

# ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ НЕОДНОРІДНИХ СИСТЕМ

## План лекції

- 1 Фільтри.
- 2 Згущувачі.
  - 2.1 Загальні закономірності відстоювання.
  - 2.2 Апарати для відстоювання та їх розрахунок.
- 3 Центрифуги

Відстоювання, фільтрування і промивання – це процеси розділення неоднорідних дисперсних систем за участю водного розчину, що здійснюються механічним перемішуванням фаз. Як правило, вони не супроводжуються хімічними реакціями. Закономірності цих процесів визначаються гідродинамікою, яка більшою мірою залежить від конструкції апаратів і умов їх експлуатації.

## 1 Фільтри

Зі всіх процесів розділення твердої і рідкої фаз фільтрування найширше застосовують в гідрометалургії. Його використовують для відокремлення твердої фази від розчину в щільних пульпах і для освітлення розчинів, що містять незначну кількість твердих частинок. Крім того, методом фільтрування проводять згущення пульп малої щільності, видаляючи з них частину рідкої фази.

Будь-який фільтрувальний апарат є посудиною, розділеною на дві частини фільтруючою перегородкою. Фільтруючі перегородки виготовляють з різних бавовняних і вовняних тканин, тканин із синтетичних волокон і тканин з волокон мінерального походження, та ін. Останнім часом ширше починають застосовувати пористі металеві, керамічні і металокерамічні фільтруючі перегородки. Робота фільтра багато в чому залежить від властивостей фільтруючої перегородки.

Вибір тієї або іншої фільтруючої перегородки обумовлений:

– пористістю (розміри пор повинні бути такими, щоб частинки осаду затримувалися на перегородці);

- хімічною стійкістю до дії фільтруючого середовища;
- достатньою механічною міцністю;
- теплостійкістю при температурі фільтрування.

До перегородки з одного боку підводять суспензію, що розділяється, з другого – відводять чистий розчин. В розділених частинах посудини створюють різницю тисків, під дією якої рідина проходить через перегородку, а тверді частинки затримуються на її поверхні або всередині. У першому випадку на перегородці поступово наростає шар осаду, і процес називають фільтруванням з утворенням осаду. В другому тверді частинки проникають в пори фільтрувальної перегородки, при цьому залежно від співвідношення розмірів частинки і пори у одну пору може проникати одна частинка, повністю її закриваючи, або поступово декілька частинок. Такий процес називають фільтруванням із закупорюванням пір.

Фільтрування з утворенням осаду має місце при концентраціях твердих частинок більше 1–5 % (об'ємн.). При цьому над входом в пори фільтруючої перегородки швидко утворюються склепіння з твердих частинок (часто менших за розміром, ніж пора), що пропускають рідку фазу і затримують тверді частинки. Фільтрування із закупорюванням пір має місце при освітленні розчинів з малим вмістом тонкодисперсних частинок твердої фази (до 0,1 % (об'ємн.)), а також в початковий період фільтрування щільніших пульп.

Процес фільтрування з утворенням осаду продуктивніший, ніж із закупорюванням пір. В цьому випадку регенерація фільтрувальної перегородки здійснюється значно легше.

Коагулянти і флокулянти, що укрупнюють частинки, або спеціальні інертні речовини (діатоміт, целюлоза та ін.), що збільшують вміст твердої фази в тонкодисперсних суспензіях з малим вмістом твердого, сприяють переходу фільтрування в область утворення осаду. Іноді перед фільтруванням основної суспензії на поверхню фільтруючої перегородки наносять шар осаду допоміжної інертної речовини шляхом попередньої фільтрації її суспензії.

Рушійною силою процесу фільтрування є різниця тисків по обидві сторони фільтруючої перегородки. Різниця тисків може бути створена:

- створенням вакууму під фільтруючою перегородкою (різниця тисків не перевищує 0,09 МПа, наприклад, у промислових вакуум-фільтрах вакуум дорівнює 0,080–0,087 МПа.);
- створенням тиску стислого повітря (до 0,5–1,0 МПа) над перегородкою;

– створенням гідростатичного тиску суспензії (тобто шаром самої суспензії, наливої на фільтр, різниця тисків до 0,05 МПа);

– подачею суспензії на фільтр відцентровим або поршневим насосом, що розвиває тиск до 0,5 МПа і більше.

У гідрометалургії частіше використовують перші два способи.

Осади, що утворюються в процесі фільтрування, поділяють на такі, що стискаються і не стискаються. Пористість осадів, що стискаються, зменшується зі збільшенням різниці тисків, і відповідно зростає їх гідравлічний опір потоку рідини. Осадами, що не стискаються, називають осадки, пористість яких і гідравлічний опір не змінюються при збільшенні різниці тисків. До осадів, що не стискаються, відносяться осадки неорганічних речовин з розміром частинок більш 100 мкм, наприклад осадки, що утворюються при кристалізації соди, поташу. До осадів, що сильно стискаються, відносяться осадки гідроксидів металів, наприклад  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  та ін.

Закономірності фільтрування достатньо складні і залежать від властивостей твердої фази, розчину, фільтруючих перегородок і конструкції фільтра, а також від умов фільтрування. Так, при фільтруванні, що проводиться при постійному тиску, створюваному підключенням фільтра до вакуум-системи або до системи стислого повітря, зі зростанням товщини осаду на фільтрі або у міру закупорювання пір фільтруючої перегородки зменшується швидкість фільтрації. При подачі суспензії на фільтр поршневим насосом фільтрування йде з постійною швидкістю, практично відповідній продуктивності насоса. Тиск фільтрування при цьому зростає до значення, граничного для даного насоса або конструкції фільтра.

Використання відцентрових насосів для транспортування суспензії на фільтр приводить до зміни і тиску, і швидкості фільтрування.

Швидкість фільтрування суспензії залежить від фізичних властивостей і крупності твердих частинок.

Цикл фільтрування складається з наступних стадій. При фільтруванні з утворенням осаду такими стадіями є:

- 1) власне фільтрування суспензії;
- 2) промивання осаду;
- 3) продування осаду повітрям або парою;
- 4) видалення осаду;
- 5) регенерація фільтруючої перегородки.

За режимом роботи фільтри поділяють на періодично і безперервно діючі. Фільтруюча перегородка періодично діючого фільтра нерухома, і на всіх її елементах одночасно відбувається один і той же процес (одна стадія циклу), здійснення різних стадій розділене за часом. У безперервно діючих фільтрах фільтруюча перегородка безперервно переміщається по замкнутому шляху, при цьому всі стадії фільтрування протікають послідовно за часом. Проте вони розділені за місцем здійснення, і в результаті кожна зі стадій є безперервною. Безперервно діючі фільтри працюють при постійній різниці тисків.

