

669.2
Н 561



Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

Т. М. Нестеренко
О. С. Воденнікова

КОНСТРУКЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ КОЛЬОРОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Конспект лекцій

*для студентів ЗДІА
напряму навчання 6.050401 «Металургія»
(галузь знань 0504 «Металургія та матеріалознавство»)
денної та заочної форм навчання*

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

**КОНСТРУКЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ
КОЛЬОРОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ**

Конспект лекцій

для студентів ЗДІА

напряму навчання 6.050401 “Металургія”

(галузь знань 0504 «Металургія та матеріалознавство»)

денної та заочної форм навчання

*Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри металургії,
протокол № 6 від 01.06.2017 р.*

Запоріжжя
ЗДІА
2017

УДК 669.2
Н 561

Т. М. Нестеренко, к.т.н., доцент
О. С. Воденнікова, к.т.н., доцент

Відповідальний за випуск: *зав. кафедри металургії,
д.т.н., професор Ю. Ф. Терновий*

Нестеренко Т. М.

Н 561 Конструкції технологічних агрегатів кольорової металургії: Конспект лекцій для студентів ЗДІА напрямку навчання 6.050401 “Металургія” (галузь знань 0504 “Металургія та матеріалознавство”) денної та заочної форм навчання / Нестеренко Т. М., Воденнікова О. С.; Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2017. – 100 с.

Конспект лекцій призначений для студентів напрямку навчання 6.050401 “Металургія”, які вивчають дисципліну «Конструкції технологічних агрегатів кольорової металургії». Конспект лекцій містить теоретичні відомості щодо будови, принципу дії та розрахунку реакторів, апаратів і печей кольорової металургії, контрольні запитання, перелік рекомендованої літератури, глосарій.

ЗМІСТ

	с.
Вступ.....	5
1 Апарати гідрометалургійних процесів кольорової металургії.....	6
1.1 Апарати для вилуговування.....	6
1.1.1 Основні типи апаратів для вилуговування.....	6
1.1.2 Розрахунок продуктивності апарата для вилуговування.....	10
1.2 Апарати для перемішування рідких середовищ.....	12
1.2.1 Апарати для перемішування.....	12
1.2.2 Механічне перемішування розчинів і пульп.....	14
1.2.3 Розрахунок мішалки.....	18
1.3 Обладнання для розділення неоднорідних систем.....	24
1.3.1 Фільтри.....	24
1.3.2 Згущувачі.....	35
1.3.2 Центрифуги.....	42
1.4 Масообмінні апарати.....	45
1.4.1 Екстрактори та їх розрахунок.....	45
1.4.2 Апарати для йонного обміну.....	50
1.4.3 Апарати для цементації.....	52
1.5 Випарні апарати.....	54
1.5.1 Класифікація випарних апаратів.....	54
1.5.2 Розрахунок випарної установки.....	56
2 Агрегати пірометалургійного та електromеталургійного виробництв кольорової металургії.....	58
2.1 Загальна характеристика металургійних печей кольорової металургії.....	58
2.1.1 Елементи конструкції сучасних металургійних печей.....	58
2.1.2 Види нагрівання печей. Паливо та його характеристика.....	61
2.1.3 Вогнетривкі та теплоізоляційні матеріали.....	62
2.2 Полуменеві печі кольорової металургії.....	64
2.2.1 Стаціонарні відбивні печі.....	64

2.2.2 Короткобарабанна піч та її розрахунок.....	66
2.2.2.1 Будова і принцип дії короткобарабанної печі.....	66
2.2.2.2 Конструктивний розрахунок короткобарабанної печі.....	67
2.2.3 Шахтні печі.....	68
2.2.4 Трубчасті сушильні печі. Барабанні сушила.....	69
2.3 Індукційні печі. Печі опору.....	69
2.3.1 Індукційні тигельні печі.....	69
2.3.2 Індукційні каналні печі.....	71
2.3.3 Печі опору.....	73
2.4 Руднотермічні та електронно-променеві печі.....	77
2.4.1 Руднотермічні печі.....	77
2.4.2 Електронно-променеві печі.....	81
2.5 Електролізери для одержання та рафінування кольорових металів.....	82
2.5.1 Електролізери для одержання алюмінію.....	82
2.5.1.1 Типи електролізерів для одержання алюмінію.....	82
2.5.1.2 Конструктивні елементи електролізера.....	86
2.5.2 Електролізери для одержання магнію.....	90
2.5.3 Електролізери для рафінування алюмінію та магнію.....	93
2.5.3.1 Електролізери для рафінування алюмінію.....	93
2.5.3.2 Електролізери для рафінування магнію.....	94
Контрольні запитання.....	96
Глосарій.....	98
Перелік рекомендованої літератури.....	100

ВСТУП

Підприємства кольорової металургії використовують різноманітне як за призначенням, так і за будовою технологічне обладнання. На підприємствах галузі експлуатується близько 800 видів основного технологічного обладнання з декількома десятками тисяч підвидів.

Сучасному металургійному виробництву властиві значні вантажопотоки, безперервність роботи багатьох агрегатів, високий ступінь механізації і автоматизації, важкі умови роботи обладнання поєднані з агресивними середовищами, високими температурами, швидкостями і динамічними навантаженнями. Такі умови роботи визначають підвищені вимоги до металургійного обладнання, основними з яких є надійна і безаварійна робота, висока продуктивність, довговічність і ремонтпридатність, можливість зручного обслуговування та автоматизації.

Різнманітне технологічне обладнання металургійного виробництва можна класифікувати за різними ознаками. Агрегати кольорової металургії можна поділити за типом технологічних процесів, що відбуваються в них, на дві групи: апарати гідрометалургійних процесів; обладнання пірометалургійних і електрометалургійних процесів (тобто металургійні печі).

Завданням дисципліни “Конструкції технологічних агрегатів кольорової металургії” є ознайомлення студентів з основними типами технологічного обладнання кольорової металургії, елементами конструкцій і принципом дії.

Конспект лекцій містить теоретичні відомості щодо будови, принципу дії та розрахунку реакторів, апаратів і печей кольорової металургії.

1 АПАРАТИ ГІДРОМЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ КОЛЬОРОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Гідрометалургійні процеси полягають у видобуванні металів із сировини (руд, концентратів, виробничих напівпродуктів і відходів) за допомогою її оброблення рідкими розчинниками з подальшим виділенням металу або його хімічної сполуки.

1.1 Апарати для вилуговування

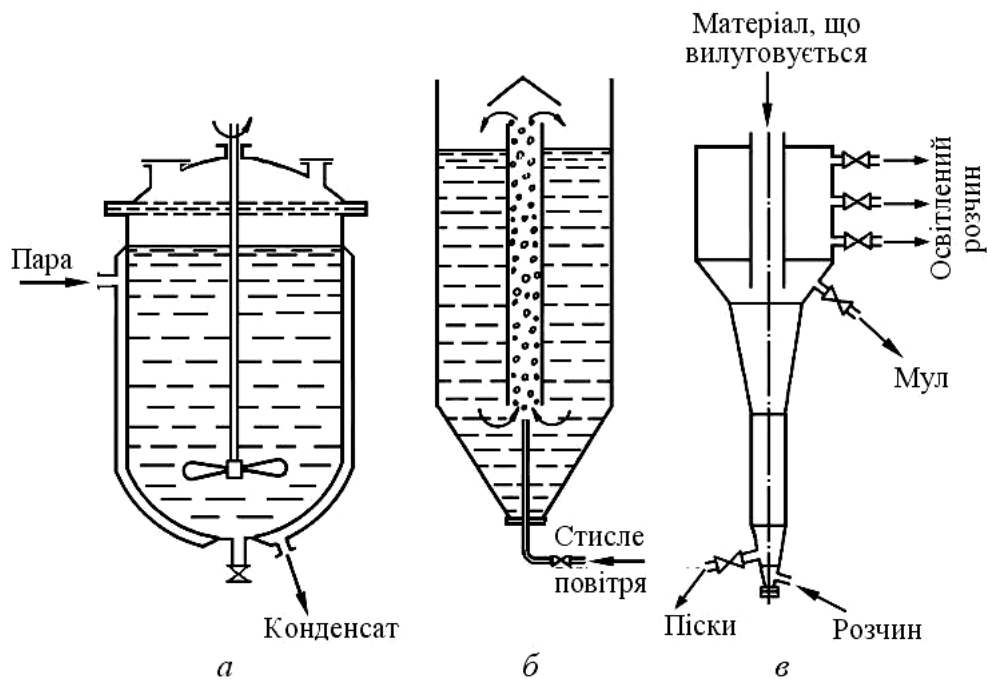
1.1.1 Основні типи апаратів для вилуговування

Призначення апаратів – полегшити контакт між твердим матеріалом і розчином протягом необхідного часу і за оптимальних для вилуговування умов. Тому апарат для вилуговування є реактором з пристроями для перемішування і нагріву пульпи, її завантаження і вивантаження. В реакторах для вилуговування пульпу підігрівають або безпосередньою подачею гріючої водяної пари в пульпу (так звана гостра пара), або за допомогою змійовиків чи парових сорочок (так звана глуха пара), якщо розбавлення пульпи конденсатом неприпустимо.

Для вилуговування застосовують перколятори, реактори з механічною мішалкою (агітатори) і пневматичною мішалкою (пачуки), реактори киплячого шару, автоклави та ін. У ряді випадків для вилуговування використовують кульові і стрижньові млини, що діють в замкнутому циклі з класифікаторами. У цих апаратах при заміні води розчином реагенту відбувається одночасно безперервне подрібнення твердого компонента та його вилуговування.

Поширеним типом апаратів для вилуговування є механічний *агітатор* – реактор з механічною мішалкою і паровою сорочкою або змійовиком для обігрівання (рис. 1.1 а). Діаметр агітаторів, як правило, дорівнює їх висоті. Після вилуговування продукти вивантажуються, і після очищення реактора цикл повторюється. Процес періодичний.

Замість механічного перемішування іноді застосовують аероліфтний пристрій, і такі реактори називають *пачуками* або пневматичними агітаторами (рис. 1.1 б). Пачуки є циліндричними чанами з конічним днищем (рис. 1.1 б).



а – агітатор; *б* – пачук; *в* – апарат для вилуговування в киплячому шарі

Рисунок 1.1 – Схеми апаратів для вилуговування

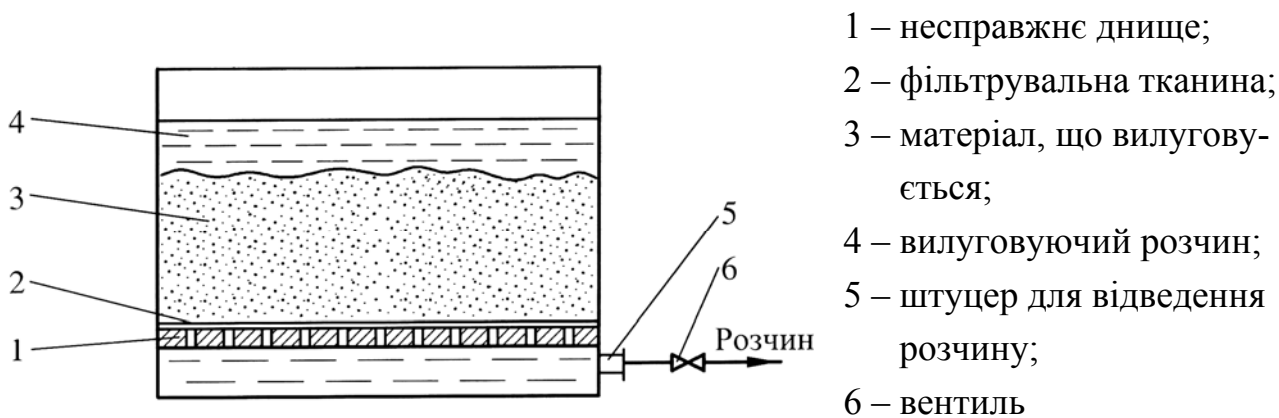


Рисунок 1.2 – Чан для вилуговування методом перколяції

Висота чана складає 6–10 м, діаметр 3–4 м, робочий об'єм 400–1000 м³. Дно чана виконано конічним для запобігання застою циркулюючої в ньому пульпи. В центрі чана знаходиться вертикальна труба – аероліфт, по якій знизу під тиском 0,20–0,25 МПа подають стисле повітря. При цьому утворюється легка суміш бульбашок повітря і пульпи, яка витісняється знизу важчою пульпою і викидається на поверхню пульпи. Із зовнішнього боку аероліфта важча, не

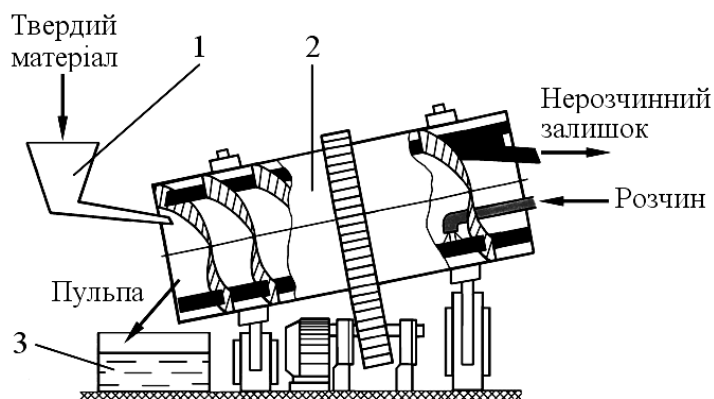
насичена повітрям, пульпа опускається і знову надходить в аероліфт. Внаслідок досягається інтенсивна циркуляція перемішуваної пульпи, яка сприяє перебігу основних процесів вилуговування.

В даний час все більшого поширення набувають високопродуктивні реактори для вилуговування в киплячому шарі – колонні апарати зі змінним перетином по висоті (рис. 1.1 в). Матеріал, що вилуговується, подається в них зверху, а вилуговуючий розчин – знизу. Під час руху розчину вгору швидкість його поступово зменшується. В результаті частинки твердого матеріалу на певній висоті реактора утворюють чітко виражений “киплячий” шар з інтенсивним масообміном.

Витягання металів з руд, легко доступних вилуговуванню при відносно крупних розмірах частинок, що допускають просочування розчину через значний шар руди, здійснюють в перколяторах – реакторах для вилуговування просочуванням, а також в трубчастих апаратах зі шнеком.

Чаном для перколяції є дерев’яний, металевий або залізобетонний реактор круглої форми заввишки 2–4 м, діаметром 10–12 м і більше (рис. 1.2). Усередині чана, на днищі знаходиться так зване несправжнє днище, що є дерев’яними ґратами, застеленими фільтрувальною тканиною (полотно або парусина), і прикритими зверху рогожевими або трав’яними матами. Несправжнє днище чана є фільтром. Розчини, що просочуються через нього, збираються на днищі чана і відводяться через патрубок, введений в борт чана.

При вилуговуванні у трубчастому барабані (рис. 1.3) твердий матеріал за допомогою спірального шнека просувається назустріч вилуговуючому розчину вздовж встановленого похило (під кутом 5°) горизонтального реактора, що обертається. Процес безперервний.



