гідроциклони замінюють механічні класифікатори завдяки низькій вартості, малим розмірам та високій ефективності. Вони чудово підходять для попередньої класифікації в циклах гідрокласифікації, а також для класифікації матеріалу, занадто тонкого для гідросепаратора.

Важливе значення під час підготовки живлення для гравітаційного збагачування має проблема забезпечення раціонального водяного балансу, адже практично для кожного гравітаційного апарату існують оптимальні значення густини пульпи. Крім того, більшість конструкцій потребують певного додавання чистої промивної води.

Контролю густини пульпи далеко не завжди надається достатня увага, що часто стає основною причиною незадовільного виконання операцій гравітаційного збагачення.

Якщо розбавлення пульпи досягається досить просто шляхом додавання потрібної кількості води, то її згущення потребує використання гідроциклонів або згущувачів.

4.2 Обладнання для важкосередовищного збагачення

Основні особливості процесу важкосередовищного збагачення були викладені вище, у п. 3.3 роботи. Його використання у сучасній світовій гірничозбагачу-

вальної галузі характеризується надзвичайною широтою, особливо під час обробки вугілля. Не дивно, що в таких умовах існує багато конструктивних схем (їхнє число наближається до сотні) промислових важкосередовищних сепараторів. Усі вони (як і класифікатори) можуть бути розділені на два основні класи:

- ті, що використовують силу тяжіння (гравітаційні) для розділення частинок крупніше 3 мм;
- ті, що для підвищення продуктивності та розділення дрібного матеріалу (менше 0,5 мм) працюють із застосуванням відцентрових сил.

Гравітаційні конструкції відрізняються формою корпусу (ванни), в якому здійснюється операція розділення матеріалу, а також типом механізму для видалення з нього важкої фракції. На рис. 4.4 показані основні принципові схеми гравітаційних важкосередовищних сепараторів [6].

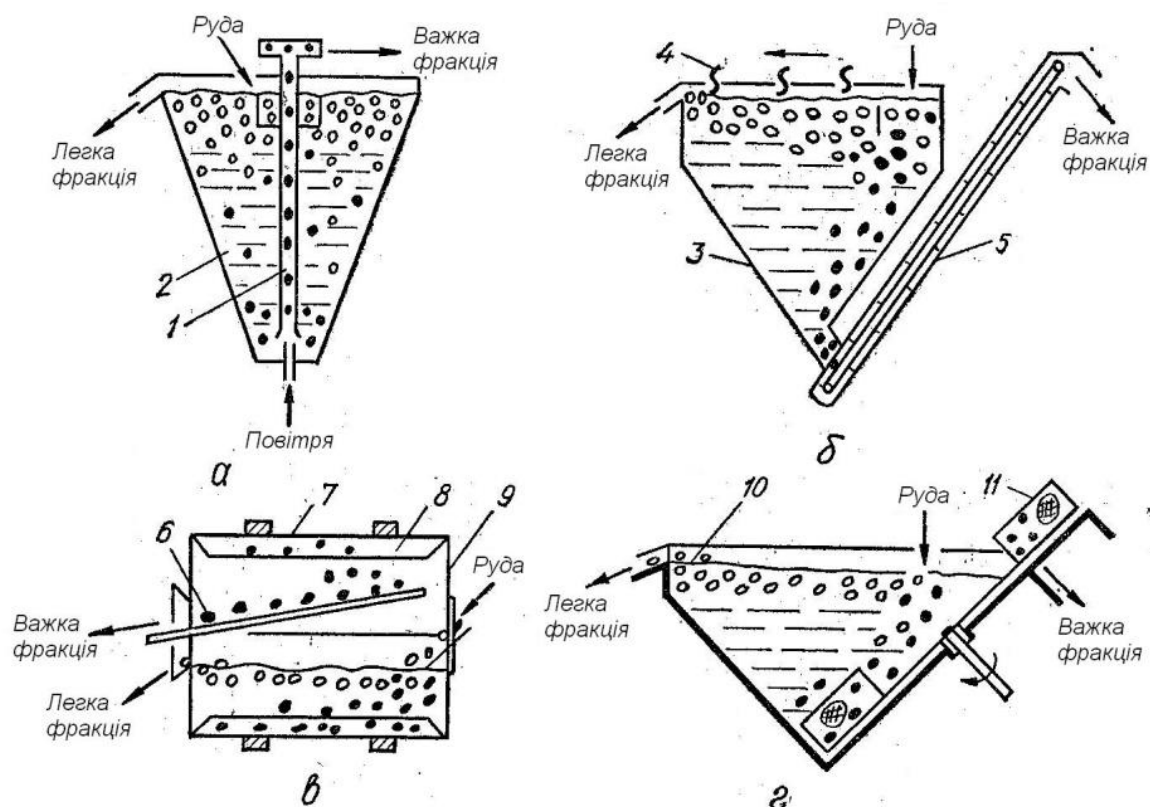


Рисунок 4.4 – Принципові схеми важкосередовищних сепараторів гравітаційного типу:

- а – конусний; б – пірамідальний; в – барабанний; г – колісний (коритний)
 1 – аероліфт; 2, 3, 10 – корпуси; 4 – гребковий транспортуючий пристрій;
 5 – ковшовий елеватор; 6 – жолоб; 7 – барабан; 8 – лопати; 9 – торцевий отвір;
 11 – лопатевий елеватор

Живлення уводиться у верхні частини апаратів (в барабанному – через завантажувальний отвір). Легка фракція видаляється через зливний поріг, а важка – за допомогою гребкового пристрою, лопатевого елеватору, похилого лотка або аероліфту.

Найбільш розповсюдженими є конусні та барабанні конструкції. Перші ідеально підходять для переробки крупношматкового (100-3 мм) вугілля і руд, адже вони легше переробляють значні обсяги легкої фракції, а другі більш пристосовані до роботи з важкою фракцією (переробка вугілля і руд в інтервалі крупності 5-250 мм).

Коритні установки відрізняються порівняно неглибокою ванною і призначені в основному для сепарації вугілля та інших неметалевих корисних копалин зі значним вмістом як легкої, так і важкої фракції.

Сепарація дрібнозернистого матеріалу звичайним гравітаційним способом ускладнюється через зниження швидкості падіння частинок пропорційно зменшенню їхніх розмірів. В таких умовах розділення дуже дрібного матеріалу стає практично неможливим. Тому приходиться вдаватися до динамічного режиму роботи з використанням відцентрових сил. Значні сили, що діють під час відцентрової сепарації, дозволяють з успіхом розділяти доволі тонкі частинки і створюють великі зсувні зусилля всередині апарату

Для реалізації такого режиму сепарації застосовуються важкосередовищні гідроциклони та центрифуги. По суті, будь-який гідроциклон може бути використаний для динамічної важкосередовищної сепарації, адже принцип роботи установок однаковий. На рис. 4.5 показана схема двопродуктового важкосередовищного гідроциклону [6]. У цьому випадку розташування поздовжньої осі гідроциклону має бути близьким до горизонтального для можливості подачі живлення до завантажувального патрубку 1 при порівняно малому тиску. Усе решта відбувається у порядку, аналогічному вищеописаному: важкі частинки переміщуються уздовж стінок корпусу 2 циклону і розвантажуються через піскову насадку 3, легкі частинки проходять крізь зливну трубу 5 і розвантажувальну камеру 6, а тонке середовище утворює градієнт густини всередині циклону.

Для суспензійного збагачення руд більш ефективно виростання гідроциклону вихрового типу, який має східну конструкцію, але розташовується у перевернутому відносно показаного на рис. 4.3 положенні. Його принципова схема приведена на рис. 4.6 [6]. Піскова насадка 4 пристрою разом з прийомною камерою 5

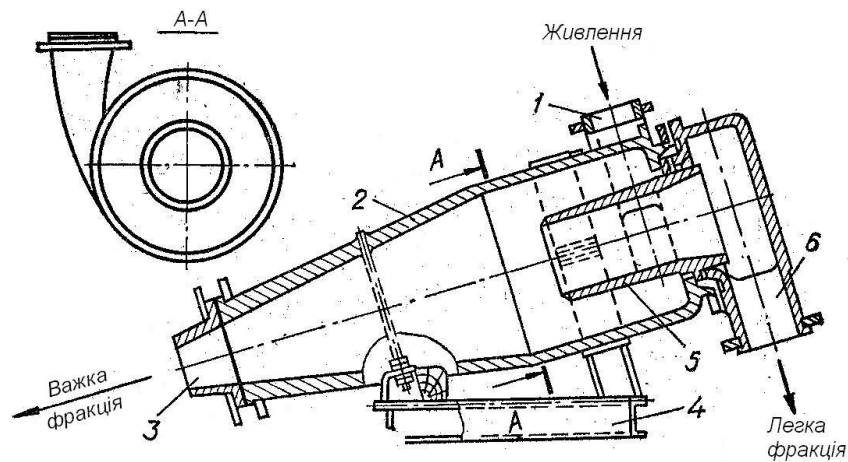


Рисунок 4.5 – Схема двопродуктового важкосередовищного гідроциклону:
1 – завантажувальний патрубок; 2 – конічна частина корпусу; 3 – насадка;
4 – рама; 5 – зливна труба; 6 – розвантажувальна камера

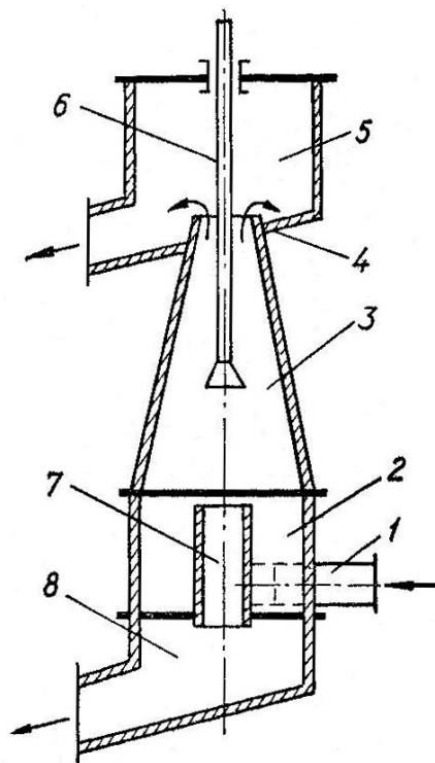


Рисунок 4.6 – Схема вихрового важкосередовищного гідроциклону:
1 – завантажувальний патрубок; 2, 3 – циліндрична та конічна частини корпусу;
4 – піскова насадка; 5 – прийомна камера; 6 – повітряна трубка;
7 – зливний патрубок; 8 – камера

знаходиться на вершині циклону (вона має в 1,5-2 рази більший діаметр, ніж в стандартних циклонах, що забезпечує можливість збагачення більш крупного матеріалу), а зливний патрубок 7 – внизу. Тиск у вихорі стабілізується на рівні атмосферного завдяки уведенню в конструкцію пристрою повітряної трубки 6, сполученої з атмосферою.