Періодично діючі фільтри працюють при створенні різниці тисків всіма вказаними способами, тобто при постійному тиску і при постійній швидкості або змінних тиску і швидкості фільтрування. При розрахунку таких фільтрів визначають оптимальну тривалість основної стадії фільтрування і допоміжних стадій, оптимальну товщину шару осаду, тиск фільтрування.

До періодично діючих фільтрів відносяться нутч-фільтри, що працюють, як правило, під вакуумом (розрідженням); рамні фільтр-преси; автоматизовані фільтр-преси з горизонтальними камерами (ФПАКи), що працюють під надлишковим тиском; листові фільтри, що працюють під надлишковим тиском і під вакуумом; патронні вакуум-фільтри – згущувачі і деякі інші.

Нижче приведений короткий опис конструкцій і принципу дії декількох поширених на гідрометалургійних заводах типів фільтрів.

Простіший представник фільтрів періодичної дії – *простий фільтр* – працює при атмосферному тиску над і під фільтруючою перегородкою. Таке природне фільтрування відбувається під дією гідростатичного тиску стовпа рідини:

$$P = \rho \cdot g \cdot h ,$$

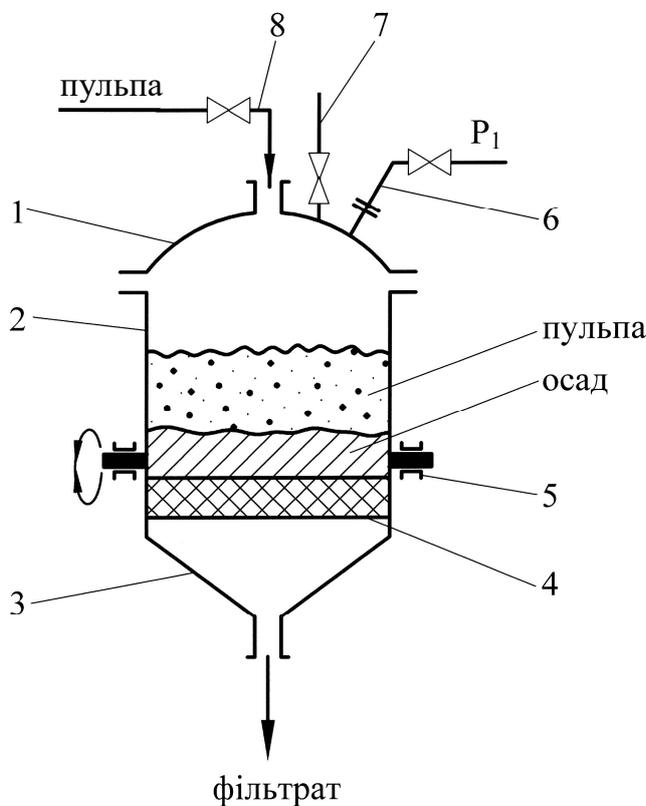
де  $\rho$  – густина рідкої фази (суспензії), кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

$h$  – висота стовпа рідини над перегородкою, м.

Наприклад, в лабораторній практиці як простий фільтр використовують скляну воронку з фільтрувальним папером. Переваги таких фільтрів – простота конструкції і дешевизна. Але низька продуктивність простих фільтрів при роботі з промисловими пульпами і суспензіями примушує шукати шляхи підвищення рушійної сили процесу фільтрування.

Апарат, що працює з підвищеним (понад атмосферного) тиском, називається *друк-фільтром* (рис. 1.7). Фільтр працює в дві стадії – накопичення осаду з отриманням фільтрату та вивантаження осаду. На першій стадії в апарат із закритою кришкою, сполученою з лінією високого тиску  $P_1$ , подається суспензія. Фільтрат проходить через фільтруючу перегородку, тиск під якою  $P_2$  – атмосферний, і відводиться з фільтра. Одночасно на перегородці накопичується осад. Після накопичення шару осаду достатньої товщини подача суспензії припиняється (закривається засувка на лінії подачі суспензії) і відключається високий тиск  $P_1$  (перекривається вентиль на лінії високого тиску) – перша стадія завершена. На другій стадії відкривають вентиль на лінії скидання тиску – у просторі над перегородкою з осадом встановлюється атмосферний тиск, після чого відкривають кришку фільтра. Далі з фільтра механічно вивантажують осад. У деяких конструкціях друк-фільтрів для полегшення вивантаження осаду передбачений поворотний пристрій, за допомогою якого фільтр перекидається (повертається на  $180^\circ$  навколо горизонтальної осі).



- 1 – кришка;
  - 2 – циліндричний корпус;
  - 3 – днище;
  - 4 – фільтрувальна перегородка;
  - 5 – поворотний пристрій;
  - 6 – лінія високого тиску;
  - 7 – лінія скидання тиску;
  - 8 – лінія подачі суспензії
- Рисунок 1.7 – Схема друк-фільтра

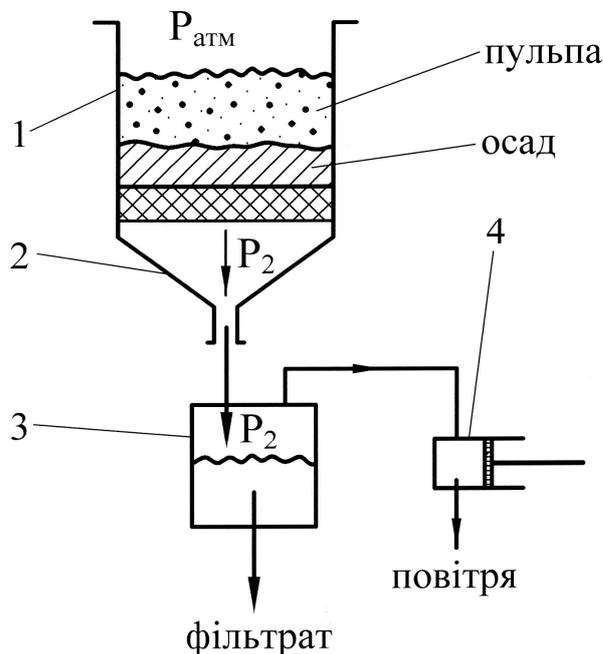
Після вивантаження осаду апарат збирають, герметизують (закривають вентиль на лінії скидання тиску), сполучають з джерелом високого тиску  $P_1$ , після чого включають подачу суспензії – повторюється перша стадія.

Для ряду промислових осадів характерна поява протягом фільтрування глибоких тріщин в осаді, що доходять до перегородки. У ці тріщини спрямовується суспензія, найбільш дрібні частинки якої проходять через перегородку, отже фільтрат виходить недостатньо освітленим. У закритому друк-фільтрі утруднено спостереження за поверхнею осаду, тим більше вплив на тріщини, що з'являються. Від цього недоліку вільні нутч-фільтри, що працюють з розрідженням під фільтруючою перегородкою і атмосферним тиском над нею. Рушійна сила при цьому зростає порівняно з природним фільтруванням. Прикладом нутч-фільтра з лабораторної практики є лійка Бюхнера з водоструминним насосом. Іноді в нутч-фільтрах для збільшення рушійної сили тиск над перегородкою підвищують понад атмосферним; проте при цьому пропадає доступність поверхні шару осаду.