- 1 – бункер;
- 2 – трубчастий барабан зі шнеком;
- 3 – збірник для пульпи

Рисунок 1.3 – Установа для вилуговування з трубчастим апаратом

Для збільшення швидкості вилуговування шляхом підвищення температури або тиску газоподібного реагенту поширено вилуговування в спеціальних міцних герметичних реакторах – автоклавах (рис. 1.4), виготовлених з товстостінних сталевих листів. Автоклави можуть працювати при температурах до 300 °С і тиску до 8 МПа. Якщо вилуговування здійснюється періодично, то для перемішування автоклави забезпечують мішалками з приводом або застосовують безперервну подачу гострої пари. Якщо ж вилуговування відбувається безперервно в ланцюзі послідовно сполучених апаратів, то пульпа переміщується тільки гострою парою.

Автоклави можна поділити на дві групи:

а) горизонтальні багатокамерні автоклави – реактори, які розділяються перегородками на три...чотири секції, що сполучаються між собою, та мають турбінну мішалку і холодильник-змійовик в кожній секції (рис. 1.4, а). В них відбуваються процеси за участю газоподібних реагентів, призначення цих автоклавів – забезпечити вищу концентрацію газу в розчині;

б) вертикальні автоклави з обігрівом і перемішуванням гострою парою, в яких здійснюють процеси без участі газоподібного реагенту; їх призначення – забезпечити можливість проведення вилуговування при температурах більше 100 °С (рис. 1.4, б).

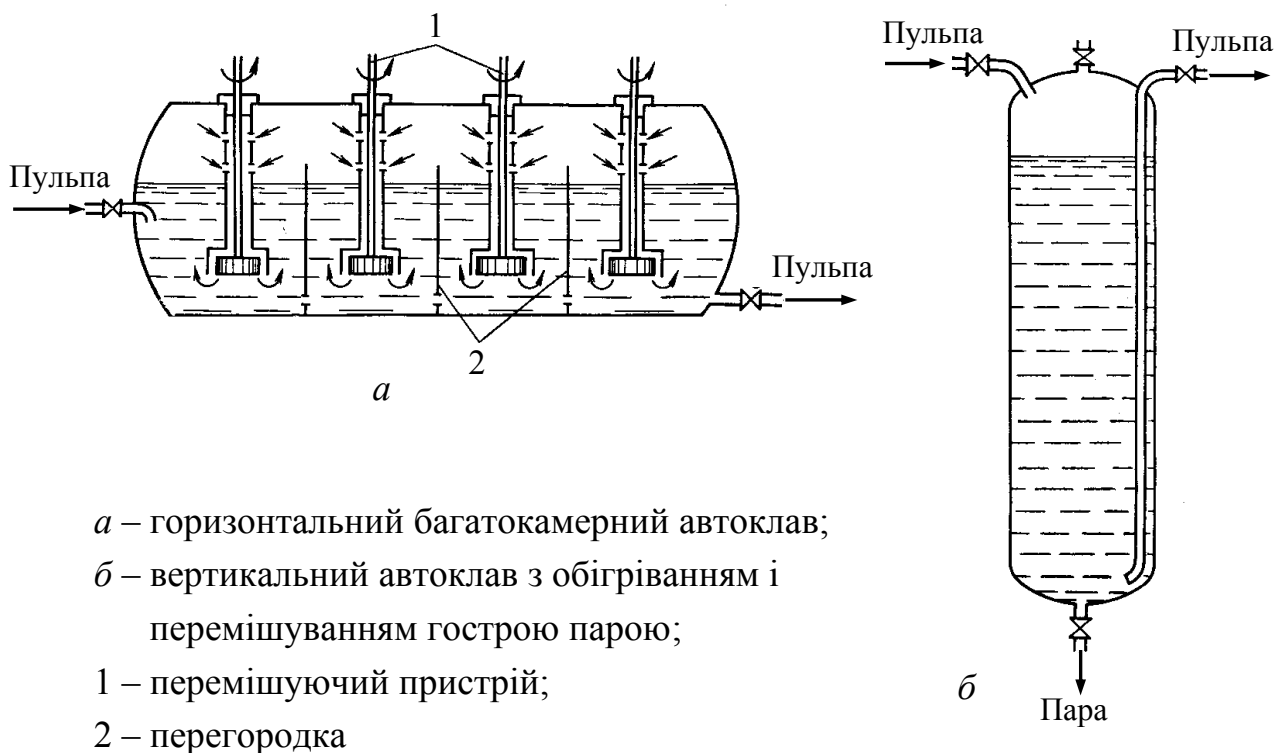
Режими вилуговування. За характером завантаження твердої речовини і рідини в часі розрізняють три режими вилуговування: періодичний, безперервний і напівбезперервний.

При *періодичному режимі* реагуючі речовини одноразово завантажуються в апарат і після певного часу контакту при перемішуванні продукти реакції вивантажуються.

Напівбезперервний режим характеризується одноразовим завантаженням і вивантаженням твердої фази і безперервною подачею і вивантаженням рідкої фази (наприклад, перколяція, купчасте і підземне вилуговування).

При *безперервному режимі* здійснюється безперервна подача в апарат або систему апаратів початкових речовин і безперервне вивантаження продуктів реакції. Використовують проточний апарат або каскад з послідовно сполучених апаратів, в яких здійснюється прямоточне або протиточне вилуговування. При безперервному прямоточному процесі початкові тверда і рідка фази одночасно поступають у перший апарат, проходять послідовно всі апарати каскаду і вивантажуються з останнього. При безперервному протиточному вилуговуванні

твердий матеріал і розчин рухаються назустріч один іншому. Таким чином, матеріал, найбільш збіднений витягуваним компонентом, контактує зі свіжим розчином (рис. 1.3). З погляду продуктивності процесу це найбільш раціональний спосіб, але його здійснення пов'язане з необхідністю розділяти фільтрацією тверду і рідку фази після кожного апарата.



- a* – горизонтальний багатокammerний автоклав;
- б* – вертикальний автоклав з обігріванням і перемішуванням гострою парою;
- 1 – перемішувач;
- 2 – перегородка

Рисунок 1.4 – Типи автоклавів

1.1.2 Розрахунок продуктивності апарата для вилуговування

При розрахунку продуктивності апарата для вилуговування будь-якого типу виходять з певних вимог до ступеня обробки. За заданих умов вилуговування час τ_0 , необхідний для досягнення заданого залишкового вмісту цінного компонента $C_{\text{зал}}$, визначають за кінетичною кривою $F(\tau)$, що виражає залежність вмісту металу, який вилуговується, у твердій фазі від часу.

При корисній місткості апарата V , тривалості вилуговування τ_0 і сумарному часі завантаження, вивантаження і виходу на режим $\Delta\tau$ продуктивність апарата по пульпі, який працює в періодичному режимі, визначають за формулою:

$$\omega = \frac{V}{\tau_0 + \Delta \tau},$$

де ω – продуктивність апарата по пульпі.

Максимальна продуктивність такого ж апарата, але безперервної дії, при заданому залишковому вмісті витягнуваного металу в твердій фазі $C_{\text{зал}}$ дорівнює:

$$\omega = \frac{V \cdot C_{\text{зал}}}{\int_0^{\tau_0} F(\tau) d\tau},$$

де τ_0 – час повного вилуговування;

$F(\tau)$ – функція, що відображає залежність залишкового вмісту металу в твердій фазі від тривалості вилуговування.

Методи вилуговування. Вибір методу вилуговування визначається характером руди і здатністю цільового компонента розчинятися в тому або іншому розчиннику. До основних методів відносяться вилуговування просочуванням (перколяція), бактеріальне вилуговування, підземне і купчасте вилуговування руди у відвалах і купах, агітаційне вилуговування (вилуговування перемішуванням), автоклавне вилуговування (вилуговування в автоклавах під тиском).

Вилуговування просочуванням (перколяція). Матеріал, що підлягає вилуговуванню, завантажують в чан з несправжнім днищем, покритим фільтрувальною тканиною (рис. 1.2). Розчин, що подається зверху, просочується через матеріал. Зазвичай чани працюють за принципом протитечії: свіжий матеріал завантажують в останній чан, слабкий розчин подають в перший чан, а потім перекачують в другий, третій і так далі до останнього, звідки відводять міцний розчин. Після закінчення вилуговування чани розвантажують і приступають до завантаження свіжої порції руди.

Перевагами методу є невелика витрата розчинника, можливість отримання концентрованих розчинів і відсутність дорогих операцій згущення і фільтрування. Процес придатний для пористих і зернистих матеріалів і не застосовується для матеріалів, схильних до злежування і утворення шару, що не фільтрується.

1.2 Апарати для перемішування рідких середовищ

1.2.1 Апарати для перемішування

Перемішування – обов’язкова умова успішного проведення багатьох найрізноманітніших технологічних операцій. При перемішуванні частинки рідини або сипучого матеріалу багаторазово переміщуються в об’ємі апарата одна відносно другої під дією імпульсу, що передається перемішуваному середовищу, від механічної мішалки або струменя рідини, пари або газу. Перемішування може також йти мимовільно, наприклад за рахунок дифузії. Мимовільне перемішування відбувається дуже повільно, тому в промисловості майже не застосовується.

Перемішування широко застосовується в металургійній промисловості для вилуговування та приготування розчинів і пульп. За допомогою перемішування досягається тісне зіткнення частинок та безперервне оновлення поверхні взаємодії речовин.

Цілі процесу перемішування:

- прискорення перебігу хімічних реакцій і процесів розчинення твердих речовин;

- забезпечення рівномірного розподілу твердих частинок в об’ємі рідини або забезпечення рівномірного розподілу і дроблення до заданої дисперсності газу або рідини в об’ємі рідини;

- інтенсифікація теплообмінних (нагрівання або охолодження) та масообмінних (дифузійних) процесів в гомогенних і гетерогенних середовищах.

В результаті перемішування можна отримувати однорідні розчини, емульсії і суспензії, пульпи.

Перемішування проводять як в реакційних апаратах (автоклавах), так і в спеціальних апаратах (апаратах з мішалками), а також в проміжних апаратах, у трубопроводах і сховищах.

Найбільшого поширення в промисловості набули наступні способи перемішування:

- пневматичне перемішування – барботаж газу або пари через рідке середовище;

- циркуляційне перемішування – багаторазове прокачування рідини (газу) через робочу зону за допомогою насосів або вентиляторів;

– механічне перемішування – лопатевими або іншими мішалками з обертальним (рідше – поступальним) їх рухом.

Крім того, для перемішування середовищ використовують і ряд інших прийомів: використання нерухомих турбулізаторів в потоці середовища, що підлягає перемішуванню; взаємодія перемішуваних середовищ (інжекція, зустрічні струмені); вібраційне і пульсаційне перемішування та ін.

Пневматичне перемішування здійснюється шляхом пропускання газу через шар перемішуваної рідини. Стислий газ (зазвичай повітря) поступає в апарат, наповнений рідиною. Газ розподіляється барботером, що є горизонтально розташованою у днища апарата перфорованою трубою. Для більш рівномірного розподілу газу за об'ємом апарата труби зігнуті по колу або спіралі. Іноді барботер виконують у вигляді ряду паралельних прямих труб. Газ, що виходить через отвори в трубах, перемішує рідину у вертикальному і горизонтальному напрямках.

Барботування можна здійснювати в апаратах будь-якої форми. Витрата енергії при барботуванні більша, ніж при механічному перемішуванні. Витрата стислого повітря під час барботування складає 0,4–1,0 м³/хв. залежно від потрібної інтенсивності перемішування. Перемішування повітрям можна застосовувати для рідких середовищ з в'язкістю до 0,2 Па·с.

Пневматичне перемішування найефективніше у випадку необхідності роботи з агресивними середовищами, коли інші перемішувачі пристрої (мішалки, насоси) швидко виходять з ладу. Спосіб економічно вигідний, коли необхідно окисляти середовище, що перемішується, або газ утворюється в результаті хімічної реакції і не знаходить застосування на виробництві.

Перевагами способу є простота схеми, висока інтенсивність перемішування. Недоліки – віднесення бризок та супутні йому втрати корисної рідини.

Циркуляційне перемішування здійснюється за допомогою насосів (відцентрових або пропелерних), розташованих зовні або всередині об'єму перемішуваного рідкого середовища (пульпи, суспензії, емульсії тощо). У першому випадку циркуляцію називають зовнішньою, в другому – внутрішньою.

Кратність циркуляції – це відношення секундної продуктивності циркуляційного насоса до об'єму рідини у апараті.

При зовнішньому циркуляційному перемішуванні рідина, що знаходиться

в апараті, забирається зовнішнім насосом і повертається в той же робочий об'єм в апараті. При внутрішній циркуляції робоче колесо відцентрового насоса (без корпусу) засмоктує і викидає рідину по його периферії, залучаючи до руху весь робочий об'єм рідини. У обох варіантах циркуляційного перемішування багаторазове прокачування рідкого середовища через робочий об'єм приводить до вирівнювання властивостей цього середовища в різних частинах апарата.

У разі перемішування в'язких рідин і густих пульп витрати енергії істотно зростають (перш за все через швидке збільшення потрібних кратностей циркуляції). Це приводить до помітного дорожчання циркуляційного перемішування порівнянно з використанням механічних мішалок. Не можна також ігнорувати можливу корозію трубопроводів і апаратури, що спричиняється циркулюючою під натиском рідиною.

Достоїнствами циркуляційного перемішування є простота схеми, висока інтенсивність перемішування.

Механічне перемішування в рідкому середовищі здійснюється за допомогою мішалок різного типу. Мішалка найчастіше є комбінацією лопатей, насаджених на вал, що обертається. Лопаті мішалок можуть мати різноманітну геометричну форму, яка визначає назву мішалки.

1.2.2 Механічне перемішування розчинів і пульп

Механічні перемішувачі пристрої складаються з мішалки, вала і приводу. Мішалка є робочим органом пристрою, її закріплюють на вертикальному, горизонтальному або похилому валу. Привід здійснюється безпосередньо від електродвигуна (для швидкохідних мішалок) або через редуктор або клинопасову передачу.

Робота апарата з мішалкою залежить не тільки від типу і конструкції перемішувачого пристрою, але і від типу посудини, в якій воно встановлено. Дія мішалки в апараті з відбивними перегородками буде зовсім іншою, ніж в апараті без перегородок, і т.д.

Обертальний рух рідини спричиняється тим, що лопаті мішалки чинять тиск на рідину певною частиною своєї поверхні.

Мішалки умовно ділять на групи, що створюють окружний (тангенціальний) потік – це лопатеві і якірні мішалки; радіальний потік – деякі типи турбінних мішалок; осьовий потік – пропелерні мішалки.

Мішалки, що обертаються, зазвичай встановлюють в апаратах циліндричної форми з плоским або еліптичним днищем. У прямокутних посудинах такі мішалки не забезпечують повного перемішування за всією площею посудини: у них утворюються застійні зони. У апаратах з опуклими днищами перемішування краще, ніж в апаратах, що мають плоскі днища.

Мішалки, що обертаються, розділяються на:

– тихохідні – частота обертання 15–80 об/хв, окружна швидкість на кінцях лопатей близько 1 м/с (листові, рамні, лопатеві, якірні мішалки);

– швидкохідні – частота обертання 100–1800 об/хв, окружна швидкість близько 10 м/с (дисккові, пропелерні та турбінні).