В табл. 4.1 і 4.2 приведені технічні характеристики важкосередовищних гідроциклонів звичайного та вихрового типів для збагачення руд [6].

Після розділення продуктів необхідно здійснити наступні операції:

- видалити середовище з продуктів сепарації шляхом грохочення на дренальному та промивному грохоті;
- регенерувати середовище шляхом видалення будь-яких домішок та зневоднення у відстійнику. Для регенерації магнітного середовища використовуються різні цикли із залученням магнітних сепараторів барабанного типу. В деяких випадках, коли застосовується немагнітне середовище, наприклад пісок, його очищають на конічних згущувачах.

Як вже говорилося вище, з усіх відомих процесів гравітаційного збагачення мінеральної сировини важкосередовищна сепарація є найпростішим та одночасно найефективнішим. Ступінь ефективності важкосередовищного сепаратора може бути визначений за допомогою кривої Тромпа, яка представляє собою залежність окремого виходу від густини. В ідеальному випадку розділення характеризується вертикальною лінією при ефективній густині розділення. Дійсна крива розділення представляє собою круту лінію, вигнуту у верхній і нижніх частинах. Майже усі криві Тромпа у діапазоні окремих виходів 25-75% виражаються прямою залежністю (в арифметичному масштабі). Кут нахилу прямої приймається в якості міри ефективності процесу і називається ймовірною погрішністю E_p , яка визначається як половина різниці середньої густини між цими двома точками (B і A) (рис. 4.7):

$$E_p = 0,5(B - A). \quad (4.1)$$

Криві Тромпа можуть бути побудовані в логарифмічній шкалі (рис. 4.8).

Значення E_p та кожна отримана крива специфічні для конкретного апарату.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики важкосередовищних гідроциклонів звичайного типу

Показники	Діаметр гідроциклону, мм	
	350	500
Діаметр, мм:		
піскової насадки	48-75	75-120
зливного патрубку	100; 120; 140	140; 170; 200
Висота циліндричної частини, мм	500	700
Кут конусності, град.	20	20
Розмір вхідного отвору, мм	60x135	80x180
Крупність руди, мм	15-0,5	20-0,5

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики важкосередовищних гідроциклонів вихрового типу

Показники	Діаметр гідроциклону, мм	
	350	500
Діаметр, мм:		
піскової насадки	100; 125; 150	150; 180; 210
зливного патрубку	150; 165; 180	210; 230; 250
Висота:		
циліндричної частини, мм	500	750
подачі суспензії, м	5-8	8-12
Кут конусності, град.	20	20
Розмір вхідного отвору, мм	60x140	110x240
Крупність руди, мм	30	40
Продуктивність:		
по залізній руді, т/год.	40	95
по марганцевій руді, т/год.	25	55
по суспензії, м ³ /год.	150	360

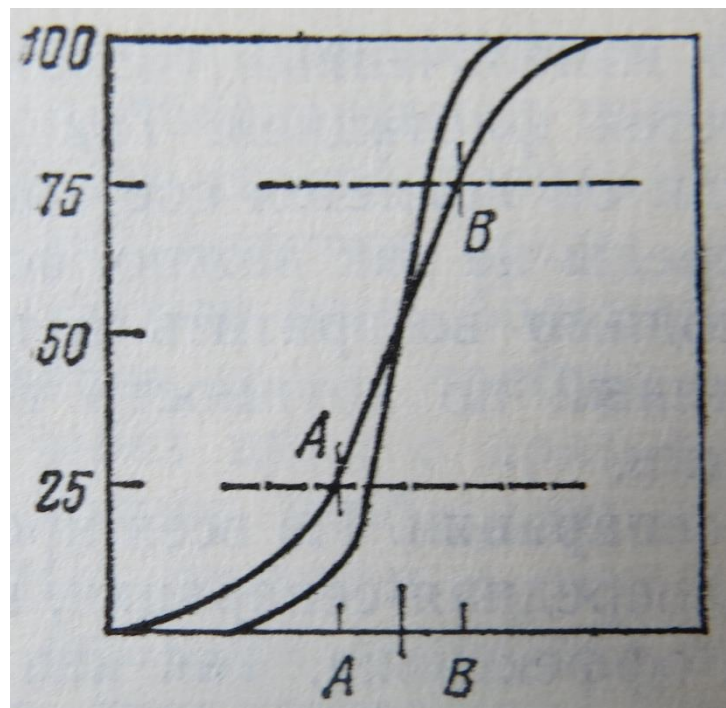


Рисунок 4.7 – Криві Тромпа для двох гіпотетичних розділень

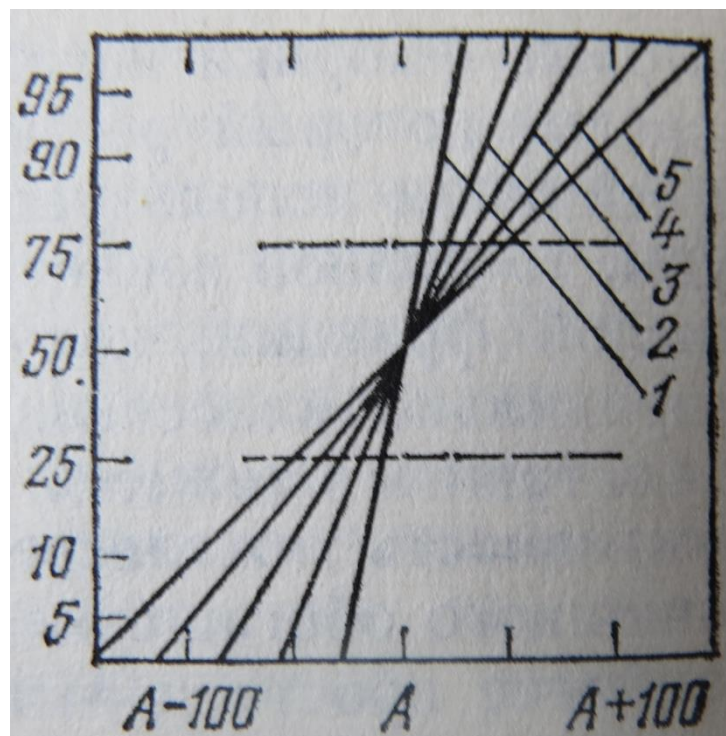


Рисунок 4.8 – Сімейство кривих E_p :
1-5 – при E_p , що дорівнює відповідно 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6

Можливості промислового використання важкосередовищного збагачення надзвичайно широкі та перспективні. Воно, разом з відсадкою, є одним з двох найбільш важливих методів сепарації вугілля. Більше того, зазвичай саме важкосередовищна сепарація виявляється набагато ефективнішою, але її підвищена у порівнянні з відсадкою вартість обумовлює використання цього способу в основному для збагачення крупношматкового вугілля із значним вмістом матеріалу близької густини, а також для отримання низькозольного металургійного вугілля.

За допомогою важкосередовищної сепарації переробляється широкий діапазон металевих руд та інших промислових мінералів. Це залізні, свинцево-цинкові сульфідні, олов'яні, вольфрамові руди, а також алмази, андалузит, барит, магнетит, флюорит, гіпс, хроміт, сподумен, калійні мінерали тощо.

Переробку залізних руд можна вважати найголовнішим застосування важкосередовищного методу збагачення для неугільної сировини (до половини усіх обсягів її переробки, особливо у США). Для цього використовується обладнання як статичної, так і динамічної дії, але найбільше розповсюдження отримала така цікава технологія, як процес Стріпу, запропонований свого часу у Швеції. Призначений для збагачення залізних руд крупністю від 6 до 75 мм, а також мідних та хромітових руд, він суттєво відрізняється від усіх інших важкосередовищних процесів більш високою густиною розділення з використанням мокрої рухомої постелі піску у порівнянні із суспензією. Унікальність процесу забезпечується використанням в ньому сучасних вібраційних технологій, які останнім часом завоювали і продовжують завойовувати нові галузі промисловості. Схема процесу, що відбувається у вібраційному жолобі, показана на рис. 4.9 [6,8].

У разі збагачення залізної руди живлення з вмістом твердого біля 50% (за об'ємом) і густиною 2150 кг/м^3 подається з конусу 9, який виконує ролі згущувача та проміжної ємності для середовища, що готується із залізного концентрату, який містить 15% класу +2 мм і 3% класу -0,1 мм. У віброжолобі 13 середовище тієї ж крупності, що й пісок, швидко осаджується у вигляді товстої постелі 3 густиною 2950 кг/м^3 (важка фракція), а решта середовища спливає вище останньої в якості суспензії 2 (легка фракція). Живильна пластина 4 розподіляє руду упоперек

ширини віброжолобу. Нижній і верхній шари матеріалу (відповідно важка і легка фракції) транспортуються зі швидкостями приблизно 0,1 і 0,5 м/с відповідно. Дно жолобу перфоровано і розділено на декілька секцій по довжині, кожна з яких має свою окремо контрольовану подачу води. Більша частина води подається у живильному кінці жолобу, менша – у розвантажувальному. Із збільшенням подачі води швидкість руху постелі зростає, а її товщина зменшується. Крім того, вода вимиває більш тонкі частинки з постелі у шар суспензії, зменшуючи тим самим в'язкість останньої, внаслідок чого розділення відбувається швидше.