*Нутч-фільтр* є відкритою вертикальною посудиною круглого або прямокутного перетину з подвійним днищем (рис. 1.8). На верхнє несправжнє днище у вигляді решітки укладають фільтрувальну тканину. Суспензію заливають на нутч-фільтр зверху, а у просторі під несправжнім днищем створюють вакуум. Під дією розрідження (тиск під перегородкою  $P_2$  нижче атмосферного  $P_{\text{атм}}$ ) рідка фаза (фільтрат) проходить крізь фільтруючу перегородку і видаляється з нутча, а тверда фаза у вигляді осаду накопичується на перегородці. Фільтрат збирається в приймальний збірник, сполучений з вакуум-насосом, що створює розрідження. Повітря від вакуум-насоса викидається в атмосферу. При появі протягом фільтрування тріщин в осаді їх усувають, механічно впливаючи зверху на шар осаду. Перевага таких фільтрів – простота конструкції, можливість якісного промивання осаду, а недолік – велика площа займаного ними приміщення на одиницю фільтруючої поверхні і необхідність ручної праці при видаленні осаду.

Розглянуті вище фільтри відрізняються порівняно невеликою робочою поверхнею фільтрування, що обмежує їх продуктивність. Значне збільшення поверхні фільтрування характерно для *рамного фільтр-преса* (рис. 1.9). Елементами фільтр-преса є рами і плити, показані окремо на виді *а*; на виді *б*

зображено фрагмент фільтра у складанні: рами і плити, що чергуються, однакової висоти і ширини.



- 1 – корпус фільтра;
- 2 – фільтруюча перегородка;
- 3 – збірник фільтрату;
- 4 – вакуум-насос

Рисунок 1.8 – Схема нутч-фільтра

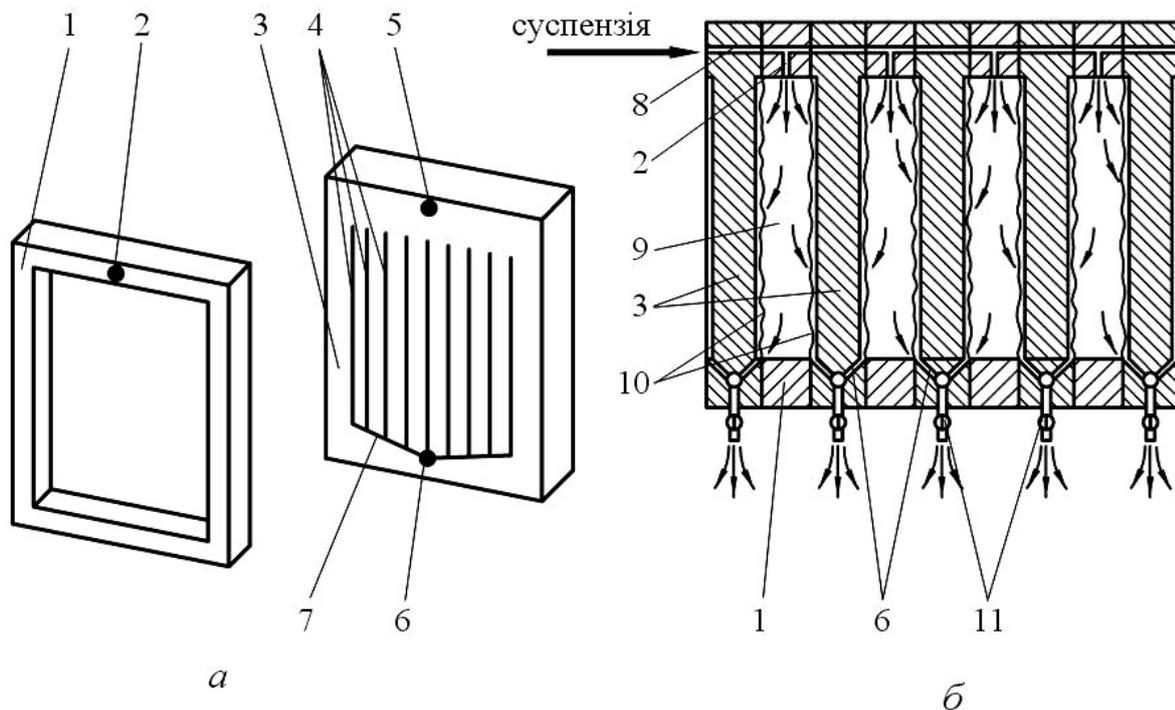
Рама має фігурний отвір, що відкривається у внутрішню її порожнину. Плита має наскрізний отвір, співпадаючий при складанні з отвором рами, і нижній фігурний отвір. Форма отворів рам і плит показана на рис. 1.9 б. На вертикальних поверхнях плити (з обох її сторін) виконано подовжні поглиблення – канавки, що закінчуються внизу на похилих нижніх збірних каналах, які ведуть до нижнього фігурного отвору. На обох сторонах плити укріплена фільтрувальна тканина.

При складанні рами і плити вмонтовуються поперемінно, з обох торців збірка закрита суцільними кришками і стягнута шпильками. Система з рам і плит розташована над ванною (на схемі не показано).

Рамний фільтр-прес (рис. 1.9) складається з вертикально розташованих прямокутних рам і плит, що чергуються, між якими затиснута фільтрувальна тканина. Кожні дві сусідні плити з укладеною між ними рамою утворюють самостійно працюючу фільтрувальну камеру. У верхній частині рам і плит є співпадаючі по осі отвори, які утворюють загальні канали для подачі фільтрованої суспензії і промивної рідини в камери. Суспензія нагнітається в центральний канал і з нього через відвідні канали у верхніх стінках рам поступає в камеру. Рідина проходить крізь фільтруючі серветки, стікає по

канавках в плитах в нижні збірні канали і через кран видаляється назовні, осад залишається на фільтруючій перегородці всередині камери, поступово її заповнюючи. Після заповнення камер, яке фіксується по припиненню стікання фільтрату, проводять промивання. Після закінчення промивання через фільтр-прес продувають стисле повітря, після чого вивантажують осад. Для цього рами і плити розсовують (у сучасних фільтрах ця операція механізована), і осад вивантажують у ванну. Після огляду, а при необхідності – і полагодження тканини фільтр-прес знову збирають, і цикл повторюється.

Величина поверхні фільтрації рамних фільтр-пресів може досягати 100 м<sup>2</sup>, тиск пульпи, що подається, – близько 1,0 МПа. Зазвичай фільтр-прес працює при постійній швидкості фільтрування і поступово зростаючому тиску перед фільтром. Коли при максимальному тиску перед фільтром швидкість фільтрування істотно знизиться через заповнення камер осадом, процес припиняють.