Листові мішалки прості у виготовленні і достатньо ефективні при перемішуванні рідин незначної в'язкості (не більше 0,05 Па·с). Вони застосовуються при процесах розчинення, розбавлення, прискорення деяких хімічних реакцій, при теплообмінних процесах.

В деяких випадках для розтину рідини на окремі струмені (для посилення ефекту перемішування) у лопатях роблять декілька несиметрично розташованих отворів.

Лопатеві мішалки (рис. 1.5, поз. 1–5) прості за конструкцією і зручні в монтажі. Їх застосовують для перемішування середовищ середньої в'язкості (7–10 Па·с) і для розмішування легких суспензій, а також для підтримки таких суспензій у зваженому стані.

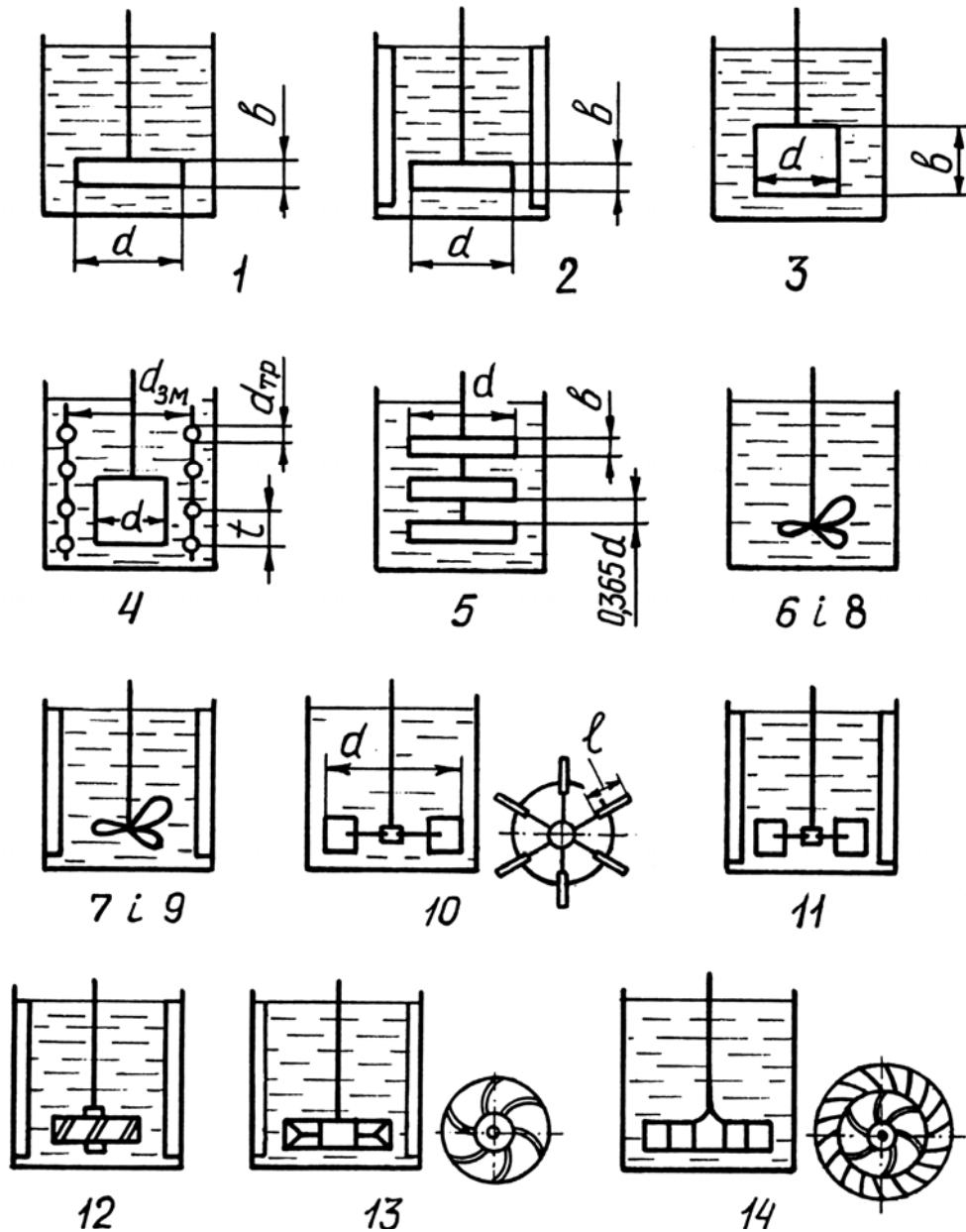
Для посилення ефективності перемішування апарат можна обладнати відбивними перегородками – вертикальними планками, що прикріплюються до стінок. Ширина перегородок зазвичай складає 0,10–0,12 діаметра апарата.

Недоліком лопатевих мішалок є низька інтенсивність перемішування (вони створюють головним чином периметричну циркуляцію рідини). Проте вони поширено застосовуються в металургії через простоту пристрою і низьку вартість.

Якірні мішалки застосовують для перемішування в'язких (1,0–1,5 Па·с, а іноді і більше) і застигаючих рідин.

Частота обертання якірної мішалки приймається зазвичай 20–80 об/хв (0,33–1,33 с⁻¹). Форма якірної мішалки повторює профіль днища апарата.

Рамні мішалки – різновид якірних мішалок. Вони складаються з горизонтальних і вертикальних, а іноді і похилих елементів.



1, 3 – дволопатеві без перегородок; 2 – дволопатева з перегородками; 4 – дволопатева з змійовиком; 5 – шестилопатева без перегородок; 6, 8 – пропелерні без перегородок; 7, 9 – пропелерні з перегородками; 10 – відкрита турбінна з плоскими вертикальними лопатками та без перегородок; 11 – відкрита турбінна з плоскими вертикальними лопатками та з перегородками; 12 – відкрита турбінна з плоскими похилими лопатками та з перегородками; 13 – закрита турбінна з лопатками та з перегородками; 14 – закрита турбінна з лопатками і направляючим апаратом (статором) з лопатками та без перегородок

Рисунок 1.5 – Основні типи мішалок

Рамні мішалки встановлюються в апаратах місткістю 100 м³ і більше. Вони застосовуються для тих же середовищ, що й якірні мішалки.

Дискові мішалки застосовують для перемішування в'язких рідин. Плоска дискова мішалка забезпечена розведеними по черзі вгору і вниз зуб'ями.

При швидкому обертанні мішалка залучає до руху прилеглі до неї поверхневі шари рідини. Поступово цей рух розповсюджується, і через деякий час вся рідина приходить в обертання.

У одному апараті встановлюють по декілька дисків на одному валу. Об'єм перемішуваної рідини зазвичай не перевищує 4 м³. Окружна швидкість дисків складає 10–35 м/с.

Дискові мішалки використовують при проведенні багатьох безперервних процесів, наприклад для екстракції.

Пропелерні мішалки (рис. 1.5, поз. 6–9) застосовуються для перемішування рідин з в'язкістю близько 3,6–4,0 Па·с. Вони працюють при високих частотах обертання (400–1800 об/хв, тобто 6,5–30 с⁻¹).

Така мішалка створює інтенсивне перемішування внаслідок нерівності швидкостей струменів рідини в різних перетинах апарата і завдяки багаторазовій зміні напрямку їх руху під час удару об днище апарата та об вільну поверхню рідини.

Пропелерні мішалки знаходять дуже широке застосування: перемішування рідин різної в'язкості, приготування емульсій, каламучення рідин, що містять твердий осад, проведення хімічних реакцій. Вважають, що вони придатні при об'ємі перемішуваної рідини до 7 м³.

Пропелерні мішалки слід встановлювати в апаратах тільки з опуклим днищем, при плоскому днищі в апараті утворюються застійні зони (окрім мішалок з горизонтальними валами). Пропелерні мішалки встановлюються на вертикальних, похилих і горизонтальних валах. На одному валу, залежно від глибини посудини і властивостей перемішуваної рідини, встановлюють одну, дві або три мішалки.

Іноді для поліпшення циркуляції рідини, пропелер укладають в коротку трубу (дифузор). Дифузори застосовують іноді і для мішалки, що посаджена на горизонтальному валу.

Для посилення циркуляції рідини апарати з вертикальними пропелерними мішалками можуть обладнуватися відбивними перегородками.

Турбінні мішалки застосовують для перемішування рідин як малої, так і

великої в'язкості (до 20 Па·с). Їх використовують для швидкого розчинення, емульгування, диспергування, перемішування суспензій, взмучування осадів, абсорбції газів, а також інтенсифікації теплопередачі.

При роботі в турбулентному режимі споживана турбінними мішалками потужність практично не залежить від в'язкості перемішуваної рідини, тому вони особливо придатні для роботи з рідинами, в'язкість яких змінюється протягом перемішування.

Турбінні мішалки працюють за принципом відцентрового насоса, тобто всмоктують рідину в середину і за рахунок відцентрової сили викидають її до периферії. Частота обертання турбінних мішалок дуже висока – від 400 до 2000 об/хв (тобто 6,5–35 с⁻¹). Турбінні мішалки забезпечені лопатками і мають чітко обкреслений ротор. Їх роблять відкритими і закритими, з нерухомим направляючим апаратом (статором) або без нього.

Відкрита турбінна мішалка (рис. 1.5 поз.10, 11) є диском з радіальними лопатками. На рис. 1.5, поз. 13 показана закрита турбіна також з прямими радіальними лопатками. Рідина поступає зверху і знизу на лопатки і потім викидається в радіальному напрямі. Турбінна мішалка з направляючим апаратом зображена на рис. 1.5, поз. 14. Завдяки статору зміна напрямку рідини від вертикального до горизонтального (радіального) здійснюється повільно, і радіальний потік зберігає більшу швидкість, завдяки чому досягає віддалених частин апарата. За наявності статора воронка на поверхні перемішуваної рідини не утворюється, тоді як при роботі турбінних мішалок, що не мають статора, можливо утворення воронки навіть за наявності відбивних перегородок.

Турбінна мішалка добре перемішує шар рідини на глибину, рівну діаметру апарата. Турбінні мішалки є найбільш складними і мають найбільшу вартість зі всіх описаних конструкцій.

1.2.3 Розрахунок мішалки

Потужність, споживана пристроєм, що перемішує, залежить від багатьох факторів: форма і розміри апаратів і перемішуючих органів, наявність перешкод: змійовиків, гільз для термометрів, труб, відбивних перегородок і т.п. Визначення потужності, що витрачається при механічному перемішуванні, є одним зі складних завдань гідродинаміки.

Методи і розрахункові формули, прийняті в даний час для визначення потужності, ще не можуть вважатися досить повними. При проведенні технологічних процесів перемішуване середовище може змінювати температуру і фізичні властивості (густина, в'язкість), що відбивається на потужності, яка споживається мішалкою. Тому у відповідальних випадках результати розрахунків перевіряють на лабораторних і пілотних установках.

Потужність, споживану мішалкою, можна розрахувати, розглядаючи роботу мішалки як роботу насоса:

$$N = V_{сек} \cdot \Delta P, \quad (1.1)$$

де N – потужність, споживана мішалкою, Вт;

$V_{сек}$ – витрата рідини, що протікає через мішалку, м³/с;

ΔP – тиск, створюваний мішалкою, Па.

Витрату рідини $V_{сек}$ можна обчислити, припускаючи, що рідина проходить через бічну поверхню циліндра з діаметром, рівним діаметрові мішалки d , і висотою, рівною висоті лопаті мішалки b , зі швидкістю, пропорційною окружній швидкості кінця лопаті мішалки:

$$V_{сек} \sim \pi \cdot d \cdot b \cdot \omega \sim n \cdot d^3, \quad (1.2)$$

де $\omega = \pi \cdot n \cdot d$ – окружна швидкість мішалки, м/с;

d – діаметр лопаті мішалки, м;

n – частота обертання мішалки, об/с.

Таким чином, витрата рідини, що протікає через мішалку, пропорційна добуткові куба діаметра мішалки на частоту обертання n . Висоту мішалки b можна виразити через діаметр мішалки d , тому що для нормалізованих мішалок відношення b/d є визначеним і рівним 0,1; 0,2 і т.д.

Тиск ΔP , створюваний мішалкою, пропорційний динамічному тискові:

$$\Delta P \sim \rho \cdot \omega^2 \sim \rho \cdot n^2 \cdot d^2, \quad (1.3)$$

де ρ – густина рідини, яку перемішують, кг/м³.

Тоді за формулою (1.1) одержимо:

$$N \sim \rho \cdot n^3 \cdot d^5. \quad (1.4)$$

Таким чином, з порівняння формул (1.1) і (1.4) випливає, що номінальна потужність, споживана мішалкою, може бути розрахована за рівнянням:

$$N = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5, \quad (1.5)$$

де K_N – безрозмірний комплекс, що називається критерієм потужності.

Величину K_N визначають залежно від типу мішалки (рис. 1.2) та режиму руху рідини, що перемішується, по таблицях або графіках $K_N = f(Re)$, побудованих за дослідними даними (рис. 1.6).

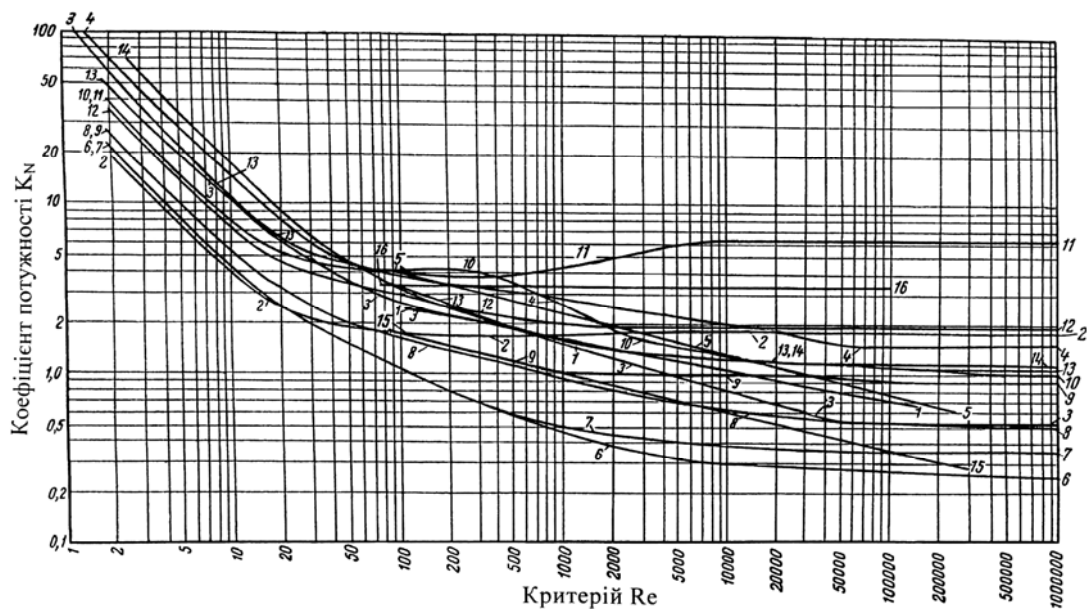


Рисунок 1.6 – Залежність коефіцієнта потужності K_N від критерію Re для мішалок різних типів (цифри відповідають номерам мішалок у табл.1.1)

Величина критерію Рейнольдса для будь-якої мішалки (табл. 1.1) визначається за формулою:

$$Re = \frac{\rho \cdot \omega \cdot d}{\mu} = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu}, \quad (1.6)$$

де μ — динамічна в'язкість рідини, Па·с.