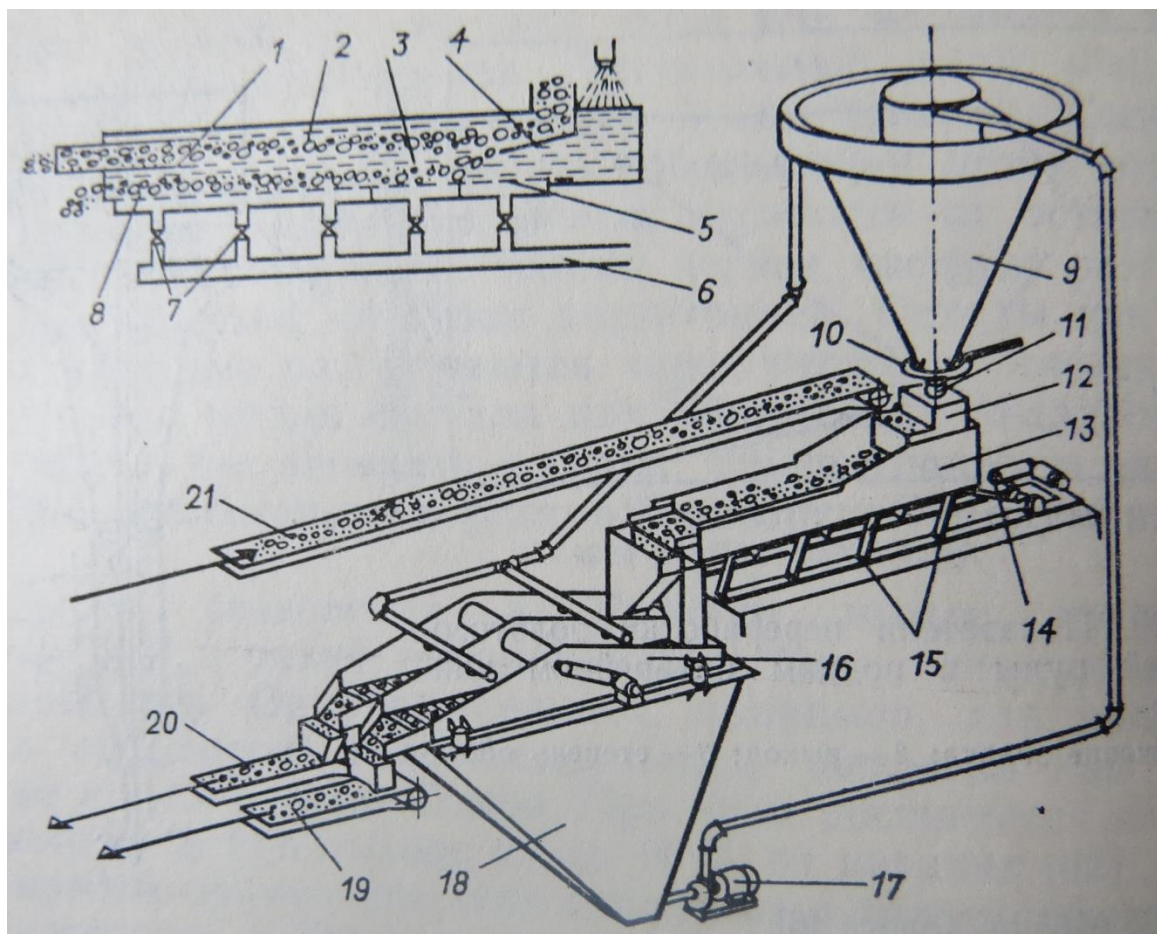


Рисунок 4.9 – Схема процесу Стріпу для важкосередовищного збагачення руд:
 1 – роздільна перегородка; 2 – шар суспензії; 3 – постіль; 4 – пластина для подачі живлення; 5 – камера для води; 6 – магістраль для води; 7 – клапани для суспензії;
 8 – пластина на днищі; 9 – згущувальний конус; 10 – вода для розбавлення;
 11 – контролюючий клапан; 12 – камера живлення; 13 – віброжолоб;
 14 – ексцентриковий вал; 15 – пружні стрижні; 16 – промивальний грохот;
 17 – насос для середовища; 18 – зумпф середовища; 19 – конвеєр для важкої фракції; 20 – конвеєр для легкої фракції; 21 – конвеєр подачі живлення

На розвантажувальному кінці жолобу перегородка 1 розділяє постіль на важку і легку частини. Продукти розділення дренуються і промиваються на грохоті 16 зливом конусу. Обважнювач насосом 17 спрямовується назад у конус.

4.3 Відсаджувальні машини

Для механізації процесу відсадки розроблена велика кількість типів відсаджувальних машин. Вони розрізняються, перш за все, за наступними особливостями:

- за методом ефективного розширення постелі – ті, в яких оброблюваний матеріал рухається крізь воду (з рухомим решетом); ті, в яких вода рухається крізь матеріал (з нерухомим решетом). Останні конструкції можна розділити за способом передачі руху воді: поршневі, діафрагмові, з пульсуючим клапаном (повітряно-золотникові) тощо;

- за способом видалення важкого продукту – ті, в яких основна частина важкого продукту утримується на решеті і постійно розвантажується за допомогою того чи іншого спеціального механізму; ті, в яких важкий продукт проходить через решето, на якому є штучна постіль з важкого матеріалу, крупнішого за розміри отворів решета;

- за густиною цінного компоненту – для переробки мінеральної сировини, в якій цінний компонент важче породи; для сировини з корисним компонентом, якій легше породи (наприклад, вугілля).

На рис. 4.10 приведені основні принципові схеми відсаджувальних машини гідравлічного типу [6].

Машини з рухомим решетом обмежено використовуються для переробки бідних сульфідних та марганцевих руд і поступово витісняються конструкціями з нерухомим решетом. З останніх найбільше розповсюдження отримали діафрагмові та повітряно-золотникові установки.

Усі відсаджувальні машини характеризуються певними конструктивними та експлуатаційними параметрами, які визначаються типом установки та факторами,

що залежать від конкретних умов роботи обладнання. Перші з них є постійними, а другі – змінними. У табл. 4.3 приведені основні з них.

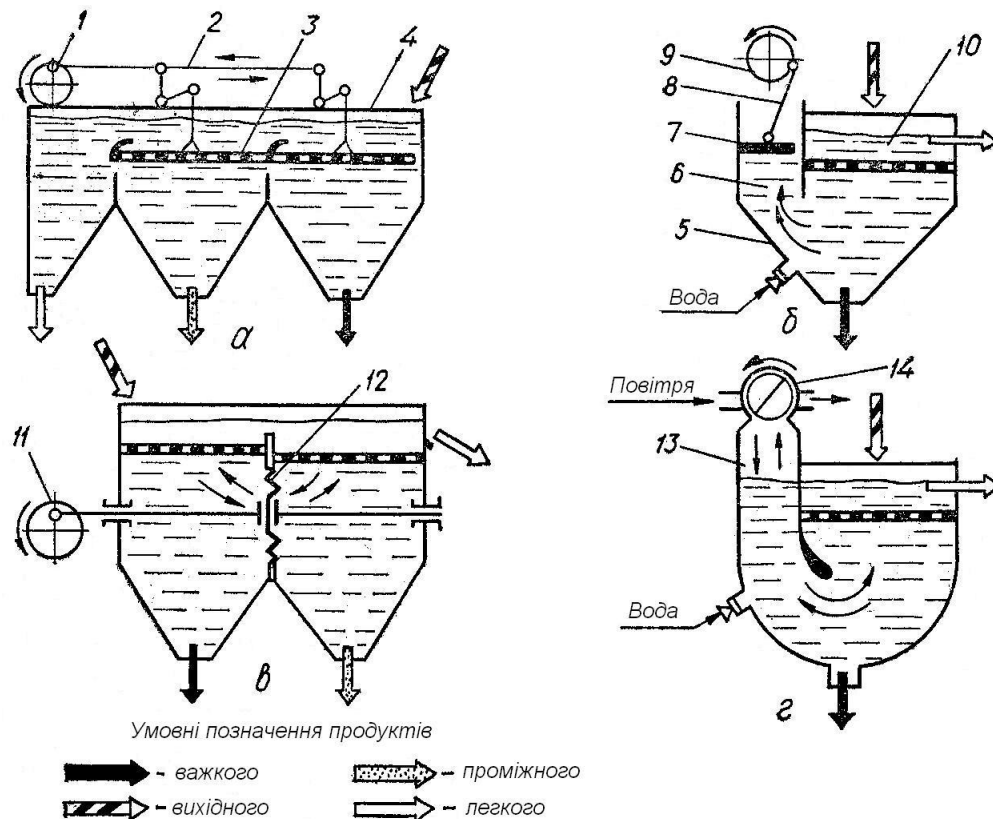


Рисунок 4.10 – Основні принципові схеми гідравлічних відсаджувальних машини: а – з рухомим решетом; б – поршнева; в – діафрагмова; г – повітряно-золотникова

- 1 – кривошипно-шатунний механізм; 2 – система важелів; 3 – решето;
 4, 5 – корпус; 6 – поршневе відділення; 7 – поршень; 8 – шток;
 9, 11 – ексцентриковий привод; 10 – робоче відділення; 12 – еластична діафрагма; 13 – повітряне відділення; 14 – золотниковий пульсатор

Таблиця 4.3 – Параметри типових відсаджувальних машин

Об'єкти обладнання	Найменування параметрів	
	Постійних (конструктивних)	Змінних (експлуатаційних)
Хід	Модель циклу	Довжина, частота
Відсаджувальна постіль	-	Глибина (внутрішні межі)
Дроблена руда	-	Глибина, густина, крупність
Решето	Отвори	-
Концентрат	Спосіб видалення	Швидкість видалення

Відсаджувальні машини, як і будь-яке інше збагачувальне обладнання, повинні забезпечити дві послідовно виконувані функції:

- первинну – розшарування матеріалу. На неї впливає хід виконавчого органу машини (поршню, діафрагми), який задається компонентами моделі циклу – амплітудою та частотою, що зазвичай є взаємопов'язаними параметрами;
- вторинну – розділення утворених шарів на окремі продукти.