*а* – елементи фільтр-преса; *б* – стадія фільтрування; 1 – рама;  
 2 – фігурний отвір рами; 3 – плита; 4 – вертикальні канали;  
 5 – наскрізний отвір плити; 6 – фігурний отвір плити; 7 – нижні збірні канали; 8 – центральний канал; 9 – камери; 10 – фільтрувальна тканина; 11 – крани для видалення фільтрату

Рисунок 1.9 – Схема роботи рамного фільтр-преса

Фільтр-преси мають переваги перед іншими фільтрами при фільтруванні суспензій зі значним вмістом тонкодисперсних частинок. Перевага фільтр-преса – велика поверхня фільтрування на одиницю займаної площі і відносно висока продуктивність. Основний недолік – громіздкість операції розбирання і збирання фільтра і великі непродуктивні витрати часу на цю операцію.

Автоматизований фільтр-прес із горизонтальними камерами ФПАКМ, характеризується низкою переваг і при цьому не потребує ручної праці.

*Фільтри безперервної дії* характеризуються більшою продуктивністю, стабільністю роботи, відсутністю непродуктивних витрат часу на стадії вивантаження осаду, можливістю автоматизації процесу. Проте вони мають більш складну конструкцію та дорожчі.

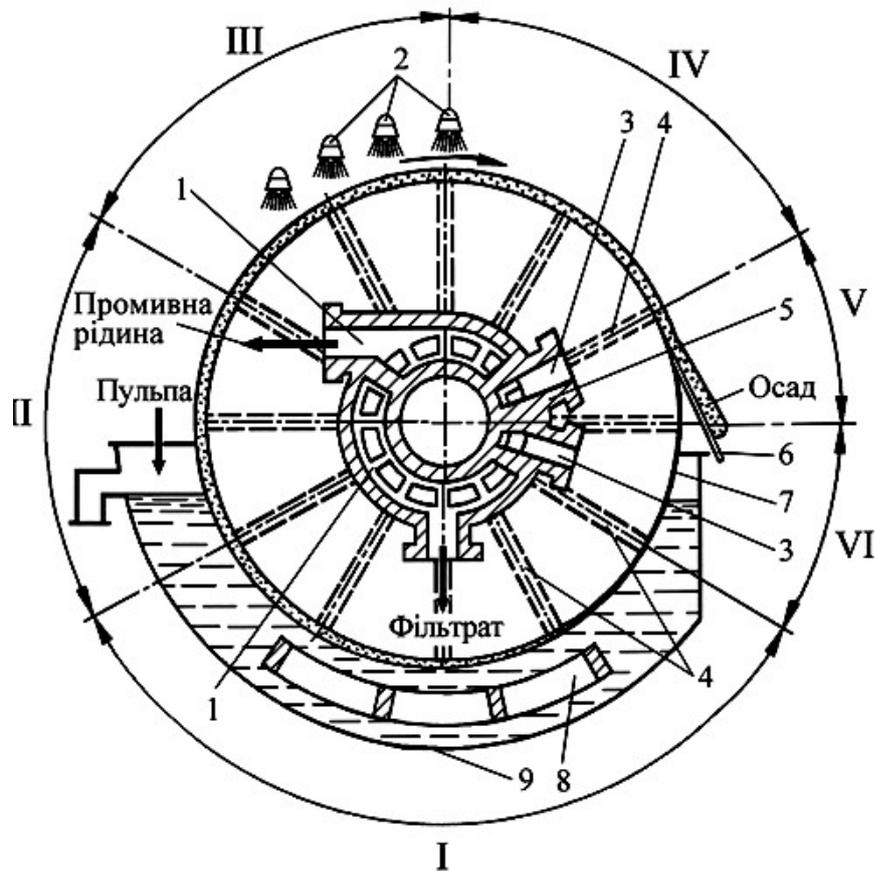
До поширених безперервно діючих фільтрів відносяться барабанні, дискові і стрічкові вакуум-фільтри.

*Барабанний фільтр* (рис. 1.10) має горизонтальний циліндричний перфорований барабан, що обертається, покритий зовні фільтруючою тканиною, занурений приблизно на одну третину своєї поверхні в суспензію, що знаходиться в кориті з мішалкою.

Фільтруюча поверхня барабана розділена на ряд ізольованих прямокутних комірок, які при обертанні барабана приєднуються в певній послідовності трубкою до різних порожнин нерухомої частини розподільного пристрою.

У зоні фільтрування комірка, що стикається з суспензією, з'єднується з порожниною, яка сполучається з джерелом вакууму. Фільтрат через трубку і порожнину надходить у збірник, а на поверхні комірки утворюється осад. У зоні першого зневоднення поверхня осаду стикається з атмосферним повітрям, а комірка залишається сполученою з тією ж порожниною. Проводиться продування осаду повітрям, що витісняє з пір осаду фільтрат. У зоні промивання на осад з розбризкуючих пристроїв подається промивна рідина, комірка же з'єднується трубкою з порожниною, зв'язаною через збірник промивних розчинів з джерелом вакууму. У зоні другого зневоднення промитий осад стикається з атмосферним повітрям, а комірка сполучена з тією ж порожниною, тому промивна рідина витісняється з пір осаду і надходить у збірник промивних розчинів. У зоні видалення осаду комірка з'єднується з порожниною, що сполучається з джерелом стислого повітря, під дією, якого

осад відділяється від тканини і далі знімається ножем. У зоні регенерації тканина продувається стислим повітрям з порожнини.



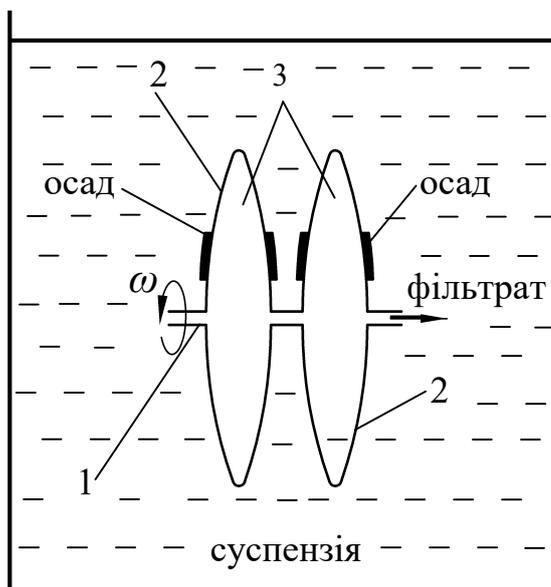
1 – порожнини розподільного пристрою, що сполучаються з джерелом вакууму; 2 – розбризкуючий пристрій для промивної рідини;  
 3 – порожнини розподільного пристрою, що сполучаються з джерелом стислого повітря; 4 – комірочка зі сполучною трубкою; 5 – розподільний пристрій; 6 – ніж для зрізування осаду; 7 – барабан; 8 – мішалка, що коливається; 9 – корито для суспензії; I – фільтрування; II – перше зневоднення; III – промивання; IV – друге зневоднення;  
 V – видалення осаду; VI – регенерація тканини