На рис.1.6 наведені дослідні значення K_N як функції від критерію Re для мішалок різних типів при обумовлених відношеннях діаметра D посудини,

висоти H рівня рідини, ширини b лопаті та діаметра d лопаті мішалки (D/d , H/D , b/d), а також для пропелерних мішалок при відношенні кроку гвинта до діаметра посудини s/d , що дорівнює 1 або 2. За рис. 1.6 знаходять значення K_N , та підставляючи його до формули (1.5), визначають потрібну потужність.

Однак величини K_N , одержані за графіком, будуть точними тільки для мішалок, геометрично подібних тим (табл. 1.1), до яких відносяться дослідні дані. Тому, у випадку відсутності геометричної подібності, значення K_N , що знайдено за рис. 1.6, треба помножити на відповідні поправочні коефіцієнти:

$$\begin{aligned}
 f_D &= \left(\frac{D}{\alpha \cdot d} \right)^a, & f_b &= \left(\frac{b}{\beta \cdot d} \right)^k, \\
 f_l &= \left(\frac{l}{0,25 \cdot d} \right)^m, & f_t &= \left(\frac{t}{0,1 \cdot D} \right)^r, \\
 f_H &= \left(\frac{H}{D} \right)^h, & f_s &= \left(\frac{s}{d} \right)^p, & f_N &= \left(\frac{N}{4} \right)^n,
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

де $\alpha = D/d$ – для модельної мішалки (табл. 1.1);

$\beta = b/d$ – для модельної мішалки (табл. 1.1);

b і l – ширина та довжина лопаті, м;

t – ширина перегородки, м;

N – кількість перегородок.

Значення показників степенів у рівняннях поправочних коефіцієнтів (1.7) можна приймати за табл. 1.2.

При наявності в апараті додаткового обладнання (змійовиків, труб та інше), а також при великій шершавості стінок посудини витрата енергії на перемішування збільшується. Орієнтовно можна використовувати такі поправочні коефіцієнти до значення K_N :

гільза для термометра $f_r = 1,1$;

Таблиця 1.1 – Характеристики мішалок та посудин

№	Тип мішалки	Характеристика мішалки при $H/D = 1$			Характеристика посудини
		$\alpha = D/d$	$\beta = b/d$	s/d	
1	Дволопатова	3	0,25	–	Без перегородок
2	Дволопатова	3	0,167	–	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
3	Дволопатова	2	0,885	–	Без перегородок
4	Дволопатова	2	0,885	–	3 змійовиком ($t=0,12 \cdot d$, $d_{3M}=1,9 \cdot d$, $d_{TP}=0,066 \cdot d$)
5	Шестилопатова	1,11	0,066	–	Без перегородок
6	Пропелерна	3	–	1	Без перегородок
7	Пропелерна	3	–	1	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
8	Пропелерна	3	–	2	Без перегородок
9	Пропелерна	3	–	2	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
10	Відкрита турбінна з 6 плоскими вертикальними лопатками	3	0,2 ($l/d=0,25$)	–	Без перегородок
11	Відкрита турбінна з 6 плоскими вертикальними лопатками	3	0,2 ($l/d=0,25$)	–	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
12	Відкрита турбінна з 8 плоскими похилими лопатками	3	0,125 ($l/d=0,25$)	–	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
13	Закрита турбінна з 6 лопатками	3	–	–	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
14	Закрита турбінна з 6 лопатками та направляючим апаратом (статором) з 6 лопатками	3	–	–	Без перегородок

Примітка. Номер типу відповідає цифрі під схемою мішалки на рис. 1.5.

Таблиця 1.2 – Значення показників степенів у формулах (1.7)

Тип мішалки	Показник ступеня						
	<i>a</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>m</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>n</i>
Лопатеві без перегородок	1,1	0,6	0,3	–	–	–	–
Лопатеві з перегородками	1,1	0,6	0,3	–	–	0,3	0,4
Пропелерні без перегородок	0,93	0,6	–	–	1,0	–	–
Пропелерні з перегородками	0	0	–	–	1,7	0,3	0,4
Турбінні без перегородок	0,93	0,6	1,0	1,5	–	–	–
Турбінні з перегородками	0	0	1,0	1,5	–	0,3	0,4

труба $f_{TP} = 1,2$;

посудина з шершавими стінками $f_{III} = 1,1 - 1,2$.

При пуску мішалки в рух енергія витрачається не тільки на подолання тертя, а також й на виведення рідини зі стану спокою, тобто на подолання сил інерції. Однак пускова потужність перевищує робочу не більш, як у двічі та витрачається протягом короткого часу. Відповідно тому електродвигун завжди вибирають за робочою потужністю мішалки N_p , враховуючи можливість короткочасного збільшення моменту кручення на валі електродвигуна.

Розглядаючи рух рідини в апараті з мішалкою як окремий випадок явища руху рідини, для опису процесу при сталому режимі можна скористатися загальним критеріальним рівнянням:

$$E_U = \varphi(\text{Re}, \text{Fr}, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots),$$

де $E_U = \Delta P / (\rho \cdot \omega^2)$ – критерій Ейлера (міра відношення сил тиску до сил інерції);

$\text{Re} = \rho \cdot \omega \cdot d / \mu$ – критерій Рейнольдса (міра відношення сил інерції до сил в'язкості);

$\text{Fr} = \omega^2 / (g \cdot d)$ – критерій Фруда (міра відношення сил інерції до сили ваги);

$\Gamma_1, \Gamma_2, \dots$ – симплекси геометричної подоби;

ΔP – втрати тиску, Н/м²;

μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с;

g – прискорення вільного падіння, що дорівнює 9,81 м/с².

Оцінку режиму руху рідини, що переміщується, виконують за допомогою безрозмірного комплексу величин, який називається відцентровим критерієм

Рейнольдса $Re_{ц}$ (за формулою (1.6), у якому швидкість рідини виражена через частоту обертання мішалки і її діаметр). Вважають, що критичне значення цього критерію $Re_{ц} \approx 50$.

Якщо число Рейнольдса для даної мішалки менше 50, то це значить, що рідина перемішується недостатньо інтенсивно і спостерігається так званий *ламінальний режим* її руху. При ламінарному гідродинамічному режимі частинки рідини рухаються паралельно одна одній в напрямку руху потоку, не переходячи з одного шару рідини в інший.

При значеннях числа Рейнольдса більше 50 інтенсивність перемішування зростає. У рідині виникають вихори, що хаотично переміщуються в об'ємі рідини, що рухається, і хаотичне перемішування окремих шарів. Такий гідродинамічний режим має назву *турбулентний*. Саме він забезпечує вимушену циркуляцію потоку в апараті.

При значеннях числа Рейнольдса більше 10000 вимушена циркуляція забезпечує в апараті з мішалкою інтенсивну тримірну течію всієї маси рідини (наступає *розвинений турбулентний режим*).

1.3 Обладнання для розділення неоднорідних систем

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.

1.3.1 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 ρ – густина рідкої фази (суспензії), кг/м³;

g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

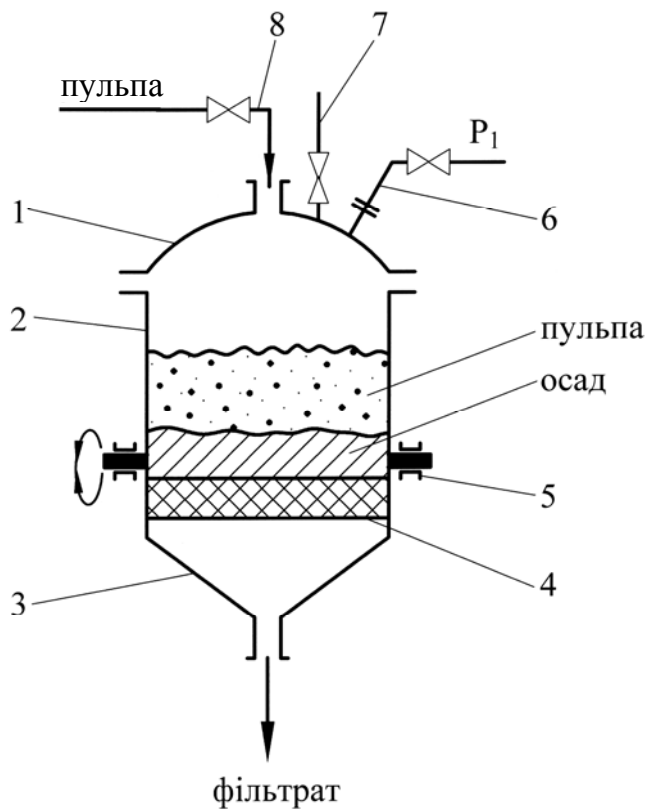
h – висота стовпа рідини над перегородкою, м.

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° навколо горизонтальної осі).

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 тис-



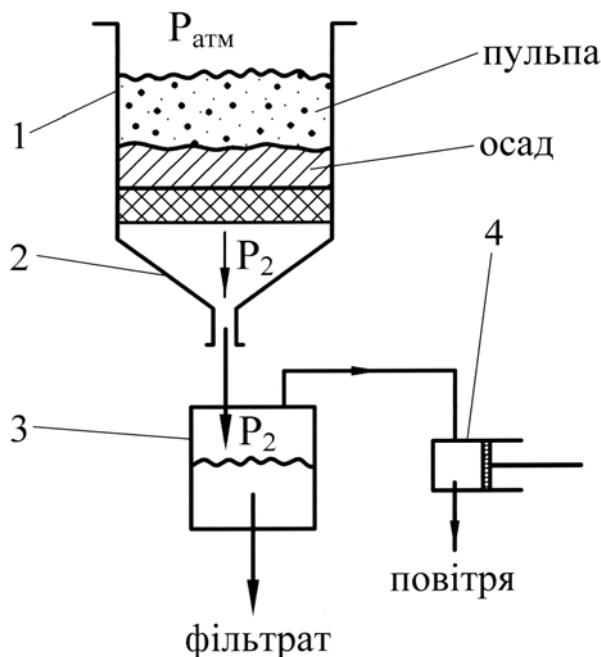
1 – кришка;
 2 – циліндричний корпус;
 3 – днище;
 4 – фільтрувальна перегородка;
 5 – поворотний пристрій;
 6 – лінія високого тиску;
 7 – лінія скидання тиску;
 8 – лінія подачі суспензії

Рисунок 1.7 – Схема друк-фільтра

ком 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 $P_{атм}$) 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.



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

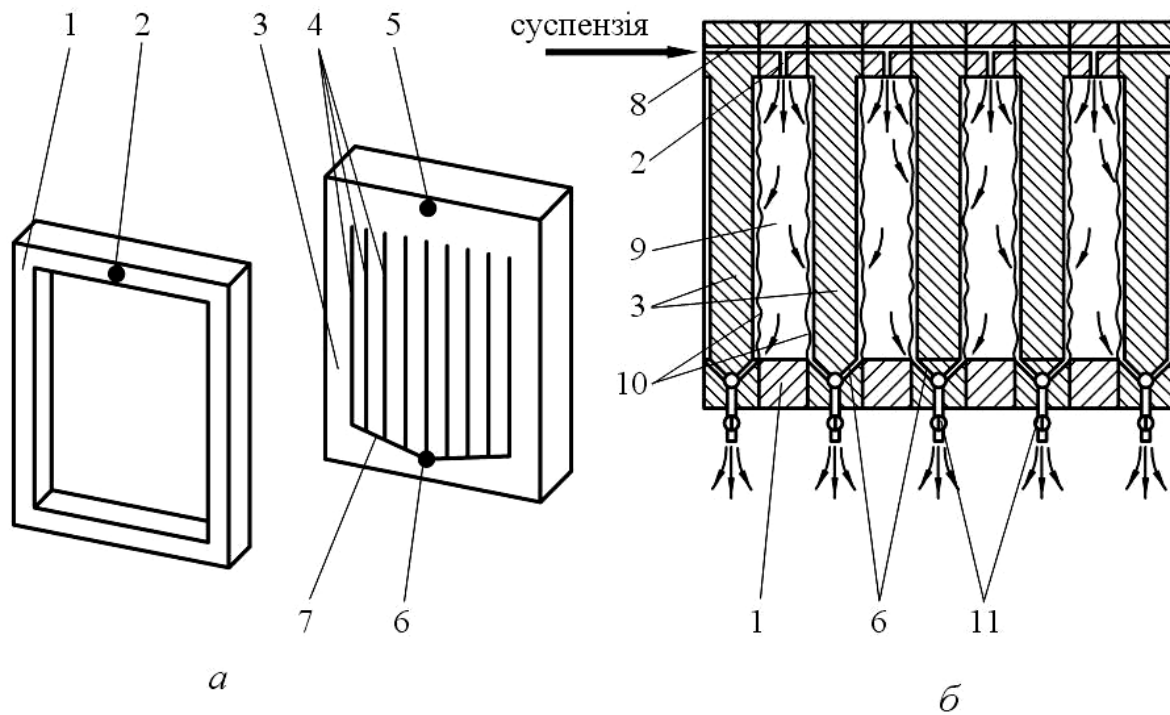
Рисунок 1.8 – Схема нутч-фільтра

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.

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



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

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 відповідні 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^2 , 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.

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.

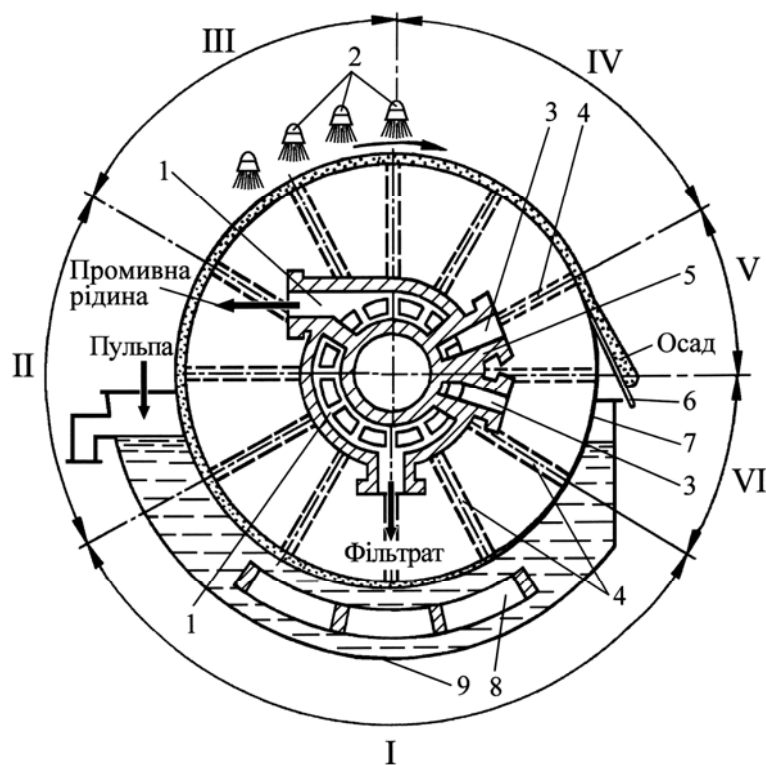
До поширених безперервно діючих фільтрів відносяться барабанні, дискові і стрічкові вакуум-фільтри.