Важливе значення має підготовка живлення, адже практично усе збагачувальне обладнання працює при цьому більш ефективно. З огляду на те, що відсадку в основному застосовують для попереднього збагачення бідних руд, підготовка живлення у більшості випадків полягає лише у видаленні частинок великої крупності та сортуванні у низьконапірних циклонах дріб'язку і шламів.

Що стосується продуктивності відсадки, то, з одного боку, вона визначається здатністю і швидкістю потоку нести тверду фазу через відсаджувальну постіль, а, з іншого, при цьому повинно забезпечуватися прийнятна величина вилучення, тобто кількість і якість мають бути максимально узгоджені. Продуктивність відсадки залежить від двох величин: ширини відсаджувального решета, яка важлива саме з точки зору продуктивності, та його довжини, яка визначає вилучення. Тому продуктивність виражається у тоннах на одиницю площі решета за одиницю часу, адже площа одночасно враховує обидва ці параметри. Зазвичай продуктивність відсаджувальних машин складає $30-60 \text{ т}/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$ (тонн за годину на 1 м^2 площі решета).

З усіх апаратів гравітаційного збагачення відсаджувальні машини забезпечують найбільші обсяги переробки мінеральної сировини, але їхня недостатня вивченість та непередбачуваність змушує вдаватися до промислової експлуатації такого обладнання, заснованої на емпіричному досвіді. Утім, слід відзначити, що у цілому відсадка працює досить ефективно навіть без більш-менш повного розуміння теорії її дії.

Відсаджувальні машини здатні переробляти матеріал широкого діапазону крупності (від 0,1 до 200 мм), що вигідно відрізняє їх від будь-якого іншого гравітаційного обладнання. На вітчизняних теренах вони широко використовуються

для переробки різних руд, у тому числі марганцевих, олово- та золотовмісних, рідше – залізних.

4.4 Обладнання для гравітаційного збагачення у тонкому шарі води

4.4.1 Стационарні та звужувальні шлюзи

Стационарний шлюз представляє собою найпростішу конструкцію у вигляді похилого лотку (жолобу) прямокутного перетину з рифлями (трафаретами) на днищі, в якому живлення з частинками великого діапазону крупності промивається великим об'ємом води (рис. 4.11). Такі апарати використовуються для попередньої концентрації тонких важких частинок, що осідають між рядами рифлів і затримуються там. В основному вони призначені для переробки розсипного золота. Витрата води, нахил та розмір жолобу регулюються таким чином, щоб камені і галька котилися водою поверх рифлів, а пісок осідав у проміжках між ними.

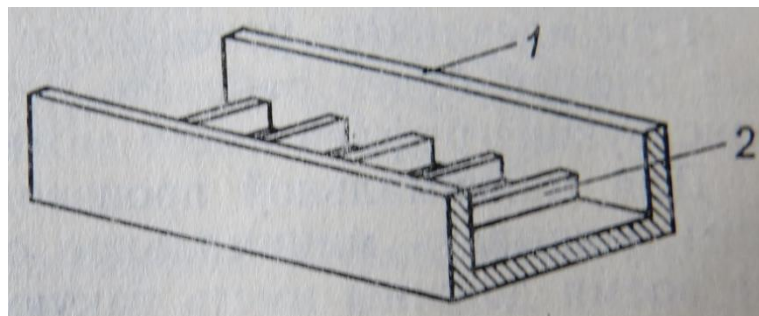


Рисунок 4.11 – Поперечний перетин найпростішого стационарного шлюзу

Більш сучасними різновидами таких конструкцій є стрічкові та вібраційні пристрої. Перший з них має вигляд похилої рухомої нескінченної стрічки з поперечними рифлями, яка рухається нагору. Пульпа подається на стрічку і під дією сили тяжіння стікає вниз, захоплюючи з собою легку фракцію, що розвантажується з нижнього барабану установки. Важка фракція осідає на стрічку розвантажується на верхньому барабані за допомогою змивної води. Робочий орган вібраційного шлюзу постачений трафаретами, які кріпляться до нього таким чином, що під час роботи установки вони вібрують і сприяють інтенсивному розпушенню постелі.

Робота шлюзу складається з двох основних циклів: живильного та очисного. Тривалість першого залежить від вмісту важкого мінералу у живленні, типу породи і самого шлюзу.

В цілому стаціонарні шлюзи є простим, дешевим, але відносно неефективним обладнанням, яке, утім, займає своє місце у збагачувальній промисловості.

Суттєво більш досконалим типом подібних пристроїв є звужувальні конструкції. Принципова схема звужувального жолобу (шлюзу) показана на рис. 4.12 [6]. Вони принципово відрізняються від звичайних шлюзів гладким дном жолобу (рифлі відсутні) та способом виділення концентрату. Тут він відбирається безупинно на заокругленому розвантажувальному кінці жолобу за рахунок підвищення в декілька разів глибини потоку пульпи в міру звуження шлюзу. Завдяки цьому змінюється характеру його руху з ламінарного на турбулентний і матеріал розширюється по висоті на фракції за густиною. В нижніх шарах потоку зосереджуються зерна більшої густини, у верхніх – меншої.

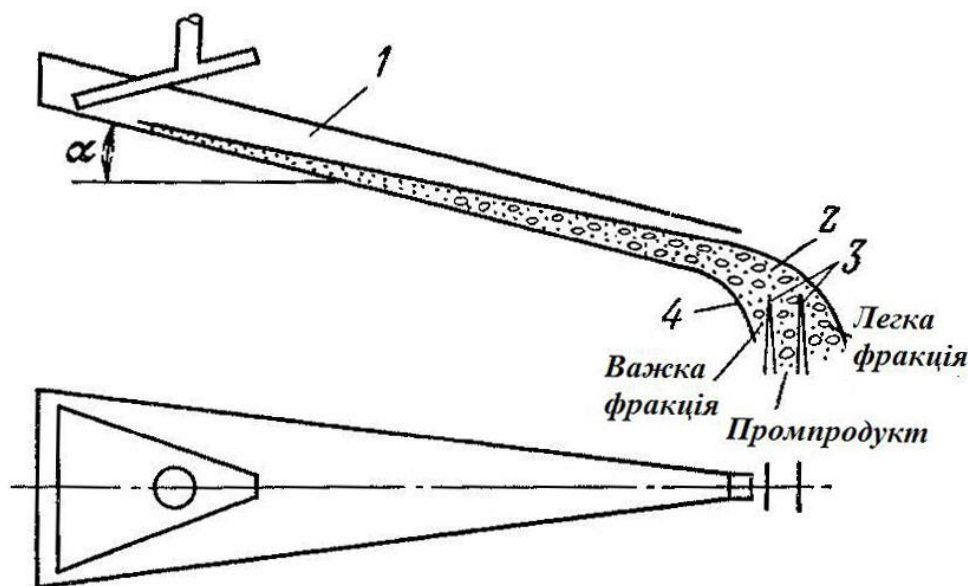


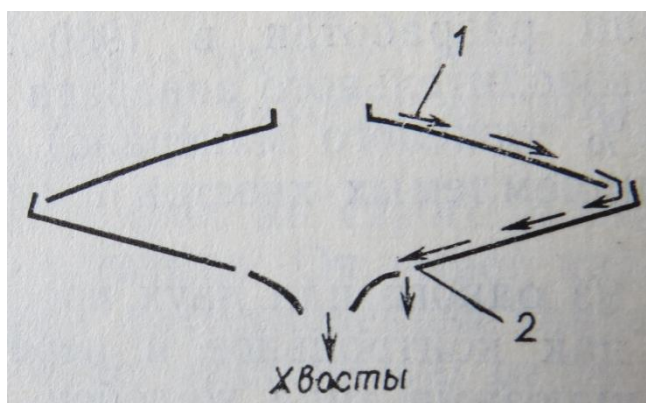
Рисунок 4.12 – Схема звужувального жолобу (шлюзу):

1 – жолоб; 2 – віяло пульпи; 3 – роздільники; 4 – закруглення дна жолобу

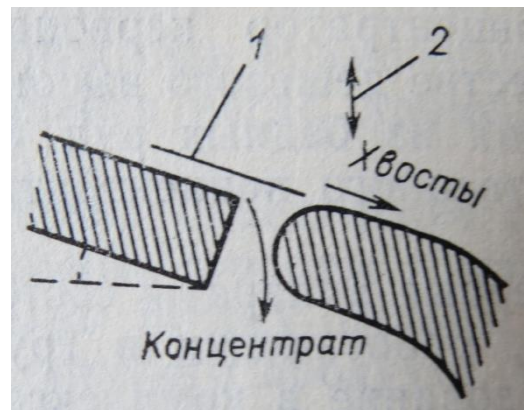
Для підвищення продуктивності звужувальні жолоби можуть компонуватися у набори різної конфігурації, наприклад каскадного типу, як це використовується в конструкціях струминних концентраторів [6]. Але при цьому залишається

головний недолік такої конструкції – наявність бічних стінок шлюзу, які перешкоджають процесу розшарування потоку.

Для подолання цього недоліку свого часу в Австралії була запропонована конструкція конусного сепаратора (концентратора) Рейхерта [8]. Основним елементом конусу Рейхерта є конусний агрегат з постійним кутом нахилу 17° , нижня частина якого в плані представляє собою набір радіально встановлених звужувальних жолобів із загальним днищем (жолоби розташовані по колу і примикають один до іншого), але без бічних стінок (рис. 4.13а). Живлення рівномірно поступає по усій конусній поверхні верхньої частини агрегату і потрапляє у ці жолоби. В районі кільцевої щілини 2 для видалення концентрату глибина потоку пульпи збільшується учетверо. Схема дії щілини пояснюється на рис. 4.13б.