Рисунок 1.10 – Схема дії барабанного вакуум-фільтра з зовнішньою поверхнею фільтрування

Барабанний вакуум-фільтр успішно застосовують для фільтрування пульп з високим вмістом твердих частинок, створюючих осади з достатньо хорошою

проникністю і стабільністю властивостей. Такий фільтр зручний в обслуговуванні, забезпечує достатньо хороше промивання. Барабанні фільтри, що застосовують в гідрометалургії, мають поверхню фільтрування 5–10 м<sup>2</sup> і товщину шару осаду залежно від його властивостей 5–40 мм. Вологість відфільтрованого осаду коливається від 10 % (для крупнокристалічних осадів) до 30 % і більше. Відношення поверхні фільтрування до площі, займаної фільтром, більше, ніж нутч-фільтрів, проте значно нижче, ніж дискових, листових фільтрів або фільтр-пресів.

У барабанному фільтрі працює бічна поверхня, але торцева в процесі фільтрування не бере участь. Засновані на тих же принципах *дискові фільтри* (фрагмент – на рис. 1.11) як фільтруючу поверхню використовують торці, вико-



- 1 – порожнистий вал;
- 2 – фільтруюча поверхня;
- 3 – диск

Рисунок 1.11 – Дисковий фільтр

нані у формі дисків (що іноді звужуються зі зростанням радіусу). Фільтруюча тканина обтягує каркас диска – перфорований або рифлений. Осад зрізається фасонним ножом. Діаметр дисків досягає 2–3 м, число їх в одному агрегаті може перевищувати 10, поверхня фільтрації – до 100 м<sup>2</sup>.

## 2 Згущувачі

### 2.1 Загальні закономірності відстоювання

Відстоювання застосовують у промисловості для згущення пульп або класифікації за фракціями частинок твердої фази суміші.

Процес відстоювання полягає в розділенні під дією сили тяжіння суспензій (пульп), що складаються з рідин і твердих частинок, на освітлену рідину і осад. У ідеалі освітлена рідина не повинна містити твердих частинок.

Розрізняють вільне осадження, коли осідаючі частинки при русі не стикаються одна з іншою, і стиснуте або солідарне (колективне) осадження частинок, що супроводжується тертям між частинками і їх зіткненнями. Вільне осадження має місце лише при дуже малих концентраціях дисперсної фази (до 1 % (об'ємн.)). Протягом відстоювання суспензій спостерігається поступове збільшення концентрації частинок, що диспергують, в напрямку зверху вниз, тому вільне осадження поступово переходить в стиснуте.

Постійну швидкість вільного осадження, яку набуває сферична частинка при урівноваженні дії сили тяжіння опором середовища, можна визначити для найбільш поширеного випадку ламінарного осадження за *законом Стокса*:

$$\omega_{oc} = d^2 \cdot (\rho_{тв} - \rho_{ж}) \cdot g / (18 \cdot \mu_{см}), \quad (1)$$

де  $\omega_{oc}$  – швидкість вільного осадження частинок, м/с;

$d$  – діаметр частинки, м;

$\rho_{тв}$ ,  $\rho_{ж}$  – густина твердої фази та чистої рідини відповідно, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

$\mu_{см}$  – динамічна в'язкість суміші, Па·с.

Величину  $\mu_{см}$  можна визначити залежно від об'ємної концентрації твердої фази у суміші за формулами:

при  $\varphi \leq 0,1$

$$\mu_{см} = \mu_c \cdot (1 + 2,5 \cdot \varphi), \quad (2)$$

при  $\varphi > 0,1$

$$\mu_{см} = \mu_c \cdot (1 + 4,5 \cdot \varphi), \quad (3)$$

де  $\varphi$  – об’ємна концентрація твердої фази у суміші, частки;

$\mu_c$  – динамічна в’язкість чистої рідини, Па·с.

Мінімальний розмір частинок, що осідають за законом Стокса, дорівнює  $1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$  см (критерій Рейнольдса  $Re = 10^{-4}$ ). Максимальний розмір частинок визначається за формулою, отриманою з рівняння (1) при підстановці в нього значення швидкості з виразу критерію Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega_{oc} \cdot d \cdot \rho_{жс}}{\mu_{см}}. \quad (4)$$

При  $Re = 1,85$  (граничне значення для ламінарного режиму)

$$d_{\max} = \sqrt[3]{\frac{1,85 \cdot 18 \cdot \mu_c^2}{\rho_{жс} \cdot (\rho_{тв} - \rho_{жс}) \cdot g}}. \quad (5)$$

При будь-яких режимах (турбулентному, ламінарному, перехідному) процес вільного осадження частинок може бути описаний рівнянням в критерійній формі, отриманим з тих же вихідних положень прийомами теорії подібності:

$$Re = a \cdot Ar^n, \quad (6)$$

де  $Ar$  – критерій Архімеда;

$a, n$  – коефіцієнти, що визначені експериментально та залежать від величини  $Re$ .

Значення критерію Рейнольдса  $Re$  враховують залежно від режиму осадження, який визначається за допомогою критерію Архімеда:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho_{тв} - \rho_{жс}) \cdot \rho_{жс} \cdot g}{\mu_c^2}, \quad (7)$$

при  $Ar \leq 36$

$$Re = Ar/18 = 0,056 \cdot Ar, \quad (8)$$

при  $36 < Ar \leq 8,3 \cdot 10^4$

$$Re = 0,152 \cdot Ar^{0,715}, \quad (9)$$

при  $Ar > 8,3 \cdot 10^4$

$$Re = 1,74 \cdot \sqrt{Ar}. \quad (10)$$

Швидкість осадження частинок некулястої форми  $\omega'_{oc}$  менше, ніж кулястих частинок. При розрахунках зменшення швидкості враховують за допомогою коефіцієнта форми  $\psi \leq 1$ , який для частинок округлої форми приймають  $\psi = 0,77$ , для кутастих  $\psi = 0,66$ , для довгастих  $\psi = 0,58$ , для пластинчастих  $\psi = 0,43$ , для кулястих  $\psi = 1,0$ . При цьому у відповідне рівняння, що використовується для визначення швидкості осадження частинок, слід підставляти значення діаметра еквівалентної кулі (яка має той же об'єм, що і дане тіло некулястої форми):