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.

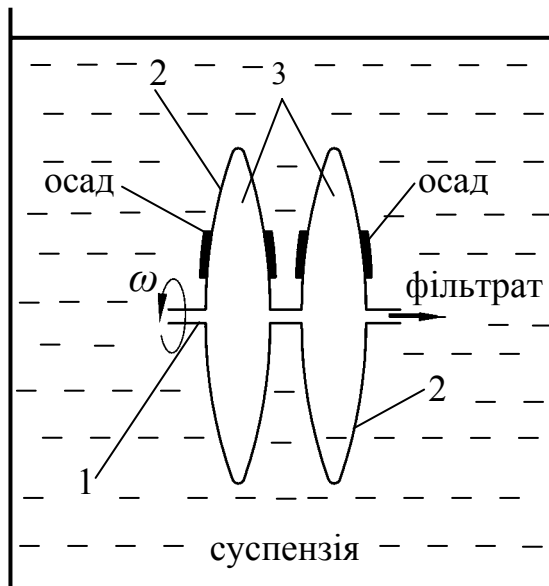


- 1 – порожнини розподільного пристрою, що сполучаються з джерелом вакууму; 2 – розбризкуючий пристрій для промивної рідини;
 3 – порожнини розподільного пристрою, що сполучаються з джерелом стислого повітря; 4 – комірка зі сполучною трубкою; 5 – розподільний пристрій; 6 – ніж для зрізування осаду; 7 – 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 м² 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 м².

1.3.2 Згущувачі

1.3.2.1 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*:

$$\omega_{oc} = d^2 \cdot (\rho_{тв} - \rho_{ж}) \cdot g / (18 \cdot \mu_{см}), \quad (1.8)$$

де ω_{oc} – швидкість вільного осадження частинок, м/с;

d – діаметр частинки, м;

$\rho_{тв}$, $\rho_{ж}$ – густина твердої фази та чистої рідини відповідно, кг/м³;

g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

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

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

при $\varphi \leq 0,1$

$$\mu_{см} = \mu_c \cdot (1 + 2,5 \cdot \varphi), \quad (1.9)$$

при $\varphi > 0,1$

$$\mu_{см} = \mu_c \cdot (1 + 4,5 \cdot \varphi), \quad (1.10)$$

де φ – об’ємна концентрація твердої фази у суміші, частки;

μ_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 (1.8) при підстановці в нього значення швидкості з виразу критерію Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega_{oc} \cdot d \cdot \rho_{жс}}{\mu_{см}} \quad (1.11)$$

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

$$d_{\max} = \sqrt[3]{\frac{1,85 \cdot 18 \cdot \mu_c^2}{\rho_{жс} \cdot (\rho_{тв} - \rho_{жс}) \cdot g}} \quad (1.12)$$

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:

$$Re = a \cdot Ar^n, \quad (1.13)$$

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:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho_{тв} - \rho_{жс}) \cdot \rho_{жс} \cdot g}{\mu_c^2}, \quad (1.14)$$

при $Ar \leq 36$

$$Re = Ar/18 = 0,056 \cdot Ar, \quad (1.15)$$

при $36 < Ar \leq 8,3 \cdot 10^4$

$$Re = 0,152 \cdot Ar^{0,715}, \quad (1.16)$$

при $Ar > 8,3 \cdot 10^4$

$$Re = 1,74 \cdot \sqrt{Ar}. \quad (1.17)$$

Швидкість осадження частинок некулястої форми ω'_{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):

$$\omega'_{oc} = \psi \cdot \omega_{oc} . \quad (1.18)$$

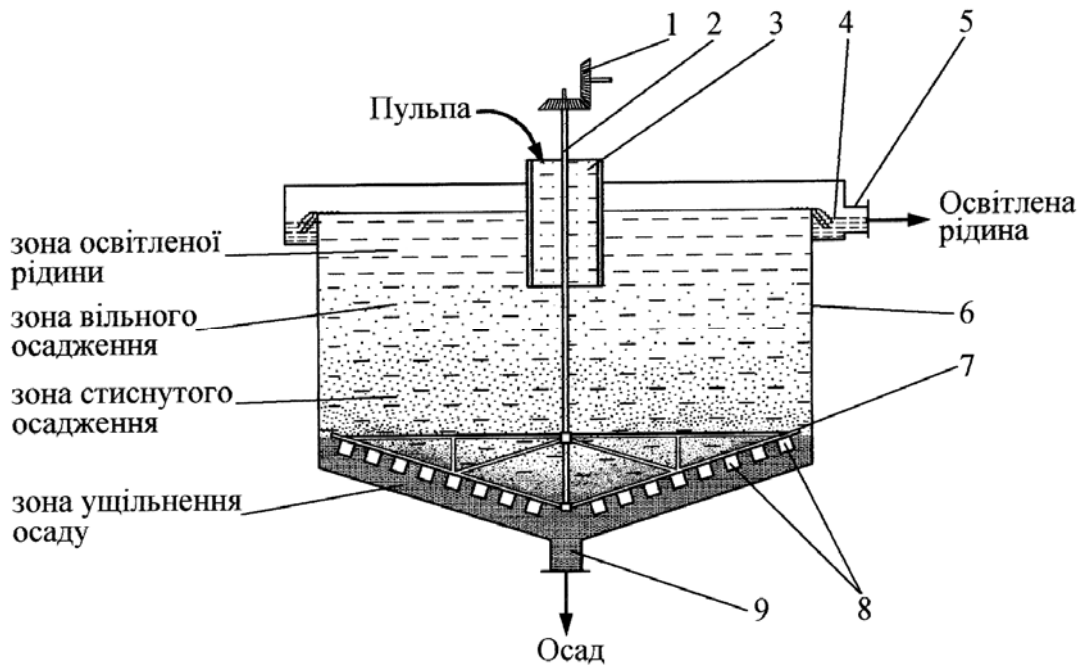
Приведені рівняння відносяться тільки до вільного осадження частинок. Вони дозволяють робити висновки про вплив основних фізичних чинників на осадження.

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 ω_{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 ω_{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 $\varepsilon \leq 0,7$

$$\omega_{cm} = 0,123 \cdot \omega_{oc} \cdot \psi \cdot \frac{\varepsilon^3}{1 - \varepsilon}, \quad (1.19)$$

при $\varepsilon > 0,7$

$$\omega_{cm} = \omega_{oc} \cdot \psi \cdot \varepsilon^2 \cdot 10^{-1,82 \cdot (1-\varepsilon)}, \quad (1.20)$$

де ω_{oc} – швидкість вільного осадження частинок, м/с;

ε – об'ємна частка рідини в суміші;

ψ – коефіцієнт форми частинок, який визначається за дослідними даними.

Для визначення об'ємної частки рідини в суміші ε застосовують співвідношення:

$$\varepsilon = 1 - x_{cm} \cdot \rho_{cm} / \rho_{тв}, \quad (1.21)$$

де ρ_{cm} – густина суміші, кг/м³;

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

Густину суміші ρ_{cm} можна визначити за формулою:

$$\rho_{cm} = \frac{1}{\frac{x_{cm}}{\rho_{тв}} + \frac{1-x_{cm}}{\rho_{ж}}}, \quad (1.22)$$

де ρ_{cm} – густина суміші, кг/м³;

$\rho_{ж}$ – густина чистої рідини, кг/м³.

1.3.2.2 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 шламового 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. 1.3.

Таблиця 1.3 – 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 ²	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 сфлоккульованої 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:

$$F_{oc} = K_3 \cdot \frac{G_{cm}}{\rho_{ocv} \cdot \omega_{cm}} \cdot \left[\frac{x_{oc} - x_{cm}}{x_{oc} - x_{ocv}} \right], \quad (1.23)$$

де F_{oc} – поверхня осадження (площа поперечного перетину апарата), м²;

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 $K_3 = 1,30-1,35$);

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

$\rho_{осв}$ – густина освітленої рідини, кг/м³;

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

$x_{см}$, $x_{ос}$, $x_{осв}$ – вміст твердих частинок у вихідній суміші, осаді та проясненій рідині відповідно, частка.

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

$$F_{ос} = \frac{1,33 \cdot G_{см} \cdot (1 - x_{см}/x_{ос})}{\rho_{осв} \cdot \omega_{см}}. \quad (1.24)$$

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

$$\tau_{сер} = F_{ос} \cdot h / G_{см.г}, \quad (1.25)$$

де $G_{см.г}$ – годинна продуктивність по пульпі, м³/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

$$\tau = h / \omega_{см}. \quad (1.26)$$

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

$$F_{ос} = G_{см} / \omega_{см}. \quad (1.27)$$

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

$$G_{см} = F_{ос} \cdot \omega_{см}. \quad (1.28)$$

1.3.3 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 м³) 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/м³;

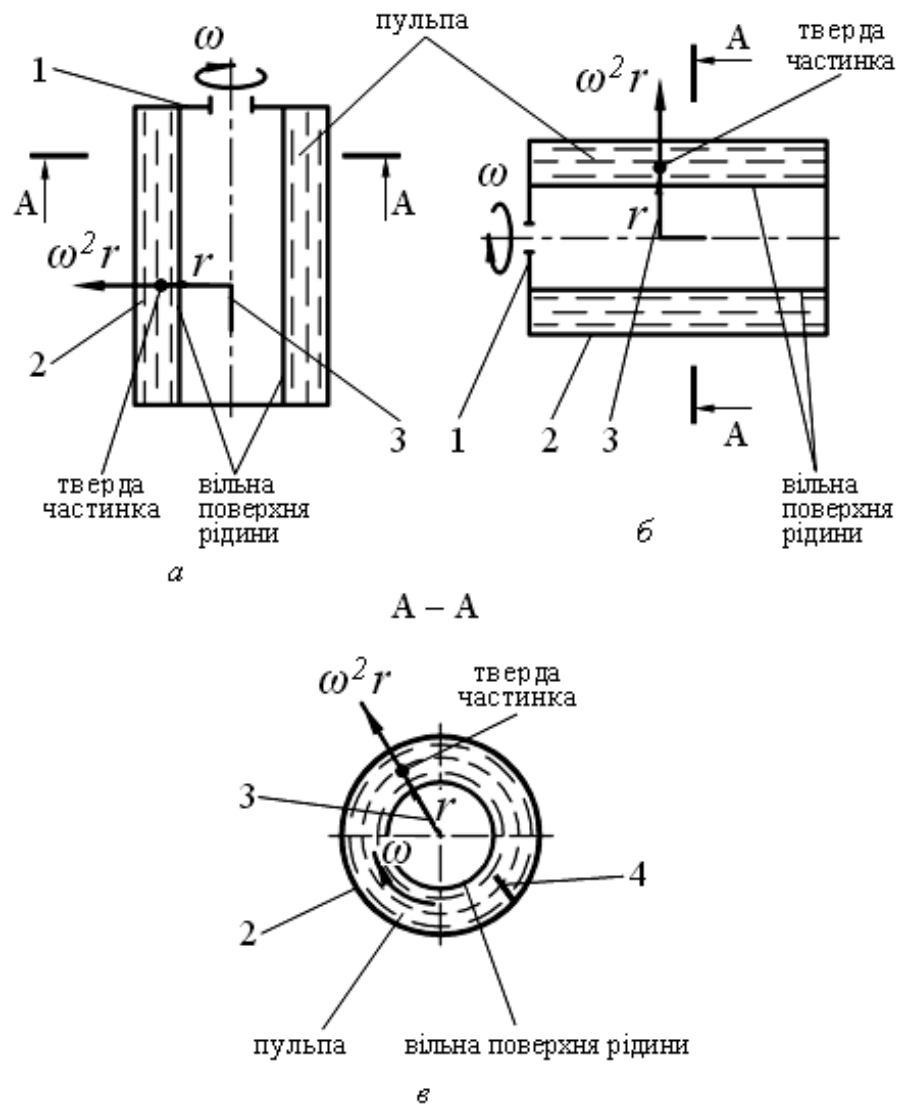
$\rho_{\text{ж}}$ – густина рідкої фази пульпи, кг/м³.

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 ω). У барабан заливається пульпа, під дією сил (відцентрової і тяжіння) її вільна поверхня має прийняти форму параболоїда обертання. Але при збільшенні кутової швидкості обертання ω 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/ω^2 . Проте при високих частоті обертання n і кутових швидкостях ω (саме у такому режимі працює центрифуга) ексцентриситет стає зневажливо малим, отже без скільки-небудь

помітної погрішності вільну поверхню і тут можна вважати співісною 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.

1.4 Масообмінні апарати

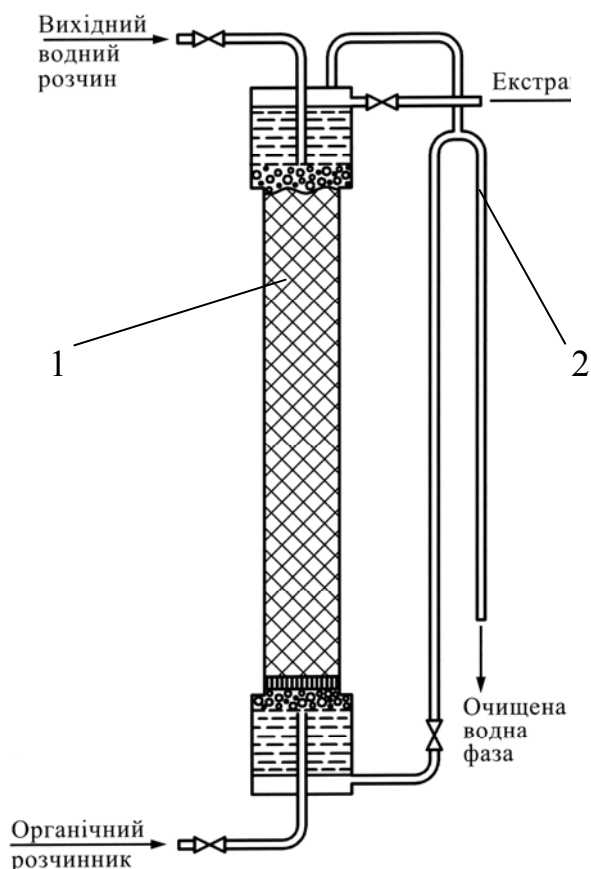
1.4.1 Екстрактори та їх розрахунок

Екстрактори, що використовують в промисловому масштабі, можуть працювати в періодичному і безперервному режимах. Апарати першого типу працюють зазвичай на підприємствах малої потужності. Крім того, відомі диференціальні екстрактори, у яких склад рідких фаз змінюється безперервно, і ступінчасті екстрактори, у яких склад фаз змінюється стрибкоподібно від ступеня до ступеня (багаторазове змішування і розшаровування фаз). При класифікації екстракційного обладнання враховують, що змішування і розшаровування фаз може здійснюватися за рахунок дії гравітаційних сил або за рахунок підведення енергії ззовні (механічне перемішування, пульсації або вібрації, відцентрова дія).

Найбільш прийнятним є спосіб безперервної протиточної екстракції, коли замість руху порціями використовують безперервний рух фаз. Як апаратура для безперервної екстракції застосовують вертикальні колони з насадкою або тарілчасті колони з пульсацією, горизонтальні змішувачі-відстійники і відцентрові екстрактори.