а



б

Рисунок 4.13 – Основний елемент (конусний агрегат) конусу Рейхерта:
а – схема агрегату (1 – живлення; 2 – щілина для видалення концентрату);
б – схема дії щілини (1 – верхній струмінь; 2 – регулювання щілини)

Конусний сепаратор може складатися з одного, двох або декількох конусних агрегатів, згрупованих у «стадії», що складаються з подвійного конусного елемента D, змонтованого під одним або двома одинарними конусами S, як це показано, наприклад, на рис. 4.14а. Концентрати кожного елемента повторно переробляють на наступних поверхнях, а хвости кожного елемента об'єднують для подальшої переробки на новій нижній стадії. Конусні елементи можна об'єднати у різні конфігурації (Рейхертом запропоновано 35 моделей), але в промисловості

використовують лише дві схеми: 4DS (рис. 4.14б) і 2DSS-DS (рис. 4.14в). Перша виробляє бідні хвости з високим вилученням важких мінералів при зменшеному ступені збагачення концентратного продукту, а друга – відносно високоякісний концентрат при дещо зменшеному вилученні.

4.4.2 Гвинтові сепаратори

Схема гвинтового сепаратора приведена на рис. 4.15 [6].

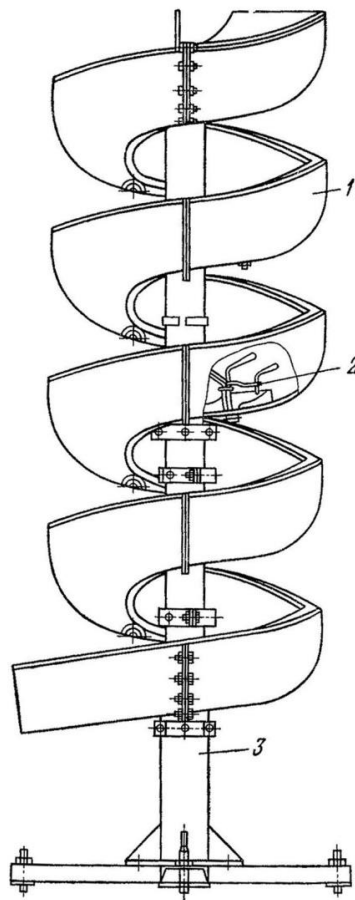


Рисунок 4.15 – Гвинтовий сепаратор:

1 – гвинтовий жолоб; 2 – відсікач важкої фракції; 3 – станина

Апарат складається із декількох секцій-піввитків, що утворюють гвинтоподібний жолоб 1 з гладким покриттям, який закручується навколо вертикальної осі, закріпленої на станині 3. Під час стікання по жолобу пульпи, яка завантажується у верхній частині сепаратора, вона розшаровується за густиною під впливом відцентрової сили. Важкі частинки розвантажуються через спеціальні відсікачі 2, а

легкі – в нижній частині жолобу. Одна з можливих форм поперечного перетину останнього та характер розділення в ньому частинок різної густини були показані вище, на рис. 3.13. Відношення кроку витків жолобу до його діаметру – 0,4-0,6.

Процес збагачення у гвинтових сепараторах відбувається під впливом комплексу різних механізмів. Окрім поперечної циркуляції потоку, спричиненої дією відцентрової сили, мають місце також процеси класифікації при стисненому осадженні, просмоктування у проміжках та вертикального зсуву Багнольда. Але, незважаючи на його багатофакторність, гвинтові сепаратори залишаються достатньо простим обладнанням і під час експлуатації вимагають лише забезпечення постійних величин швидкості та густини пульпи.

Численні дослідження, проведені свого часу в різних країнах, були присвячені пошуку найбільш оптимальних профілів поперечного перетину жолобів гвинтових сепараторів, які б забезпечували найкращу ефективність процесу збагачення. На рис. 4.16 показаний вплив профілю (а) поперечного перетину жолобу гвинтового сепаратора на показники збагачення (б). За їхніми результатами зроблено висновок, що оптимальним можна вважати профіль, близький до еліпсу із співвідношенням осей 2:1 (профіль і крива 1).

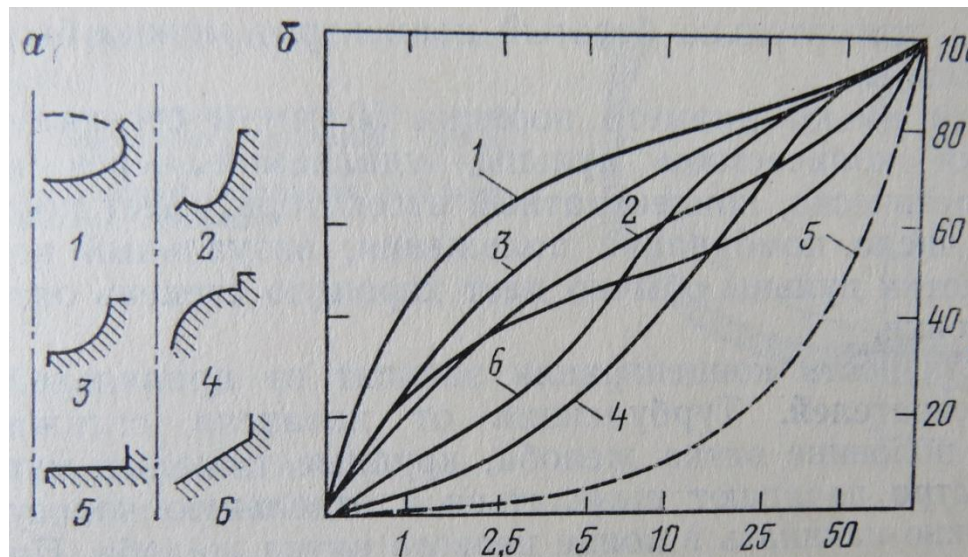


Рисунок 4.16 – Вплив профілю (а) поперечного перетину жолобу гвинтового сепаратора на показники збагачення (б): штрих-пунктирна лінія – відсутність збагачення; 1-5 – відповідні профілі

Виявлена також залежність діаметру жолобу від крупності частинок, яка показала, що тонкий матеріал (0,05-0,2 мм) краще концентрується при малому діаметрі (400-500 мм), а крупні частинки – на конструкціях діаметром 1000-1500 мм. Ефективність процесу концентрації залежить від правильності установки відсікачів. Турбулентність потоку під час завантаження жолобу, викликана живильником, в основному згладжується у першій половині витка жолобу і крупні важкі частинки мінералів швидко починають виділятися в окрему смугу. Тому видалення концентрату можна починати у кінці першого витка жолобу.

Хороші результати вилучення можна отримати для матеріалів з розмірами частинок більше 50 мкм. На рис. 4.17 приведені показники гвинтової сепарації для різних матеріалів.

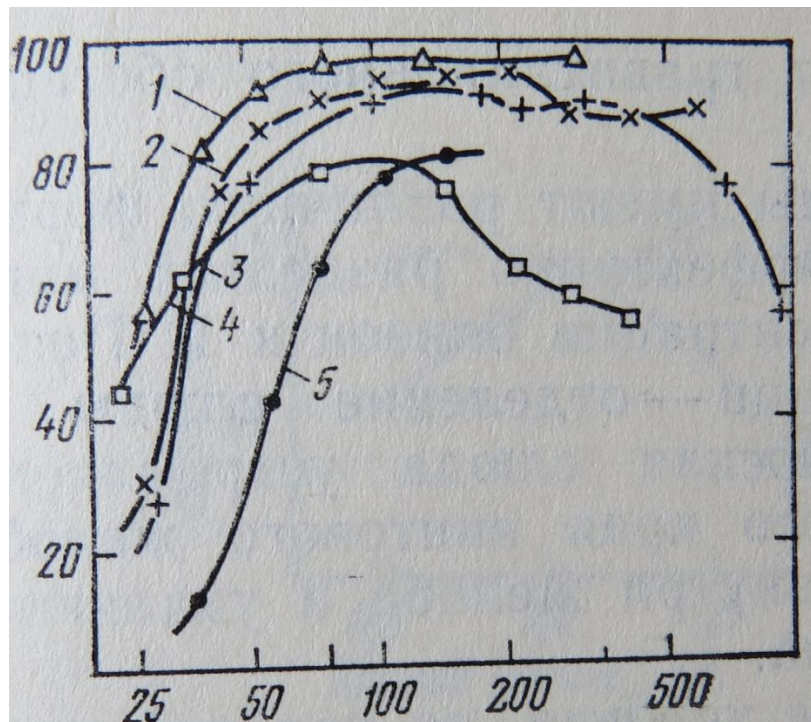


Рисунок 4.17 – Показники гвинтової сепарації для різних матеріалів:
1 – пірит; 2 – шеєліт; 3 – каситерит; 4 – танталіт; 5 – залізна руда

Основні галузі використання гвинтових сепараторів – збагачення залізної руди, мінеральних пісків, оксидів металів, вугілля. Величина вилучення на залізорудних фабриках зазвичай досягає 80-85%.

4.4.3 Концентраційні столи

Розглянуто вище обладнання для сепарації у тонкому шарі води характеризується компактністю, високої продуктивністю та невеликою вартістю і дуже добре підходить для попереднього збагачення бідних руд або для переробки малоцінних мінералів, коли тонкі частинки вилучаються іншими способами чи просто видаляються у хвости без переробки.

На відміну від нього, концентраційні столи не відрізняються ані малими розмірами, ані можливостями забезпечення значних обсягів сепарації. Проте вони зарекомендували себе одним з найефективніших типів збагачувальних апаратів, здатних переробляти матеріали дуже широкого діапазону крупності з високим вилученням та ступенем збагачення.