$$\omega'_{oc} = \psi \cdot \omega_{oc} . \quad (11)$$

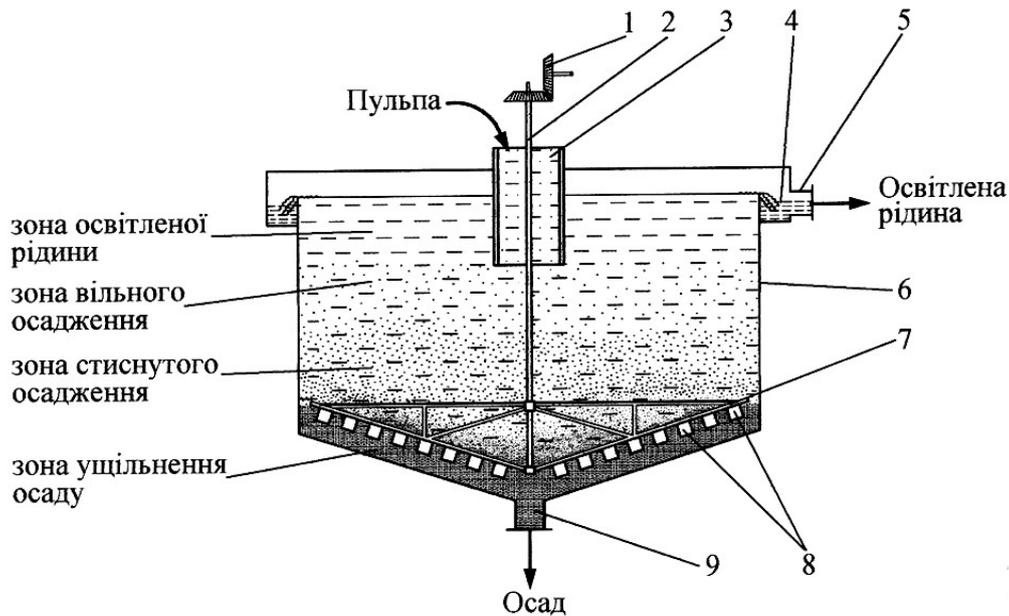
Приведені рівняння відносяться тільки до вільного осадження частинок. Вони дозволяють робити висновки про вплив основних фізичних чинників на осадження.

Швидкість стиснутого осадження частинок завжди менша швидкості вільного осадження частинок тих же розмірів, оскільки в першому випадку виникає додатковий опір, пов'язаний з тертям і зіткненням частинок. При стиснутому осадженні зближуються швидкості осадження частинок різного розміру, але розрізняються швидкості руху частинок по висоті апарата, осадження сповільнюється одночасно з ущільненням суспензії.

Процес осадження частинок за часом ілюструє рис. 1.12. У зоні вільного осадження частинок швидкість їх осадження постійна, потім протягом згущування суспензії осадження сповільнюється (*зона стиснутого осадження*) і далі швидкість різко падає до нуля (*зона ущільнення*). З часом у поверхні виникає *зона освітленого розчину*. У зоні ущільнення грубодисперсних суспензій утворюються щільні осади. Дуже тонкі суспензії не дають осадів, як і повного освітлення розчину, в них відбувається лише поступове підвищення концентрації частинок зверху вниз. Полідисперсні суспензії утворюють шаруваті (за крупністю частинок) осади, що використовують для класифікації твердих речовин за їх щільністю і за величиною частинок.

Згідно з гідродинамікою, стиснуте осадження аналогічно стану псевдозрідженого шару на верхній межі існування, коли швидкість потоку рідини (або газу) досягає величини, перевищення якої веде до винесення киплячого шару. При цьому швидкість стиснутого осадження частинок  $\omega_{ст}$  дорівнює швидкості потоку середовища через зважений шар частинок  $\omega_{кр.маx}$  і

залежить від концентрації частинок в об'ємі рідини. Тому для розрахунку  $\omega_{cm}$  можна скористатися залежностями  $Re = f(Ar)$ , що описують швидкість потоку в зваженому шарі. Проте і при такому підході не може бути враховано багато чинників, що впливають на осадження, тому на практиці частіше користуються емпіричними формулами для визначення  $\omega_{cm}$ .



1 – привід; 2 – вал гребкової мішалки; 3 – труба для подавання вихідної пульпи; 4 – кільцевий жолоб; 5 – штуцер для відведення освітленої рідини; 6 – циліндричний корпус; 7 – хрестовина з гребками; 8 – гребки; 9 – патрубок для видалення осаду

Рисунок 1.12 – Вертикальний відстійник безперервної дії

Швидкість стиснутого осадження суміші, яка складається з частинок, наближено можна розрахувати за швидкістю вільного осадження частинок залежно від об'ємної частки рідини в суміші за формулами:

при  $\varepsilon \leq 0,7$

$$\omega_{cm} = 0,123 \cdot \omega_{oc} \cdot \psi \cdot \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon}, \quad (12)$$

при  $\varepsilon > 0,7$

$$\omega_{cm} = \omega_{oc} \cdot \psi \cdot \varepsilon^2 \cdot 10^{-1,82 \cdot (1-\varepsilon)}, \quad (13)$$

де  $\omega_{oc}$  – швидкість вільного осадження частинок, м/с;

$\varepsilon$  – об'ємна частка рідини в суміші;

$\psi$  – коефіцієнт форми частинок, який визначається за дослідними даними.

Для визначення об'ємної частки рідини в суміші  $\varepsilon$  застосовують співвідношення:

$$\varepsilon = 1 - x_{cm} \cdot \rho_{cm} / \rho_{тв}, \quad (14)$$

де  $\rho_{cm}$  – густина суміші, кг/м<sup>3</sup>;

$x_{cm}$  – вміст твердих частинок у вихідній суміші, частка.

Густину суміші  $\rho_{cm}$  можна визначити за формулою:

$$\rho_{cm} = \frac{1}{\frac{x_{cm}}{\rho_{тв}} + \frac{1-x_{cm}}{\rho_{ж}}}, \quad (15)$$

де  $\rho_{cm}$  – густина суміші, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{ж}$  – густина чистої рідини, кг/м<sup>3</sup>.

## 2.2 Апарати для відстоювання та їх розрахунок

У промисловості відстоювання проводять в апаратах, що називаються відстійниками або згущувачами. *Періодично діючі відстійники* є резервуарами або басейнами без перемішуючих пристроїв з нижнім вивантаженням згущеної пульпи або осаду і бічним зливом освітленого розчину через сифон або по зливних трубах, розташованих на декількох рівнях за висотою апарата.