У колонних екстракторах водний розчин і органічна фаза рухаються назустріч один одному. Для збільшення поверхні контакту фаз колону заповнюють насадкою (наприклад, у формі кілець) або встановлюють в ній ряд розподільних перегородок з отворами різної форми (тарілчасті колони).

На рис. 1.14 показана схема екстракційної колони з насадкою. Органічна фаза, як легша фаза, поступає в нижню частину колони, а вихідний водний розчин подається зверху. У верхній частині колони, де немає насадки, відбувається розділення фаз і видалення екстракта. Водна фаза виводиться знизу через сифонну трубку, за допомогою якої підтримується постійний рівень водної фази в апараті.



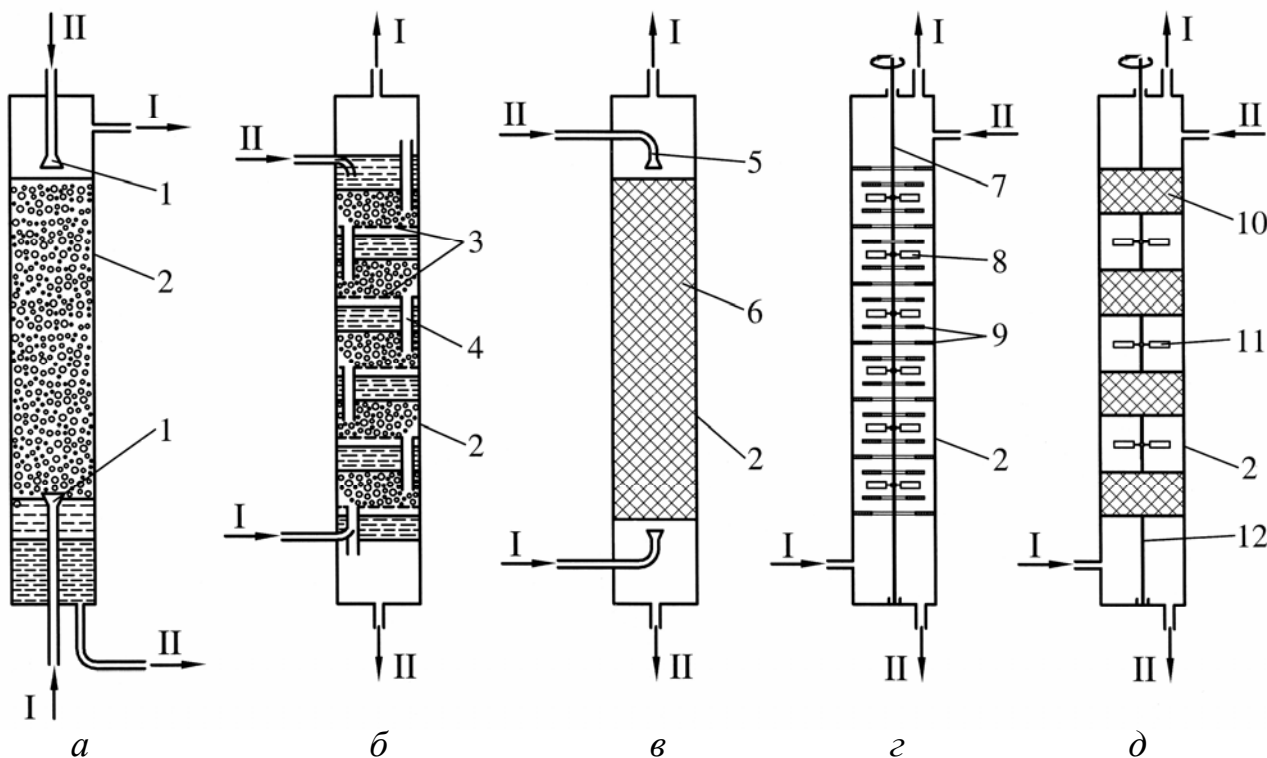
- 1 – колона з насадкою;
- 2 – сифонна трубка для видалення рафінату

Рисунок 1.14 – Схема екстракційної колони з насадкою

Протиточне переміщення рідини в колонах з насадкою або тарілками забезпечується тільки за рахунок дії сили тяжіння. Тому вони застосовуються лише при достатній різниці між густинами водної і органічної фаз. Деякі конструкції багатоступінчатих апаратів для безперервної протиточної екстракції схематично зображені на рис. 1.15.

Ефективність колон з насадкою або тарілками сильно підвищується, якщо потокам рідин у колоні надати зворотно-поступальні пульсації, що створюються спеціальними пристроями.

Розроблені і експлуатуються *пульсаційні колони з розподільними тарілками*, що мають щілинні отвори, виконані таким чином, що потік рухається під кутом до горизонталі і на кожній наступній тарілці він змінює напрям. У таких колонах при імпульсі, направленому вгору, органічна фаза проштовхується через щілини і піднімається до розташованої вище тарілки. При імпульсі зворотного напрямку водна фаза переміщається через щілини зверху вниз. Таким чином, пульсація забезпечує протитечію фаз уздовж колони і їх диспергування. Пульсація в насадкових і тарілчастих колонах збільшує їх продуктивність приблизно в три рази.



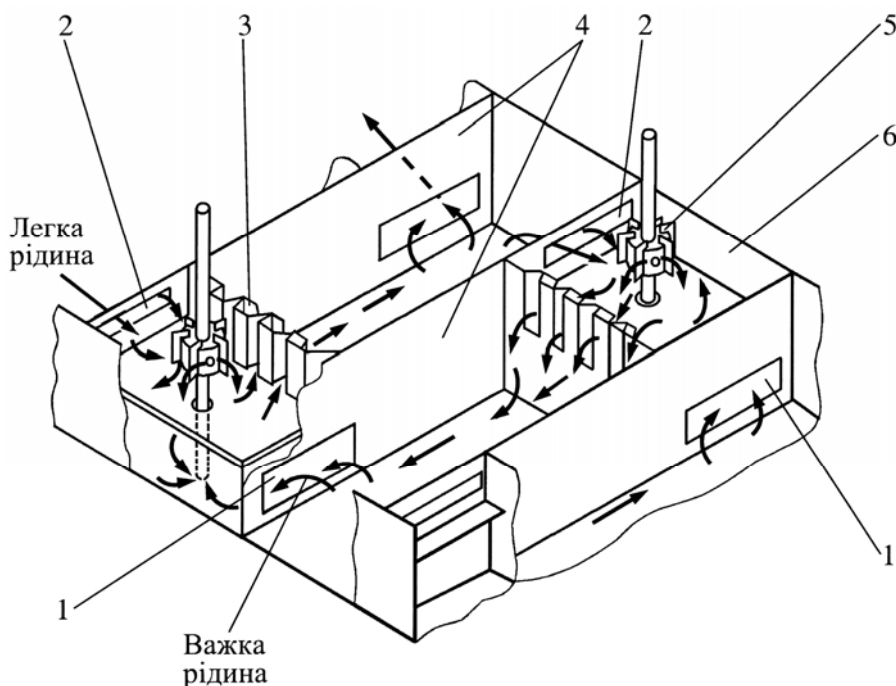
а – розпилювальна колона; б – колона з ситчастими тарілками;
 в – колона з насадкою; г – роторно-дисковий екстрактор;
 д – колона зі змішувальними і відстійними насадковими секціями,
 що чергуються (колона Шейбелля); I – легка рідина; II – важка
 рідина; 1, 5 – розпилювачі; 2 – колона; 3 – ситчаста тарілка;
 4 – переливні трубки; 6, 10 – насадки; 7, 12 – вал;
 8 – плоский ротор; 9 – кільцеві перегородки; 11 – мішалка;

Рисунок 1.15 – Схеми екстракційних колон

Поширеним апаратом для екстракції є *змішувач-відстійник*, комірka якого складається зі змішувальної і відстійної камер, розділених перегородкою (рис. 1.16). Ряд комірок з'єднуються одна з одною, утворюючи каскад змішувачів-відстійників.

У змішувальній камері встановлена турбінка, що обертається на валу, за допомогою якої відбувається перемішування водної і органічної фаз, перекачування фаз між сусідніми комірками, а також регулювання рівнів рідких фаз. Камера змішування розділена горизонтальною перегородкою на два відділення. Порожнистий вал турбіни проходить через отвір в горизонтальній перегородці. Водний розчин (важка фаза) піднімається з нижнього відділення у верхнє і виштовхується через отвори між лопатками, де змішується з

органічним розчинником (легкою фазою), що поступає у верхню частину змішувальної камери.

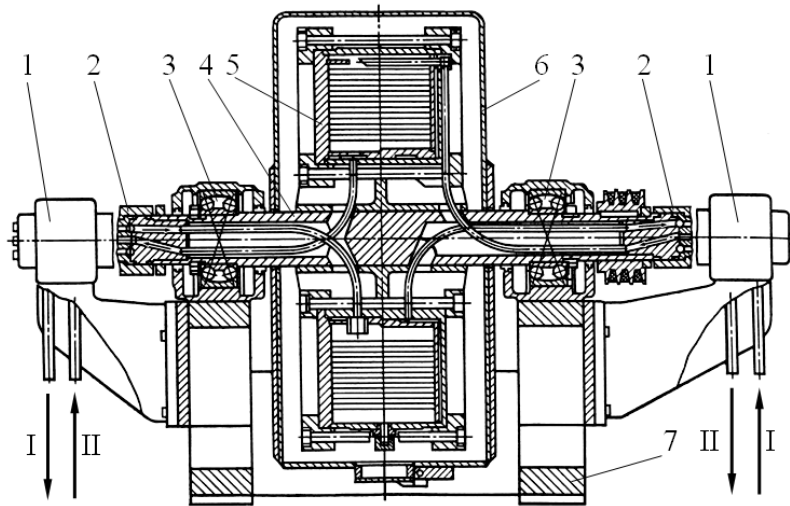


1 – вікно для перетікання водної фази; 2 – вікно для перетікання органічної фази; 3 – гофрована перегородка (жалюзі); 4 – камера відстоювання; 5 – турбінка; 6 – камера змішування

Рисунок 1.16 – Екстрактор типу змішувач-відстійник

Продуктивність екстракторів колонного типу і змішувачів-відстійників визначається переважно тривалістю розділення фаз. Це обмеження значною мірою усувається у *відцентрових екстракторах*. Поширений апарат цього типу – екстрактор Подбільняка (рис. 1.17). Основний елемент екстрактора цього типу – ротор, в який поміщена спіраль, що виконана з перфорованої стрічки. Ротор насаджений на порожнистий вал і обертається зі швидкістю 2000–5000 об/хв. Фази подаються через цапфи валу, органічна – на периферію ротора, водна – ближче до центру. При обертанні ротора за рахунок відцентрових сил фази рухаються протиточно одна одній. Екстракт і рафінат також відводяться через цапфи валу – водна з периферії ротора, органічна – з області, близької до центру.

Висока розділяюча здатність екстрактора пояснюється тим, що водна і органічна фази контактують в роторі багато разів.



1 – колектори; 2 – приймально-відвідний пристрій;
 3 – підшипники; 4 – вал; 5 – ротор; 6 – кожух;
 7 – станина; I – легка рідина; II – важка рідина
 Рисунок 1.17 – Відцентровий екстрактор Подбільняка

При проектуванні безперервної протиточної екстракції потрібно визначити число теоретичних ступенів, необхідне для досягнення заданих показників. У разі каскаду змішувачів-відстійників практичний ступінь може відповідати теоретичному ступеню, якщо на кожному ступені встановлюється рівновага (органічна і водна фази, що виходять із ступеня, знаходяться в рівновазі).

Довжину ділянки колонного екстрактора, на якій склад органічної фази, що виходить, відповідає рівновазі з водною фазою, що виходить з протилежного кінця цієї ділянки, називають висотою еквівалентного теоретичного ступеня – ВЕТС (рис. 1.18).

Число теоретичних ступенів n , що забезпечує при заданому відношенні об'ємних потоків органічної і водної фаз зниження концентрації розчину від X_F на вході каскаду до X_W на виході, можна графічно визначити за допомогою ізо терми OF (рівноважної лінії) і так званої робочої лінії DE (рис. 1.19), кут нахилу якої дорівнює відношенню потоків водної й органічної фаз ($V_{\text{водн}}/V_{\text{орг}}$). За робочою лінією, задаючись $C_{\text{орг}} \equiv Y$, визначають $C_{\text{водн}} \equiv X$. Для цього відновивши перпендикуляр до осі абсцис в точці $X_1 = X_W$ до перетину з рівноважною лінією OF , знаходять Y_1 . Далі відновивши перпендикуляр до осі ординат в точці Y_1 до перетину з робочою лінією DE , визначають X_2 . Потім послідовно

знаходять X_3, X_4, \dots, X_j . Розрахунок закінчується при $X_j \geq X_F$. Очевидно, що при $n = j - 1$ буде забезпечено зниження концентрацій від X_F до $\leq X_W$.

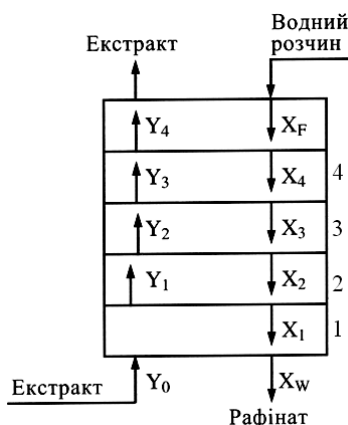


Рисунок 1.18 – Теоретичні ступені 1–4 в екстракційній колоні

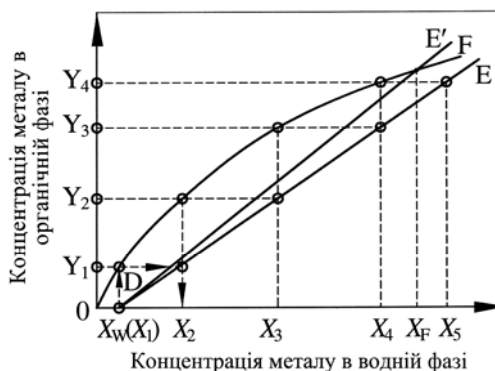


Рисунок 1.19 – Визначення числа ступенів екстракції

Практичне число ступенів при екстракції і реекстракції $n_{пр}$ визначають з врахуванням к.к.д. процесу (наприклад, для апарата типу змішувач-відстійник $\eta = 75-90\%$):

$$n_{пр} = (n_{теор}/\eta) \cdot 100.$$

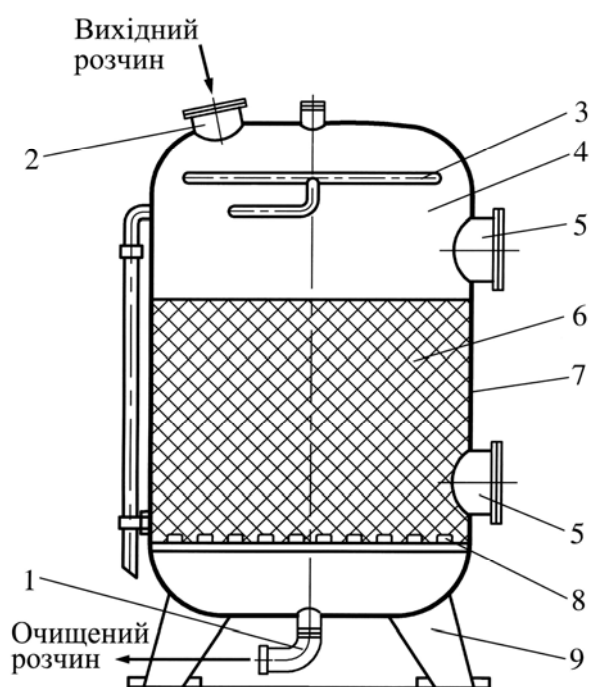
1.4.2 Апарати для йонного обміну

Для йонообмінних процесів в промисловості використовують апарати з фіксованим і рухомим шаром смоли.