Типовий концентраційний стіл має робочий орган (деку) (рис. 4.18), на який збоку поступає живлення із завантажувального пристрою і змивна вода (див. на задньому плані деки). Стіл трохи нахилений у напрямках зліва-направо і від завантаження до спостерігача (для полегшення руху змивної води). За допомогою приводу він коливається у поздовжньому напрямку в режимі повільного прямого ходу і швидкого зворотного. Завдяки цьому мінеральні частинки розвертаються у вигляді віяла упоперек деки, як це було показано на рис. 3.11 і 3.12.

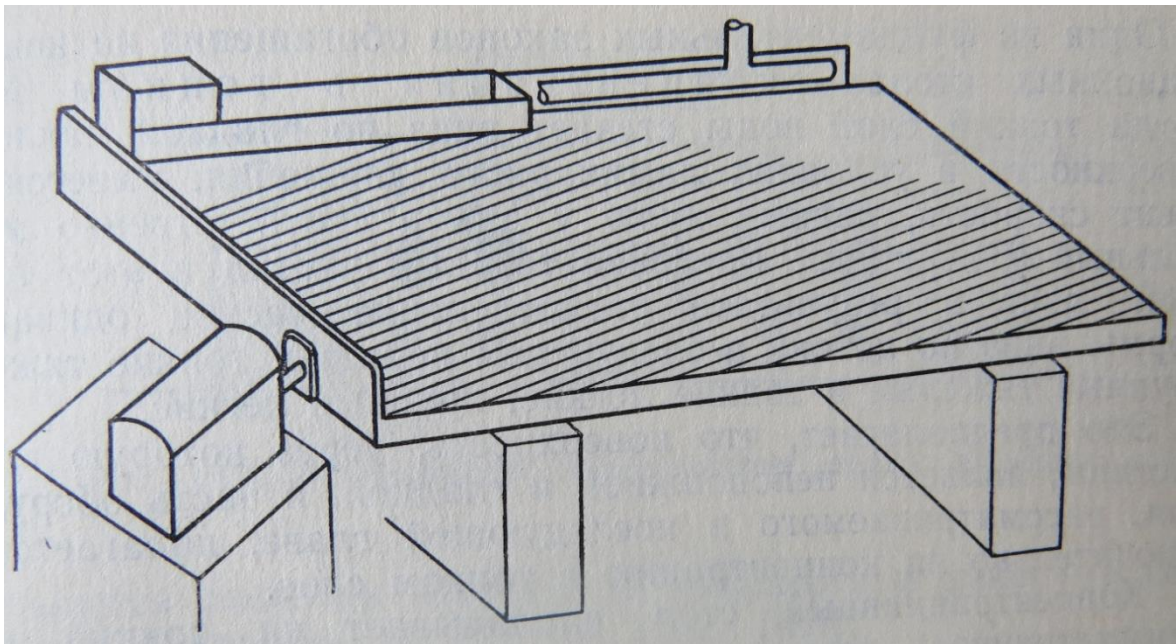


Рисунок 4.18 – Схема типового концентраційного стола

Концентраційні столи використовують як для переробки металовмісних руд, так і вугілля. Для різних умов експлуатації застосовують деякі різних розмірів з рифлями різної форми. Деякі також мають дві основні форми: прямокутну і діагональну. На рис. 4.19 показана схема для їхнього порівняння.

Корисна площа деяки, що фактично зайнята рудою, має форму смуги від живильного кінця до концентраційного (від заднього до правого на рис. 4.18) або форму площі, зайнятої рифлями, яка для прямокутної деяки дорівнює площі $ABDE$. Концентрат при цьому випускається між точками C і D .

Для діагональної деяки площа, зайнята рифлями – $HBFG$, тобто додаткова робоча площа BFJ рифлів забезпечує підвищення загальної робочої площі приблизно на 40%. Концентрат у даному випадку розвантажується між точками D і F . Таким чином, діагональна дека дає більшу продуктивність, забезпечує вихід високоякісного концентрату на широкій смугі, знижує вихід промпродукту, дозволяє застосовувати дрібніші рифлі і вилучати тонкі частинки матеріалу.

Для підвищення продуктивності, економії робочого простору та віброізоляції столи можуть бути багатоденними і або встановлюватися на спеціальних бетонних фундаментах, або підвішуватися до верхніх несучих конструкцій, що також спираються на відповідні фундаменти.

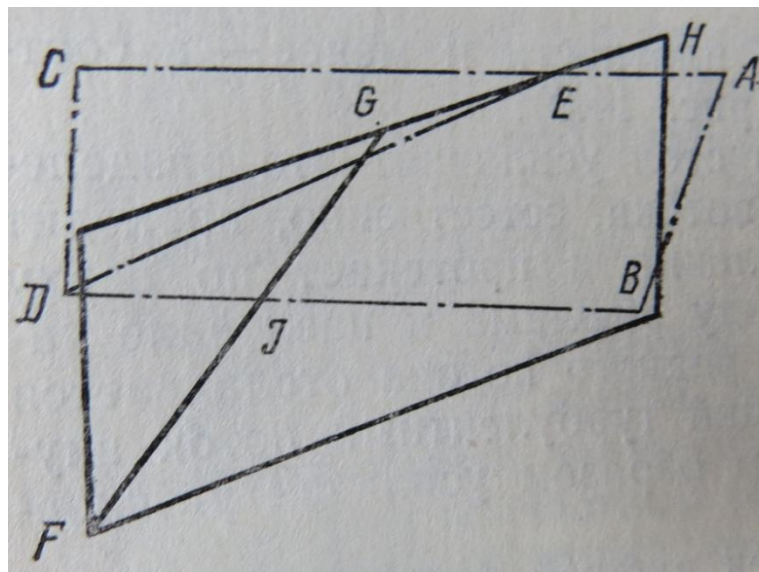


Рисунок 4.19 – Схема порівняння ефективних концентраційних площ на прямокутній та діагональній деках

Модифіковані концентраційні столи можуть мати пористу деку, через яку між рифлями подається пульсуюча у вертикальному напрямку вода. Завдяки цьому отримують комбіновану обробку сировини, в якій присутній режим почергового розпушення та ущільнення шару постелі, як це відбувається під час відсадки. В результаті утричі зростає продуктивність стола внаслідок прискорення процесів розшарування матеріалу та просування його декою.

В цілому слід зауважити, що незважаючи на доволі низьку продуктивність у порівнянні з іншим сучасним гравітаційним збагачувальним обладнанням, концентраційні столи характеризуються високим рівнем ефективності і забезпечують отримання протягом одного циклу високоякісного концентрату і бідних хвостів у дуже широкому діапазоні крупності частинок.

4.4.4 Обладнання для вилучення тонкого матеріалу

У п. 3.2 даної роботи вже говорилося про проблеми, що виникають під час гравітаційного збагачення тонкоподрібненої сировини. З одного боку, цей процес зустрічається з певними труднощами, пов'язаними із суттєвим зменшенням ефективності вилучення тонкого матеріалу та підвищенням його вартості, а з іншого – стає все більше затребуваним в умовах глобального погіршення якості руд у зв'язку з вичерпуванням запасів багатой сировини і необхідністю розробки бідних покладів.

Описана картина дуже добре ілюструється сучасною ситуацією, що склалася у світовій залізорудній промисловості. Практично усюди спостерігається тенденція масового переходу до розробки так називаних залізистих кварцитів (таконітів в американській термінології). Це бідні руди, які характеризуються у найкращому варіанті вмістом заліза 30-40% (в США вони ще бідніші – 15-20%). Але це ще не все. Окрім необхідності здійснення глибокого збагачення такої сировини, галузь стикається з додатковими проблемами її підготовки до сепарації. Справа у тім, що частинки заліза у цій руді настільки дрібні, що для їхнього визволення (відділення від порожніх порід) сировину потрібно подрібнювати до практично пилоподібного стану – до розмірів частинок не більше 0,074 мм. З одного боку, це

вимагає багатостадійних процесів дроблення і помелу, а з іншого – після цього в процесі збагачення доведеться мати справу з настільки дрібним матеріалом. Тому, коли мова йде про гравітаційне збагачення тонкого матеріалу, під ним розуміють сировину, частинки якої мають розміри менше 75 мкм.

Труднощі вилучення дуже тонких частинок спонукають розвиток механічного обладнання (концентраторів) для його здійснення. Останнє можна розділити на два основні класи: стаціонарне та з рухомою постіллю.

Перша група (концентратори з нерухомою декою) характеризуються збільшенням швидкості руху тонкого шару рідини по плоскій поверхні в міру зростання відстані від неї. Саме завдяки цій закономірності відбувається процес концентрації у тонкому потоці. Зсувне зусилля Багнольда в нерухомих концентраторах повністю залежить від потоку.