Більше розповсюдження мають *апарати безперервної дії*, одноярусні і багатоярусні. Одноярусний відстійник (рис. 1.12) – це широкий вертикальний циліндричний резервуар з конічним днищем, центральною гребковою мішалкою і внутрішнім кільцевим жолобом уздовж верхнього краю циліндра. Вихідна пульпа (суспензія) подається безперервно через трубу в центрі резервуара, освітлений розчин переливається в кільцевий жолоб і видаляється через верхній штуцер. Матеріал, що осідає на дно, при обертанні мішалки пересувається гребками до розвантажувального отвору і видаляється за допомогою

транспортуючого пристрою (шнека або шламowego насоса). При низькій концентрації твердої фази у вихідній суспензії осад накопичується повільно, тому транспортуючий пристрій включається у міру накопичення осаду на короткий час. При високій концентрації твердої фази у вихідній пульпі (суспензії) осад, що швидше накопичується, відводиться за допомогою безперервно працюючого транспортуючого пристрою. Мішалка обертається так повільно (0,015–0,5 об/хв), що не порушує процесу осадження.

Конструктивно відстійники, згущувачі та класифікатори виготовляють аналогічно, але при розрахунку згущувачів ґрунтуються на швидкості осадження найдрібніших частинок суміші, які необхідно відділити на даній стадії. Основні розміри згущувачів безперервної дії з гребковою мішалкою надано в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні розміри згущувачів безперервної дії з гребковою мішалкою

Діаметр, м	1,8	3,6	4,0	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	24,0	30,0
Висота, м	1,8	1,8	2,5	3,0	3,6	3,5	3,6	3,2	3,6	3,6
Поверхня, м <sup>2</sup>	2,54	10,2	12,0	28,2	63,9	113	176,6	254	452	706,5

Інженерний розрахунок згущувача, відстійника або прояснювача складається з визначення площі осадження або діаметра апарата, а також його висоти.

*Розрахунок відстійників* виконують за швидкістю осадження найдрібніших частинок, а для сфлукуюваної суспензії – по встановленій експериментально швидкості осадження флокул. При цьому відстійник приймають за апарат ідеального витіснення.

При розрахунку згущувачів і відстійників основною розрахунковою величиною є поверхня осадження  $F_{oc}$ , яку визначають за формулою:

$$F_{oc} = K_3 \cdot \frac{G_{cm}}{\rho_{ocv} \cdot \omega_{cm}} \cdot \left[ \frac{x_{oc} - x_{cm}}{x_{oc} - x_{ocv}} \right], \quad (16)$$

де  $F_{oc}$  – поверхня осадження (площа поперечного перетину апарата), м<sup>2</sup>;

$K_3$  – коефіцієнт запасу поверхні, який враховує нерівномірність

розподілення вихідної суміші з усієї площі осадження, вихроутворення та інші фактори, які виявляються у виробничих умовах (звичайно  $K_3 = 1,30-1,35$ );

$G_{cm}$  – масова витрата вихідної суміші, кг/с;

$\rho_{ocv}$  – густина освітленої рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega_{cm}$  – швидкість стиснутого осадження частинок суміші, м/с;

$x_{cm}$ ,  $x_{oc}$ ,  $x_{ocv}$  – вміст твердих частинок у вихідній суміші, осаді та проясненій рідині відповідно, частка.

Якщо  $x_{ocv} = 0$ , то для практичного застосування використовується формула:

$$F_{oc} = \frac{1,33 \cdot G_{cm} \cdot (1 - x_{cm}/x_{oc})}{\rho_{ocv} \cdot \omega_{cm}}. \quad (17)$$

Тривалість перебування елемента потоку у відстійнику (згущувачеві) має дорівнювати або перевищувати час осадження частинок. Середню тривалість перебування суспензії у відстійнику можна визначити за формулою:

$$\tau_{сер} = F_{oc} \cdot h / G_{cm.г}, \quad (18)$$

де  $G_{cm.г}$  – годинна продуктивність по пульпі, м<sup>3</sup>/год.;

$h$  – робоча висота (висота зон осадження), м.

Загальну висоту відстійника визначають підсумовуванням розмірів зон осадження (вільного і стиснутого), зони освітленого розчину, зони ущільнення; розміри останніх частіше вибирають з практичних міркувань.

Тривалість осадження дорівнює

$$\tau = h / \omega_{cm}. \quad (19)$$

При заданій продуктивності відстійника (згущувача) по пульпі, прирівнявши (1.25) и (1.26), отримуємо необхідну площу поперечного перетину апарата:

$$F_{oc} = G_{cm} / \omega_{cm}. \quad (20)$$

Для відстійника (згущувача) заданих розмірів, прирівнявши (1.25) і (1.26), визначаємо продуктивність по пульпі зі співвідношення:

$$G_{cm} = F_{oc} \cdot \omega_{cm}. \quad (21)$$

### 3 Центрифуги

Осадження під дією відцентрових сил відбувається в машинах, що називають *центрифугами*.

Припустимо, що пульпа разом з ротором центрифуги здійснює обертальний рух з кутовою швидкістю  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$  ( $n$  – частота обертання, об/хв). Тоді на частинку масою  $m_c$ , що знаходиться на відстані  $r$  від осі обертання, діє відцентрова сила:

$$P_{\text{відц}} = m_c \cdot \omega^2 \cdot r .$$

Тоді питома (на 1 м<sup>3</sup>) рушійна сила процесу осадження (з урахуванням архімедової сили) має вид:

$$P_{\text{руш}} = (\rho_{\text{тв}} - \rho_{\text{ж}}) \cdot \omega^2 \cdot r ,$$

де  $\rho_{\text{тв}}$  – щільність твердої частинки, кг/м<sup>3</sup>;