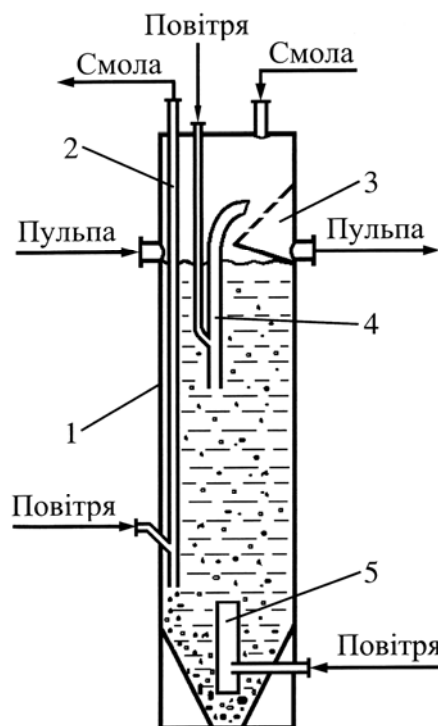
Апарат з фіксованим шаром смоли складається з корпусу, розподільних пристроїв, системи трубопроводів і контрольно-вимірювальної апаратури (рис. 1.20). Корпус зазвичай виготовляють зі сталі, футерованої кислотостійкою цеглою, або з титану. Розподільні пристрої використовують для рівномірного розподілу розчину по перетину колони, також вони перешкоджають віднесенню зерен йоніту. Сьогодні як розподільні пристрої використовують несправжні днища, а також трубчасті пристрої різних конструкцій. Завантаження йонітів, як правило, не перевищує $2/3$ об'єму колони. Вільний об'єм, що залишився, потрібний для розпушування, промивання і розділення йонітів.

Основним недоліком апаратів такого типу є те, що в них можна подавати тільки прояснені розчини, тобто розчини, очищені від твердих частинок. Тому

перед сорбційним циклом після вилуговування такі розчини обов'язково мають проходити стадію фільтрування або декантації.



- 1 – отвір для розвантаження колони;
 2 – люк для завантаження йоніту;
 3 – верхній розподільний пристрій;
 4 – водяна подушка; 5 – оглядовий люк;
 6 – йоніт; 7 – корпус колони;
 8 – нижній розподільний пристрій;
 9 – опорні лапи
- Рисунок 1.20 – Схема йонообмінної установки з фіксованим шаром смоли



- 1 – корпус; 2 – аероліфт для транспортування смоли; 3 – розділовий елемент; 4 – аероліфт для транспортування пульпи; 5 – аероліфт для перемішування пульпи
- Рисунок 1.21 – Схема апарата з пневматичним перемішуванням для безперервного процесу сорбції

Серед апаратів з рухомим шаром смоли, які здатні працювати з пульпами, найбільше розповсюдження в металургії урану, рідкісних і благородних металів отримали *пачуки* (рис. 1.21) – апарати з пневматичним перемішуванням і аероліфтним транспортуванням смоли, що надходить і вивантажується.

Для організації безперервного сорбційно-десорбційного процесу переробки пульпи використовують батарею пачуків (рис. 1.22), в якій транспортування смоли з апарата в апарат здійснюється за принципом

протитечії щодо пульпи. Така схема процесу зменшує одноразове завантаження йоніту в процес. Для перемішування і транспортування використовують аероліфти як найбільш економічні і прості пристрої. Застосування системи пачуків в сорбційно-десорбційному циклі вважається найкращим апаратним оформленням процесу йонообмінної переробки пульпи.

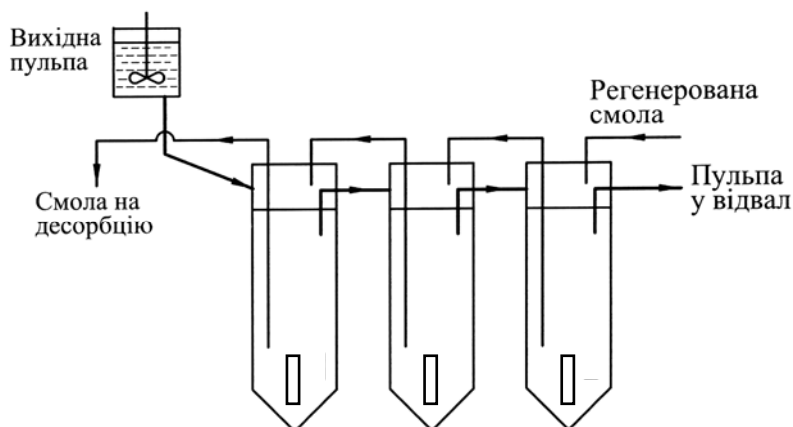


Рисунок 1.22 – Схема безперервного сорбційно-десорбційного процесу переробки щільних пульп у пачуках

1.4.3 Апарати для цементації

Найбільш ефективним вважається здійснення процесу контактного відновлення за принципом повної протитечії, що можливо двома способами: а) перемішуванням розчину з порошком-цементатором; б) просочуванням розчину через шар порошку-цементатора.

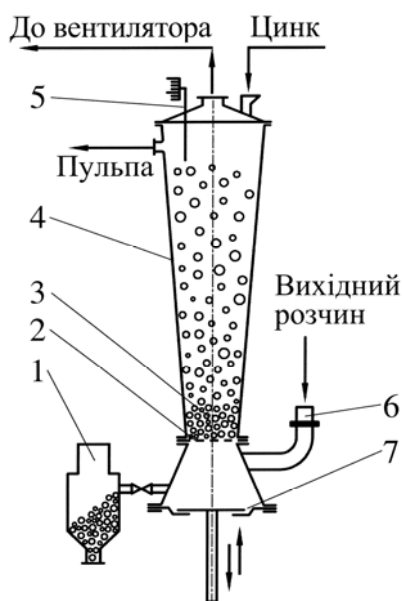
Спосіб перемішування доступніший для механізації і автоматизації процесу. При його здійсненні можна забезпечити часткову протитечію, застосовуючи каскад послідовно підключених апаратів, причому свіжий порошок металу-цементатора завантажується в апарат для остаточного очищення розчину. Як реактори використовуються апарати з мішалками, цементатори барабанного типу, кульові млини-цементатори, вібраційні та відцентрові цементатори та ін.

При другому способі максимально концентрований розчин контактує з найбільш відпрацьованою частиною порошку і тим самим підвищується ступінь використання цементатора, а максимально збіднений розчин реагує з менш відпрацьованою порцією порошку, що забезпечує кращу глибину

очищення. Проте при цьому способі складно забезпечити рівномірне просочування розчину через шар порошку: в окремих місцях утворюються канали з посиленою циркуляцією, а в інших місцях циркуляція розчину слабка і порошок реагує не повністю. Останніми роками набули поширення високоефективні апарати-цементатори з киплячим шаром порошку і пульсаційні колони.

Киплячий шар металу-цементатора створюється висхідним потоком розчину, що надходить в нижню частину апарата. Велика поверхня цементатора, високі швидкості переміщення твердих часточок відносно рідини внаслідок безперервної циркуляції часточок, безперервне оновлення твердої фази сприяють інтенсифікації процесу і зниженню витрати металу-цементатора.

У пульсаційній колоні (рис. 1.23) розчин, що очищується, подають в нижню частину колони. Очищаючись від домішок (мідь, кадмій), розчин сульфату цинку проходить через шар гранул цементатора (цинк) і виходить з верхньої частини апарата. За допомогою діафрагми розчину і шару гранул надають коливальні рухи, що збільшує швидкість руху їх щодо один одного і сприяє оновленню поверхні гранул шляхом зняття металу, що осаджується. Продукти цементації виносяться з колони з потоком розчину. Промисловий пульсаційний апарат для очищення цинкового електроліту від міді і кадмію при об'ємі 1 м³ пропускає до 30 м³/год. розчину, при цьому концентрація міді знижується з 2–6 г/л до слідів, кадмію – від 0,2–1,0 г/л до 0,004–0,02 г/л.



- 1 – збірник дрібного матеріалу;
- 2 – решітка;
- 3 – “ліжко” гранул цинку;
- 4 – корпус;
- 5 – показчик рівня межі розчину;
- 6 – клапан;
- 7 – діафрагма пульсатора

Рисунок 1.23 – Пульсаційна колона для очищення розчинів цинковим пилом

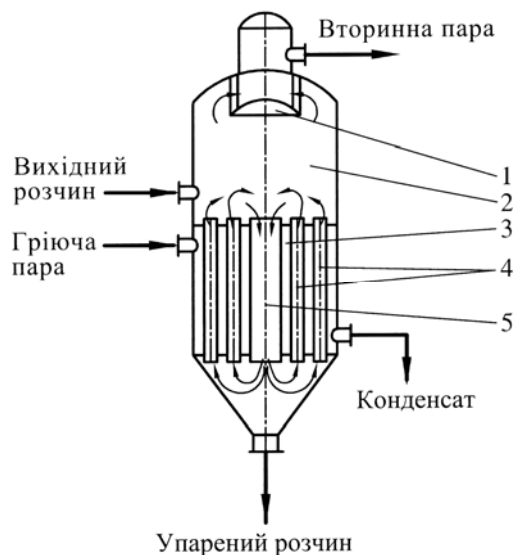
1.5 Випарні апарати

1.5.1 Класифікація випарних апаратів

Процес випарювання проводиться у випарних апаратах. При роботі з невеликими кількостями розчинів при атмосферному тиску, а іноді і під вакуумом застосовують одиночні випарні апарати, які мають назву однокорпусних випарних установок (рис.1.24). В цьому випадку теплота гріючої пари використовується одноразово, а теплота вторинної пари зазвичай не використовується.

Основні елементи випарних апаратів (рис. 1.24):

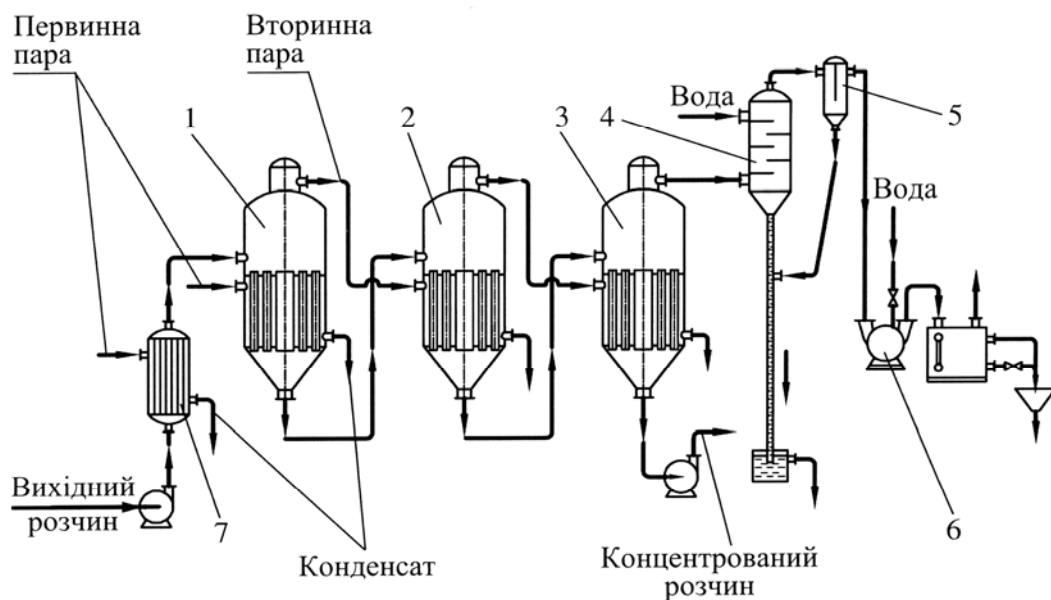
- нагрівна камера (теплообмінник), в якій відбувається нагрів і випарювання розчину;
- сепаратор – паровий простір, в якому відбувається відокремлення вторинної пари від розчину;
- циркуляційна труба, що застосовується для повернення розчину в гріючу камеру;
- бризкоуловлювач (бризковідокремлювач), що застосовується для відокремлення бризок розчину від вторинної пари.



- 1 – бризкоуловлювач; 2 – сепаратор; 3 – циркуляційна труба;
4 – кип'ятільні трубки; 5 – гріюча камера

Рисунок 1.24 – Випарний апарат з природною циркуляцією і співвісною нагрівною камерою (з центральною циркуляційною трубою)

Для економії гріючої пари застосовують багатокорпусні випарні установки (рис. 1.25), що складаються з декількох випарних апаратів (або корпусів), де вторинна пара, що йде з будь-якого попереднього корпусу, є гріючою парою для наступного корпусу, в якому розчин кипить при нижчому тиску. При цьому тиск в послідовно з'єднаних корпусах знижується так, щоб зберегти достатню різницю температур між киплячим розчином і гріючою парою в кож-ному корпусі, тобто створити необхідну рушійну силу процесу випарювання. Вторинна пара останнього корпусу поступає в барометричний конденсатор (якщо останній корпус працює під вакуумом) або передається на сторону (якщо процес в останньому корпусі установки проходить під підвищеним тиском).



1, 2, 3 – випарні апарати; 4 – барометричний конденсатор;
5 – пастка; 6 – вакуум-насос; 7 – підігрівач вихідного розчину

Рисунок 1.25 – Багатокорпусна прямоточна випарна установка

Конструктивно випарні апарати можна класифікувати по:

- типу поверхні нагріву (сорочкові, трубчасті);
- розташуванню поверхні нагріву в просторі (з вертикальною або горизонтальною, співвісною або винесеною гріючою камерою);
- роду теплоносія (водяна пара, газ, рідина, тверді речовини);
- виду і кратності циркуляції (прямоточні без циркуляції і з багаторазовою циркуляцією).

1.5.2.3 Розрахунок випарного апарата

Рівняння матеріального балансу процесу випарювання має вигляд:

$$G_{\text{п}} = G_{\text{к}} + W, \quad (1.29)$$

де $G_{\text{п}}$, $G_{\text{к}}$ – масові витрати початкового (вихідного) і кінцевого (концентрованого) розчину, кг/с;

W – масова витрата випареної води, кг/с.

Рівняння матеріального балансу по абсолютно сухій речовині, що знаходиться в розчині:

$$G_{\text{п}} \cdot x_{\text{п}} = G_{\text{к}} \cdot x_{\text{к}}, \quad (1.30)$$

де $x_{\text{п}}$, $x_{\text{к}}$ – початкова і кінцева концентрації розчину відповідно, %.