Друга група відрізняється рухомістю деки, при якій величина зсувного зусилля може значно зрости навіть при малому куті нахилу деки і невеликій швидкості руху пульпи. Зусилля зсуву, що повідомляється деці, може забезпечуватися у трьох різних режимах:

- періодичного зсуву, що відбувається у площині деки і підтримує процес розділення пульпи, внаслідок якого важкі частинки опускаються на поверхню робочого органу. Такий режим використовується в апаратах, що називаються ванерами і мають в якості робочого органу нескінчену стрічку з повільним постійним рухом: стрічка час від часу за допомогою віброзбудника піддається поперечному зсуву;

- постійного зсуву в одному напрямку, який може бути результатом значного руху, поздовжнього відносно поверхні робочого органу в напрямку, протилежному потоку пульпи, або поперечному потоку. Прикладом такої конструкції може служити концентратор Джонсон Барел, який отримав широке розповсюдження у Південній Африці для гравітаційної обробки золотовмісних пісків (рис. 4.20) [8]. Апарат представляє собою барабан з похилою під кутом $2,5-5^\circ$ віссю, довжиною 36 м і діаметром 0,75 м, внутрішня поверхня якого покрита гумою з рифлями зубчастого профілю. Пульпа з патрубку подачі живлення 3 тече вниз по довжині ба-

рабану і важкі мінерали осідають на рифлі 5. Обертання барабану викликає безупинний бічний зсув зі швидкістю 0,2-0,6 м/хв. і не дозволяє важким мінералам осаджуватися у потоці пульпи, що виходить з апарату – вони вимиваються у концентратний жолоб 2 водяними струменями з труби 1;

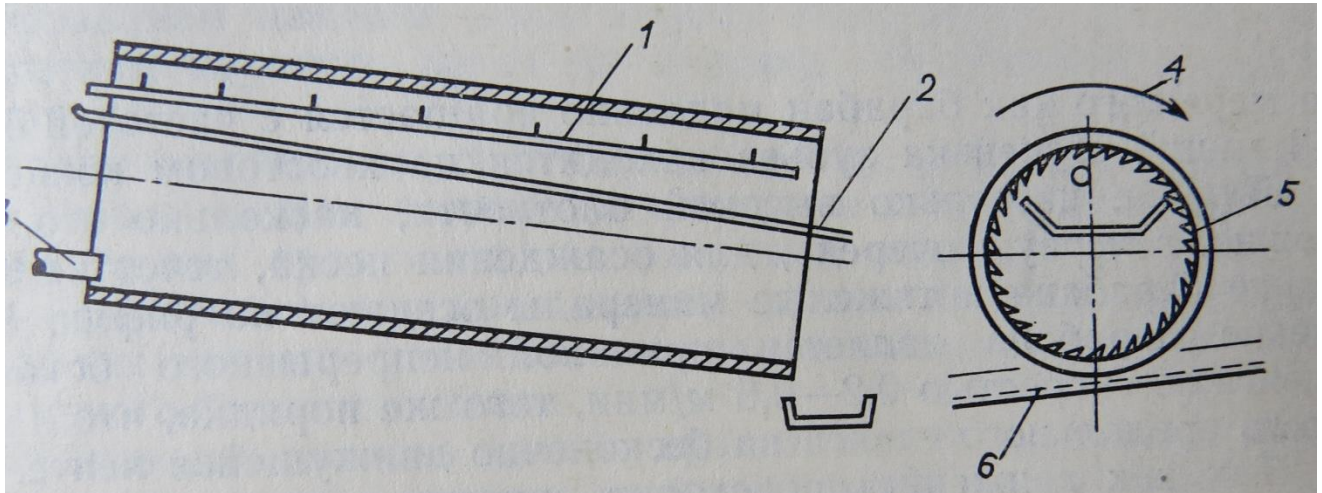


Рисунок 4.20 – Схема концентратора Джонсон Барел:

1 – труба подачі змивної води; 2 – жолоб для концентрату; 3 – патрубок подачі живлення; 4 – напрямок обертання; 5 – рифлі; 6 – жолоб для хвостів

- орбітального зсуву, згенерованого на поверхні робочого органу концентратора шляхом контрольованого обертання зовнішніх збалансованих мас в площині цієї поверхні. Цей режим виявився найбільш ефективним для вилучення дуже тонких частинок крупністю 5-20 мкм. Він використовується у коливному гвинтовому сепараторі (спіральний жолоб з прямокутним поперечним перетином, який підвішений на пружинах і коливається за допомогою зовнішнього балансиру, що обертається навколо центральної осі жолобу) та в згаданих вище (див. п. 3.2, рис. 3.14, 3.15 і 3.16) сепараторі Бартлез-Мозлі і концентраторі Бартлез-Кросбелт. Ступінь передачі зсувного зусилля, незалежно від того, створюється воно обертанням орбітальних мас чи зсувною і коливною діями, забезпечує основний вплив на роботу машини. Зокрема, збільшення швидкості зсуву значно підвищує ступінь збагачення внаслідок кращого розшарування матеріалу, що дозволяє більш ефективно видаляти частинки порожньої породи.

Сепаратор Бартлез-Мозлі і концентратор Бартлез-Кросбелт широко використовуються на багатьох тонкогравітаційних фабриках для переробки різноманітної мінеральної сировини в усьому світі.

4.5 Роль гравітаційних методів збагачення в процесах переробки залізних руд

Окрім вугільної промисловості, найбільше розповсюдження гравітаційних технологій збагачення спостерігається на підприємствах з переробки залізорудної сировини. Різні види залізних руд в залежності від мінералогічного складу та вмісту заліза потребують різних способів збагачення (звісно, не враховуючи природно-багатих, які вважаються товарним продуктом у тому вигляді, в якому вони були видобуті).

Гравітаційна технологія – один з основних збагачувальних процесів, що використовується для переробки бідних руд. Більшість гравітаційних процесів можуть бути застосовані при цьому, хоча з причини масового виробництва перевага віддається лише високопродуктивному обладнанню. Внаслідок цього спостерігаються суттєві втрати дріб'язку (нижня межа становить 50 мкм), адже гравітаційне обладнання для шламів не спроможне переробляти їх у великих обсягах. Якщо потрібно вилучення ультратонких частинок, то гравітаційне збагачення комбінують з іншими процесами.

Важкосередовищна сепарація застосовується для збагачення бідних залізних руд або в якості самостійного методу, або сумісно з іншим гравітаційним способом чи з магнітною сепарацією. Обладнання для збагачення крупного матеріалу – статичні барабанні сепаратори, для тонкого – динамічні конструкції (циклони).

Одними з найбільш застосовуваних апаратів для гравітаційного збагачення залізних руд є гвинтові сепаратори. Вони можуть використовуватися як для переробки матеріалу після важкосередовищної сепарації, так і для концентрації в якості єдиного методу збагачення.

Конуси Рейхерта ідеально підходять для збагачення деяких типів залізних руд. Вони прості в обслуговуванні і забезпечують при цьому дуже високу проду-

ктивність при низьких капітальних та експлуатаційних витратах. В деяких випадках застосовуються в комбінаціях з гвинтовими або магнітними сепараторами.

Процеси відсадки не мають помітного застосування під час збагачення залізної сировини, хоча подекуди вони працюють у комплексному циклі з магнітною та важкосередовищною сепарацією, а також з гвинтовими сепараторами.

Висновки:

- якісні результати процесів гравітаційного збагачення мінеральної сировини не в останню чергу залежать від правильної підготовки живлення сепараційного обладнання. Обов'язковість виконання операцій дроблення, подрібнення та класифікації вихідного матеріалу не викликає жодних сумнівів, адже він має бути належним чином підготовлений до розділення за густиною і розміром зерен. Для гідравлічної класифікації сировини рекомендується використовувати обладнання динамічного типу (у першу чергу гідроциклони), яке дозволяє суттєво підвищити інтенсивність проведення операцій за рахунок дії відцентрових сил;

- одним з найбільш поширених класів гравітаційного обладнання є важкосередовищне, яке використовується під час переробки вугілля та металевих руд, у першу чергу залізних. Для підвищення продуктивності важкосередовищних сепараторів та можливості переробляти дрібний матеріал також слід віддавати перевагу обладнанню відцентрового типу та комбінованим установкам, що додатково використовують інші методи збагачення, а також вібраційні ефекти (наприклад, як це відбувається в агрегатах, працюючих за способом Стріпу);

- що стосується відсаджувальних машин, то з усіх апаратів гравітаційного збагачення вони забезпечують найбільші обсяги переробки мінеральної сировини, перш за все завдяки здатності працювати з матеріалом широкого діапазону крупності (від 0,1 до 200 мм). Це пояснює широке використання відсадки для переробки різних руд, у тому числі марганцевих, олово- та золотовмісних. Для залізних руд картина виглядає не так оптимістично – застосування відсаджувальних апаратів можна побачити здебільшого у комплексі з магнітною та важкосередовищною сепарацією, а також з гвинтовими сепараторами;

- нарешті, слід відзначити надзвичайно велику роль у галузі гравітаційного збагачення різноманітної мінеральної сировини численного класу апаратів для сепарації у тонкому шарі води. Насамперед, це стаціонарні та звужувальні шлюзи, сепаратори гвинтового типу, концентраційні столи та обладнання для вилучення тонкого і надтонкого матеріалу. Звання найбільш ефективних з них заслуговують конструкції сепараторів і концентраторів з рухомою декою (моделі Джонсон Барел, Бартлез-Мозлі, Бартлет-Кросбелт), а також батарейні конструкції на базі звужувальних жолобів (наприклад, конус Рейхерта).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведені під час виконання представленої магістерської роботи дослідження дали можливість сформулювати наступні висновки та практичні рекомендації:

- сучасна світова гірничозбагачувальна галузь характеризується широким використанням методів гравітаційної сепарації для переробки різноманітної мінеральної сировини. Для цього створюється та впроваджується високопродуктивне, високоефективне, але дороге обладнання, яке забезпечує найкращі характеристики отримуваних продуктів;

- в результаті проведеного аналізу існуючих способів гравітаційного збагачення запропонована їх загальна класифікація, що ґрунтується на характері відносного переміщення частинок і зміни їх взаємного положення при цьому. Для кожного такого режиму існують відповідні типи сепараційного обладнання, яке забезпечує якісне розділення корисних компонентів та порожніх порід. Кожен з цих типів здатний переробляти матеріали певного діапазону крупності;

- вибір того чи іншого типу обладнання для виконання згаданих процесів гравітаційної сепарації залежить від багатьох факторів. Це потрібні показники роботи, крупність частинок, що підлягають розділенню, продуктивність машини чи апарату, очікувана ефективність, вартість агрегату, інші капітальні та експлуатаційні витрати;

- слід зауважити, що досі не існує повного наукового розуміння процесів гравітаційного збагачення, яке б давало їхню модель та математичний опис. Тому теоретичний аналіз та експериментальні дослідження у цій галузі так важливі та актуальні;

- усі відомі процеси гравітаційного збагачення можна розділити на дві основні групи за механізмом розділення частинок, що використовується при цьому: ті, що характеризуються рухом частинок у вертикальній площині під час сепарації в об'ємі пульпи; ті, що відносяться до руху частинок похилою площиною в процесі збагачення у тонкому шарі пульпи;