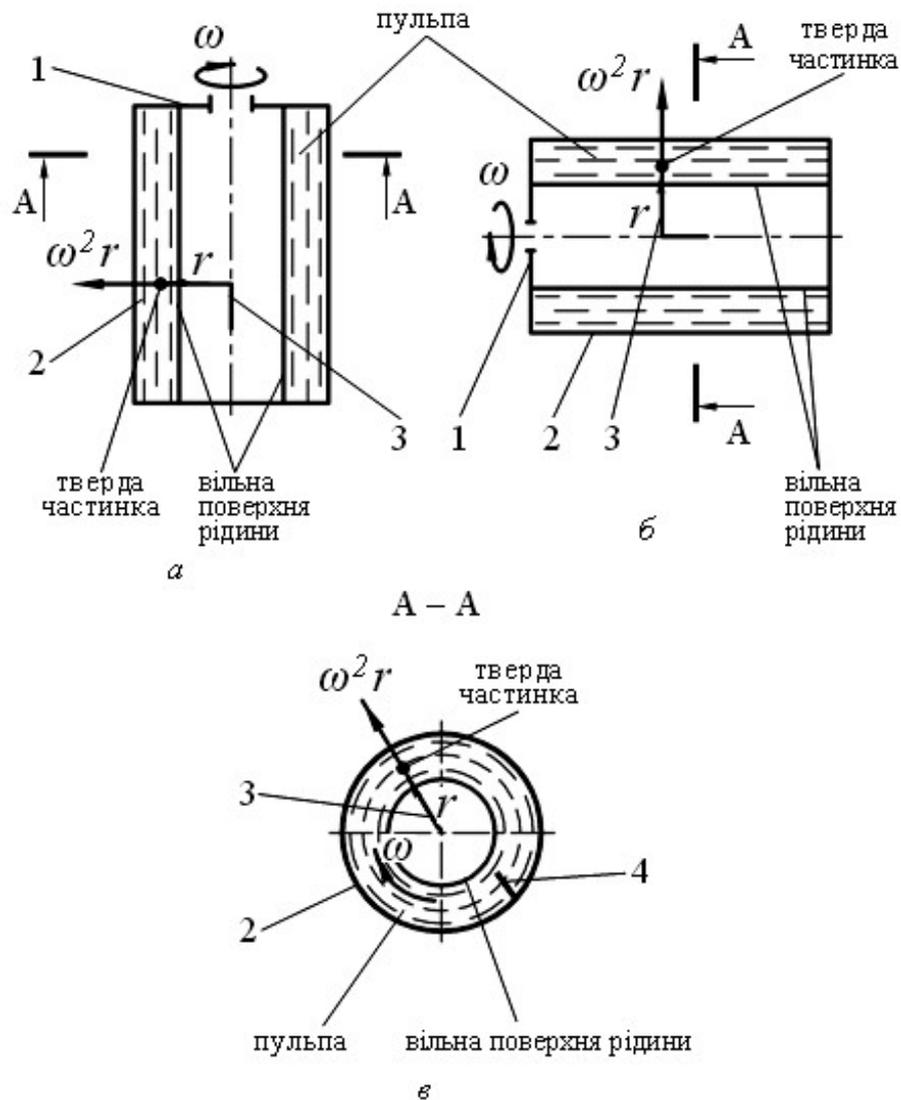
$\rho_{\text{ж}}$  – густина рідкої фази пульпи, кг/м<sup>3</sup>.

Принципові схеми дії центрифуг надано на рис. 1.13.

*Вертикальна центрифуга* (рис. 1.13, а) є укріпленням на валу циліндричним барабаном (корпус, ротор) з кільцевою кришкою, що обертається з частотою обертання  $n$  (кутовою швидкістю  $\omega$ ). У барабан заливається пульпа, під дією сил (відцентрової і тяжіння) її вільна поверхня має прийняти форму параболоїда обертання. Але при збільшенні кутової швидкості обертання  $\omega$  вершина параболоїда виявиться нижчою за дно циліндричного барабана, а при високих кутових швидкостях обертання (саме у такому режимі працює центрифуга) – практично зрушиться далеко вниз. Отже вільну поверхню пульпи у центрифугі без скільки-небудь помітної погрішності можна вважати не параболічною, а циліндричною, співісною з валом і барабаном.

*Горизонтальна центрифуга* (рис. 1.13, б) є циліндричним барабаном з кільцевою кришкою, укріпленням на горизонтальному валу. При обертанні центрифуги утворюється циліндрична вільна поверхня (строго кажучи, не співісна з віссю обертання) з ексцентриситетом  $g/\omega^2$ . Проте при високих частоті обертання  $n$  і кутових швидкостях  $\omega$  (саме у такому режимі працює центрифуга) ексцентриситет стає зневажливо малим, отже без скільки-небудь

помітної погрішності вільну поверхню і тут можна вважати співвісною з валом і циліндром барабана.



*a* – вертикальна центрифуга; *б* – горизонтальна центрифуга;  
*в* – поперечний перетин центрифуги; 1 – кільцева кришка; 2 – корпус центрифуги; 3 – вісь вала центрифуги; 4 – радіальне ребро  
 Рисунок 1.13 – Осадження в полі відцентрових сил

Центрифуги класифікують по характерних технологічних ознаках і конструктивних особливостях.

До характерних ознак центрифуг відносять принцип поділу пульпи, технологічне призначення і характер протікання процесу. До конструктивних особливостей відносять розташування вала та його опор, спосіб вивантаження осаду, виконання центрифуги (герметичність і вибухозахищеність).

За принципом розділення розрізняють центрифуги фільтруючі, відстійні і комбіновані. Фільтруючі призначені для поділу сумішей, коли потрібне глибоке зневоднення і високий ступінь промивання осаду. Відстійні центрифуги залежно від технологічного призначення підрозділяють на зневоджуючі і освітлюючі. Перші призначені для поділу висококонцентрованих пульп зі середнезернистою твердою фазою, коли чистота фугата не лімітується, але необхідно забезпечити високу продуктивність осаду і низьку його вологість. Другі використовують для очищення розчинів від дисперсних частинок при малій їх концентрації, а також для класифікації матеріалів по дисперсності і щільності. Комбіновані центрифуги сполучають у собі два або більше принципи розділення пульп.

За характером перебігу процесу центрифуги поділяють на апарати періодичної і безперервної дії.

За конструктивними ознаками центрифуги поділяють на центрифуги з горизонтальним і вертикальним розташуванням вала. Серед центрифуг з вертикальним розташуванням вала найбільш поширені підвісні та маятникові.

За способом вивантаження осаду розрізняють центрифуги з вивантаженнями: ручним, ножовим, пульсуючим поршнем; поршнем, що виштовхує, шнековим, механіко-пневматичним та ін.

Маркування центрифуг складається з букв і цифр.

Перша літера вказує на принцип поділу суміші: Ф – фільтруюча; О – відстійна (зневоджуюча або освітлююча); Р – розподіляюча; К – комбінована.

Друга літера вказує на основну конструктивну ознаку: Г – горизонтальна; П – підвісна; М – маятникова і т.д.

Третя літера – на спосіб вивантаження осаду: Б – ручний через борт; Д – ручний через днище; Н – ножовий; Ш – шнековий; П – поршневий і т.д.

Число після літер показує максимальний внутрішній діаметр ротора (см); остання цифра не входить у його позначення, а показує виконання центрифуги: 1 – негерметизована; 2 – негерметизована з вибухозахищеним устаткуванням; 5 – з теплообмінною сорочкою і т.д. Наступна за числом літера означає конструктивний матеріал, що стикається з оброблюваним продуктом: У – сталь вуглецева; Л – легована; К – корозійностійка; Т – титан; Г – гумовані покриття і т.д. Остання цифра відповідає номеру моделі.

Наприклад, типи центрифуг: ФАГ – фільтруюча автоматична горизонтальна; ФМН – фільтруюча маятникова з ножовим вивантаженням

осаду; ФГШ – фільтруюча горизонтальна зі шнековим вивантаженням осаду; НОГШ – відстійна горизонтальна зі шнековим вивантаженням осаду (безперервної дії); ОГНц(к) – відстійна горизонтальна з ножовим вивантаженням осаду та циліндричним (конічним) барабаном; АОГц(к) – автоматична відстійна горизонтальна з циліндричним (конічним) барабаном.