- до першої групи відноситься процес відсадки. Існують різні теорії, що намагаються пояснити фізику цього надзвичайно складного процесу, але жодна з них не спроможна самостійно й вичерпно описати його. Тому, під час оцінки ефективності використання того чи іншого відсаджувального обладнання потрібно виходити з розподілення частинок руди за мінеральним і гранулометричним складом, а також з вимог до якості кінцевих продуктів та бажаної ефективності розділення. Кожна така машина дозволяє у певному ступені регулювати процес розшарування частинок під час відсадки;

- що стосується режиму збагачення у тонкому шарі рідини, то тут потрібно розрізняти випадки, коли його товщина близька до розміру частинок і коли він суттєво більший. Вони відрізняються як величиною швидкості зсуву потоку, так і характеристиками його руху. У першому випадку це ламінарний рух моношару частинок похилою поверхнею, у другому – процес вертикального розшарування останніх під дією сили Багнольда, в результаті чого вони розподіляються за густиною і розмірами;

- для підвищення ефективності процесу сепарації матеріалів у тонкому шарі рідини використовуються режими збагачення, в яких діють додаткові фактори впливу на частинки мінеральної сировини. На концентраційних столах це асиметричний зворотно-поступальний рух робочого органу, що діє у перпендикулярному до потоку пульпи напрямку, та застосування рифлів, які створюють пульсуючу постіль і забезпечують можливість підвищення її глибини, а, значить, і продуктивності збагачення. На гвинтових сепараторах додатковий вплив на характер розділення компонентів потоку чинить відцентрова сила, яка створює відцентрове обертання потоку у поперечному напрямку, завдяки чому важкі і легкі мінеральні частинки розходяться у протилежних напрямках. Щодо теоретичного опису механізму гвинтової сепарації, то тут ситуація схожа з процесом відсадки: технологія збагачення на гвинтових пристроях досі базується лише на емпіричних даних, отриманих в результаті багаторічного досвіду експлуатації подібного гравітаційного обладнання;

- режим збагачення у тонкому шарі рідини, що тече похилою площиною,

використовується також у шламовому обладнанні, призначеному для вилучення дрібних частинок розміром 10-50 мкм. Найкращі результати у цьому класі збагачувальної техніки демонструють комплекси у складі сепаратора Бартлез-Мозлі в якості основного обладнання та концентратора Бартлез-Кросбелт для переочищення отриманого промпродукту, що дають можливість суттєво знизити мінімальну крупність вилучених частинок до 6 мкм;

- аналіз процесу важкосередовищної сепарації мінеральної сировини дозволив визначити номенклатуру та області використання важких суспензій, а також особливості регулювання їхніх основних властивостей;

- якісні результати процесів гравітаційного збагачення мінеральної сировини не в останню чергу залежать від правильної підготовки живлення сепараційного обладнання. Обов'язковість виконання операцій дроблення, подрібнення та класифікації вихідного матеріалу не викликає жодних сумнівів, адже він має бути належним чином підготовлений до розділення за густиною і розміром зерен. Для гідравлічної класифікації сировини рекомендується використовувати обладнання динамічного типу (у першу чергу гідроциклони), яке дозволяє суттєво підвищити інтенсивність проведення операцій за рахунок дії відцентрових сил;

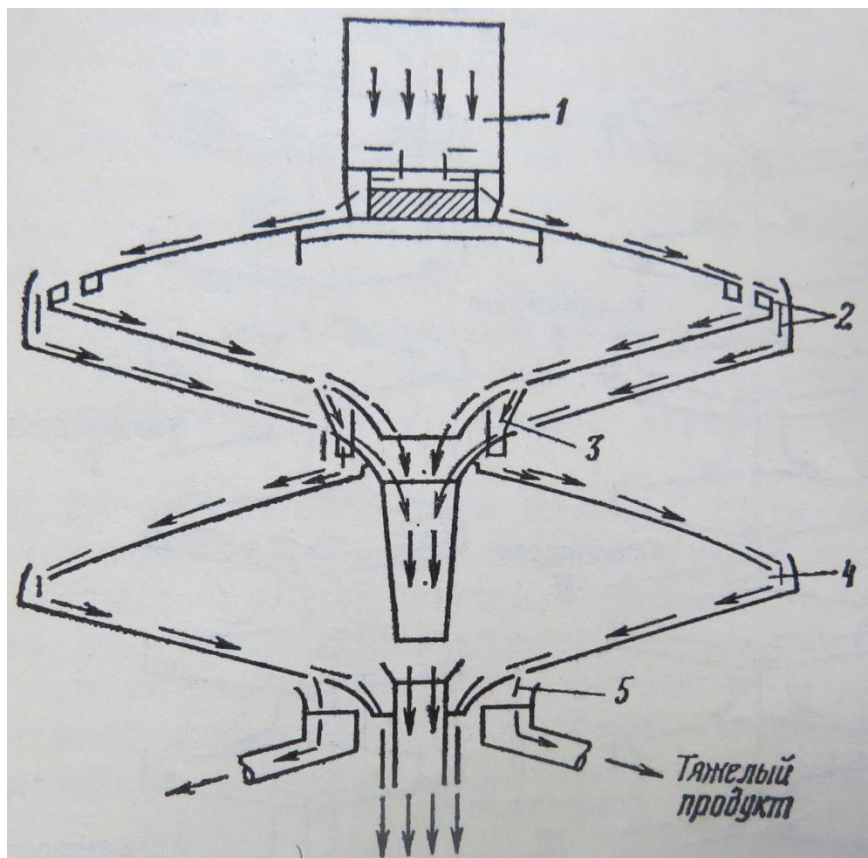
- одним з найбільш поширених класів гравітаційного обладнання є важкосередовищне, яке використовується під час переробки вугілля та металевих руд, у першу чергу залізних. Для підвищення продуктивності важкосередовищних сепараторів та можливості переробляти дрібний матеріал також слід віддавати перевагу обладнанню відцентрового типу та комбінованим установкам, що додатково використовують інші методи збагачення, а також вібраційні ефекти (наприклад, як це відбувається в агрегатах, працюючих за способом Стріпу);

- що стосується відсаджувальних машин, то з усіх апаратів гравітаційного збагачення вони забезпечують найбільші обсяги переробки мінеральної сировини, перш за все завдяки здатності працювати з матеріалом широкого діапазону крупності (від 0,1 до 200 мм). Це пояснює широке використання відсадки для переробки різних руд, у тому числі марганцевих, олово- та золотовмісних. Для залізних руд картина виглядає не так оптимістично – застосування відсаджувальних апаратів

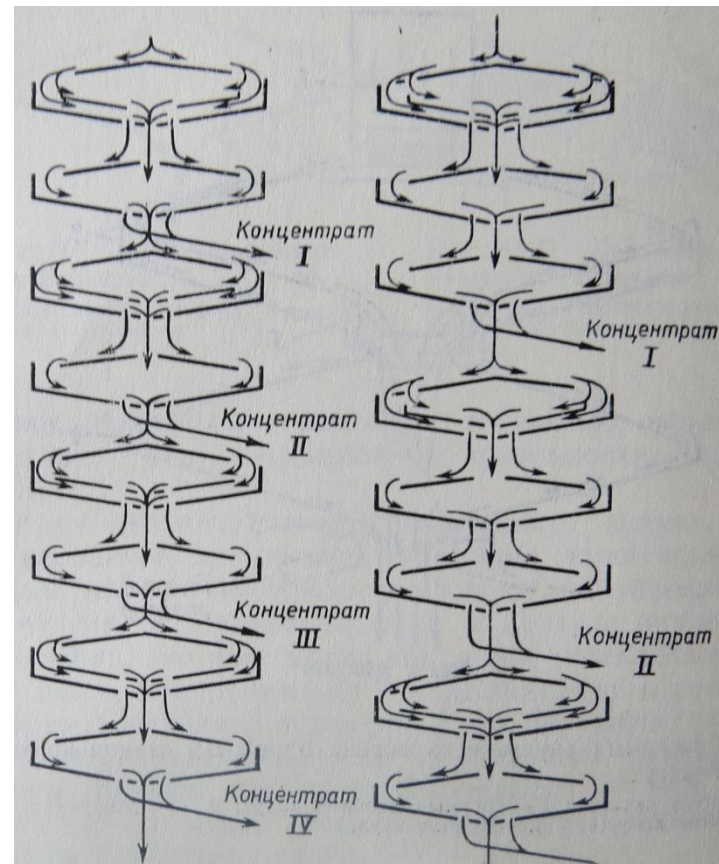
тів можна побачити здебільшого у комплексі з магнітною та важкосередовищною сепарацією, а також з гвинтовими сепараторами;

- нарешті, слід відзначити надзвичайно велику роль у галузі гравітаційного збагачення різноманітної мінеральної сировини численного класу апаратів для сепарації у тонкому шарі води. Насамперед, це стаціонарні та звужувальні шлюзи, сепаратори гвинтового типу, концентраційні столи та обладнання для вилучення тонкого і надтонкого матеріалу. Звання найбільш ефективних з них заслуговують конструкції сепараторів і концентраторів з рухомою декою (моделі Джонсон Барел, Бартлез-Мозлі, Бартлет-Кросбелт), а також батарейні конструкції на базі звужувальних жолобів (наприклад, конус Рейхерта);

- в цілому слід відзначити, що технології і техніка гравітаційної сепарації відіграє дуже помітну роль у сучасній галузі збагачення мінеральної сировини різноманітного походження та призначення. Простота та універсальність гравітаційних способів забезпечують ефективну переробку видобутої гірничої маси з мінімальними витратами енергії і коштів. Перспективи подальшого розвитку та удосконалення гравітаційної сепарації надзвичайно обнадійливі, що підтверджується появою нових ефективних конструкцій такого обладнання.



a



б

в

Рисунок 4.14 – Конусні системи Рейхерта:

a – діаграма внутрішнього потоку однієї DS-стадії конусного концентратора Рейхерта (1 – розподільник живлення; 2 – збірний подвійний конус; 3 – регульована втулка; 4 – зіставний простий конус; 5 – змінна втулка);
б – конфігурація 4DS конуса Рейхерта; *в* – конфігурація 2DSS-DS конуса Рейхерта