З цих рівнянь визначаються:

а) кількість концентрованого розчину

$$G_{\text{к}} = G_{\text{п}} \cdot x_{\text{п}} / x_{\text{к}};$$

б) кінцева концентрація розчину

$$x_{\text{к}} = G_{\text{п}} \cdot x_{\text{п}} / (G_{\text{п}} - W); \quad (1.31)$$

в) кількість випареної води

$$W = G_{\text{п}} - G_{\text{к}} = G_{\text{п}} - G_{\text{п}} \cdot x_{\text{п}} / x_{\text{к}} = G_{\text{п}} \cdot (1 - x_{\text{п}} / x_{\text{к}}). \quad (1.32)$$

Рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Q + G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}} = G_{\text{к}} \cdot C_{\text{к}} \cdot t_{\text{к}} + W \cdot I_{\text{вп}} + Q_{\text{вт}} \quad (1.33)$$

або

$$Q = G_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{п}}) + W \cdot (I_{\text{вп}} - C_{\text{в}} \cdot t_{\text{к}}) + Q_{\text{вт}}, \quad (1.34)$$

де Q – витрата теплоти на випарювання (теплове навантаження апарата), кВт;

$C_{\text{п}}$, $C_{\text{к}}$ – питомі теплоємності відповідно початкового (вихідного) і кінцевого (концентрованого) розчинів в корпусі, кДж/(кг·К);

$t_{\text{п}}$, $t_{\text{к}}$ – температури відповідно початкового розчину на вході його в апарат і кінцевого розчину на виході його з апарата, °С;

$I_{\text{вп}}$ – питома ентальпія вторинної пари на виході її з апарата, кДж/кг;

$Q_{\text{вт}}$ – витрата теплоти на компенсацію втрат в навколишнє середовище, кВт;

$C_{\text{в}}$ – питома теплоємність води при $t_{\text{к}}$, кДж/(кг·К).

У тепловому балансі також мають враховуватися витрати теплоти на дегідратацію, тобто на підвищення концентрації розчину. Зазвичай ця величина мала і нею можна знехтувати.

Втрати в навколишнє середовище $Q_{вт}$ при розрахунках приймають в розмірі 3–5 % від теплового навантаження апарата.

Тоді, нехтуючи втратами теплоти $Q_{вт}$ і теплою дегідратації, отримаємо:

$$Q = G_{п} \cdot C_{п} \cdot (t_{к} - t_{п}) + W \cdot (I_{вп} - C_{в} \cdot t_{к}) . \quad (1.35)$$

Перша складова правої частини рівняння (1.37) виражає витрату теплоти на нагрівання початкового розчину до температури кипіння, друга складова – витрату теплоти на випаровування води.

Витрату грюючої пари D (кг/с) визначають за рівнянням:

$$D = \frac{Q}{I_{г} - i_{к}} , \quad (1.36)$$

де $I_{г}$ – питома ентальпія нагрівної пари, кДж/кг;

$i_{к}$ – питома ентальпія конденсату, кДж/кг.

2 ОБЛАДНАННЯ ПРОМЕТАЛУРГІЙНИХ ТА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ КОЛЬОРОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

2.1 Загальна характеристика металургійних печей кольорової металургії

Сучасна плавильна піч має відповідати таким вимогам:

- економічна доцільність (питома витрата палива та інших енергоносіїв, безповоротні втрати металу, питома витрата допоміжних матеріалів, вартість устаткування, вартість обслуговування, використання виробничих площ тощо);
- якість продукції (стабільність хімічного складу, забруднення неметалевими включеннями, відсутність місцевих перегрівів, що впливають на структуру виливків);
- високі технічні показники (продуктивність, питомі площі, надійність, тривалість роботи між ремонтами);
- рівень механізації й автоматизації (кількість трудомістких операцій, виконуваних людиною; точність підтримки технологічних параметрів);
- зручність сполучення з іншими одиницями устаткування в технологічному ланцюжку (підготовка шихти, завантаження, підйомно-транспортне устаткування, зливання продуктів плавлення);
- дотримання екологічних норм (наявність шкідливих і отруйних газів, кількість пилоподібних викидів, теплові забруднення).

2.1.1 Елементи конструкції сучасних металургійних печей

Сучасні металургійні печі – складні теплові агрегати, що складаються з робочих камер і допоміжного устаткування. Робоча камера включає робочий простір і пристрої для одержання теплової енергії: пальники і форсунки в паливних печах; електроди, резистори й індуктори – в електричних. До складу допоміжного устаткування входять пристрої для утилізації теплоти газів, що відходять, і пристрої для охолодження напружено працюючих елементів печі (дутьові вентилятори і димососи, газоочистки, димарі, клапани різного призначення, арматура тощо).

Вибір доцільного методу і пристрою для виділення теплоти впливає на конструкцію, характер і економічність роботи печі.

Фундамент печі є основою, на якій споруджується металургійна піч, і призначений для передавання її маси на ґрунт. Зазвичай під час проектування печей тиск на ґрунт допускається не більш 250 кПа. Щоб уникнути перекосу фундаменту і його розтріскування навантаження повинно бути рівномірним по всьому периметру підшови фундаменту.

Черинь (подова плита) печей залежно від конструкції і призначення печі споруджується або безпосередньо на фундаменті без нижнього охолодження, або з повітряним нижнім охолодженням.

Склепіння печей виконують арковими, купольними або підвісними.

Аркове склепіння застосовують при ширині прольота до 4 м. Для металургійних печей переважно застосовують аркове склепіння з центральним кутом 60° , 90° , 120° і 180° (рис. 2.1).

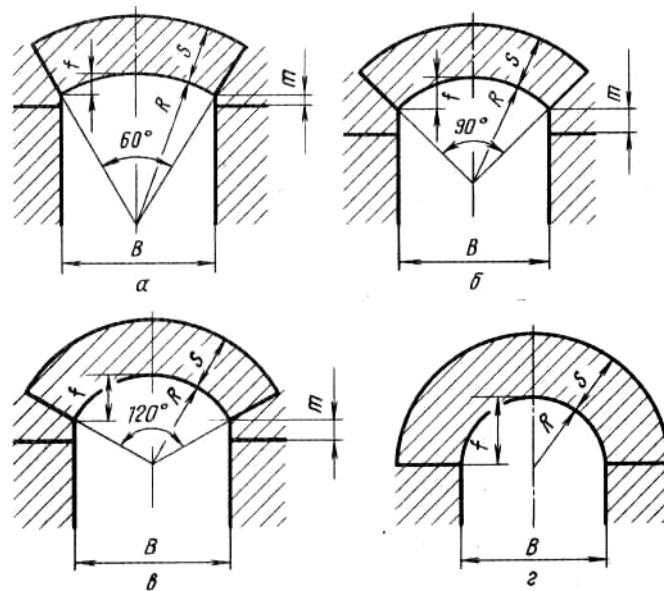


Рисунок 2.1 – Схеми склепіння з центральним кутом 60° (а), 90° (б), 120° (в) і 180° (г)

Купольним склепінням називають склепіння круглих печей. Їх виконують повністю з фасонної цегли. Підвісне склепіння нагрівних печей застосовують при ширині прольота більше 4 м (рис. 2.2).

Металевий каркас призначений для скріплення кладки, збільшення міцності стін. Він сприймає зусилля, що виникають під час нагрівання печі та зусилля від розпору склепіння. Розрізняють рухливі, жорсткі та комбіновані каркаси.

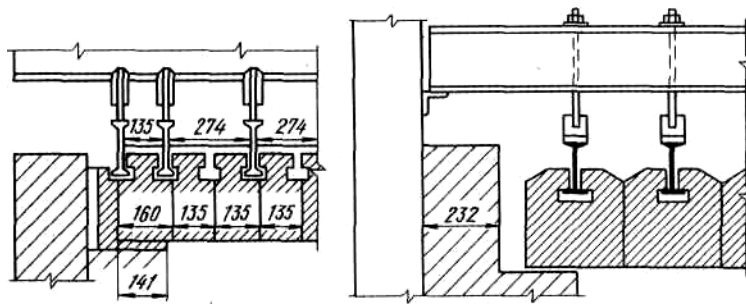
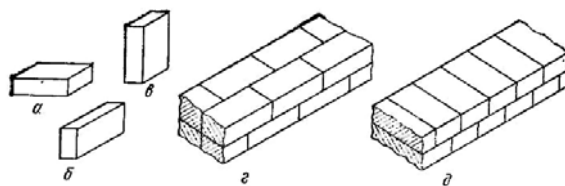


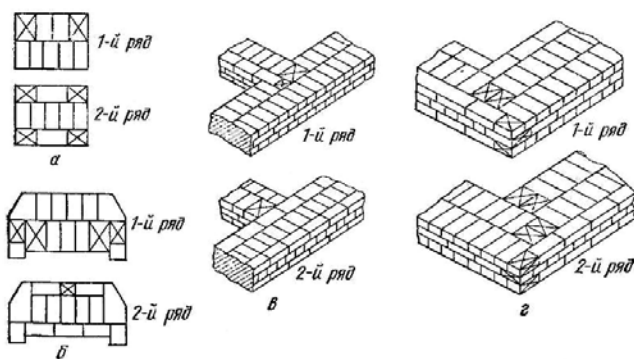
Рисунок 2.2 – Приклади виконання підвісного склепіння

Стіни печей кладуть із вогнетривких цегл або монтують із блоків цегл, підготовлених заздалегідь (рис. 2.3). В окремих випадках застосовують цегли спеціальних форм і розмірів. Найбільш слабе місце вогнетривкої кладки – шви, тому їх слід робити якомога тонше (рис. 2.4). Залежно від товщини шва розрізняють наступні категорії кладки – особливо ретельна (1 мм), ретельна (2 мм), звичайна (3 мм), бутова (5 мм). Шви заповнюються вогнетривкими розчинами (або мертелями).



а – на плашку; б – на ребро; в – на торець; г – ложкава; д – тичкова

Рисунок 2.3 – Способи укладання цегли



а – стовбчика; б – простенка; в – стіни; г – кута

Рисунок 2.4 – Приклади перев'язки швів вогнетривкої кладки

2.1.2 Види нагрівання печей. Паливо та його характеристика

Печі, в яких теплову енергію, потрібну для їх роботи, отримують за рахунок електричної енергії, називають електричними.

Методи електричного нагрівання, що використовуються під час плавлення кольорових металів і їх сплавів в електричних печах:

1. Нагрівання по методу опору:

а) пряме (безпосереднє) нагрівання – перебіг електроструму відбувається безпосередньо по матеріалу, що нагрівається, має бути провідником та володіти активним опором;

б) непряме нагрівання – тепла енергія виділяється в спеціальному твердому провіднику, який називають нагрівним елементом.

2. Нагрівання електричною дугою – перетворення електричної енергії в теплову відбувається переважно в газовому просторі, що відокремлює електроди, та кінцях електродів. Розрізняють методи:

а) пряме (безпосереднє) нагрівання – дуга утворюється між електродом та металом, що розплавляється;

б) непряме нагрівання – дуга утворюється між електродом, а метал, що розплавляється, знаходиться на деякій відстані від дуги;

в) комбіноване нагрівання – електрична дуга створюється між шихтою та електродом, що занурений в тверду або розплавлену шихту. Теплова енергія, що виділяється в шихті, складається з теплової енергії, яка виділяється в тепловому завантаженні, та теплової енергії, яка виділяється електричною дугою, що утворюється між електродом і шихтою, що нагрівають;

г) плазмове нагрівання – метал, що нагрівають, розміщують в потоці низькотемпературної плазми.

3. Нагрівання індукційним методом – розплавлення кольорових металів відбувається в середовищі змінного електромагнітного поля. За конструкцією індукційні плавильні печі промислової та високої частоти поділяють на: а) каналні із залізним сердечником; б) тигельні (без сердечника).

Печі, в яких теплову енергію, потрібну для їх роботи, отримують за рахунок згоряння палива, називають полумєневими.

Паливо – група речовин в основному органічного походження, при спалюванні яких виділяється тепла енергія для створення робочих температур в металургійних печах.

Класифікують паливо в основному за агрегатним станом і походженням (табл. 2.1). За агрегатним станом паливо поділяють на тверде, рідке та газоподібне. За походженням паливо може бути природне, яке використовують в тому стані, у якому перебуває в природі, і штучне, отримане шляхом переробки природних матеріалів. Основними характеристиками палива є хімічний склад і теплота згорання.

Таблиця 2.1 – Загальна класифікація палива

Агрегатний стан	Походження палива	
	природне	штучне
Тверде паливо	Дрова, торф, кам'яне вугілля, горючі сланці	Деревне вугілля, кокс, вугільний пил
Рідке паливо	Нафта	Бензин, мазут, кам'яновугільна смола
Газоподібне паливо	Природний газ	Генераторний, коксувальний, доменний газ

Значною перевагою рідкого та газоподібного палива є можливість їх транспортування по трубопроводах.

2.1.3 Вогнетривкі та теплоізоляційні матеріали

Вогнетривками називаються будівельні матеріали, що деформуються при температурі не нижче 1580 °С і здатні протистояти тривалому впливу високих температур без змінення своїх фізико-механічних властивостей.

За хіміко-мінеральним складом вогнетриви поділяють на групи, характеристика яких надана в табл.2.2.

Придатність тих або інших вогнетривів у кожному окремому випадку оцінюється залежно від їхніх основних фізичних і робочих властивостей (рис. 2.5). Робочими називають властивості вогнетривів, що задовольняють вимоги, які висуваються у конкретному випадку. Основними властивостями вогнетривів є вогнетривкість, термічна стійкість, хімічна стійкість, деформація під навантаженням при високій температурі, сталість форми та об'єму, пористість, газопроникність, теплопровідність, електропровідність.

Застосування теплоізоляційних матеріалів у конструкціях печей дозволяє зменшити теплові втрати через стіни й тим самим збільшити тепловий к.к.д. і продуктивність печей. При будівництві печей знаходять застосування два типи

Таблиця 2.2 – Властивості вогнетривів

№	Група вогнетривів	Основні хімічні компоненти, %	$T_{\text{вогн}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	Щільність, $\text{т}/\text{м}^3$	Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ при 100°C	Питома теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ при 100°C
1	Динасові	$\text{SiO}_2 \geq 93$	1690-1720	1650-1700	1,84–1,97	1,3	0,86
2	Шамотні	$30 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 45$	1580-1750	1200-1400	1,83–1,95	0,9	0,9
3	Мулітові	$62 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 72$	1600-1800	1600-1650	2,34–2,52	1,2	0,86
4	Корундові	$\text{Al}_2\text{O}_3 > 90$	1950-2000	1650-1800	2,89–3,12	2,1	0,83
5	Смолодоломітові	$50 < \text{MgO} < 85$ $10 < \text{CaO} < 45$	1800-1900	1300-1400	2,7–2,8	3,4	0,96 при 1000°C
6	Периклазові (магнезитові)	$\text{MgO} \geq 85$	2200-2400	1650-1700	2,6–2,8	4,5	1,08
7	Периклазохромітові	$\text{MgO} \geq 60$ $5 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 20$	2000	1650-1700	2,95–3,04	2,5	1,0
8	Хромітопериклазові	$40 \leq \text{MgO} \leq 60$ $15 < \text{Cr}_2\text{O}_3 < 35$	1920-2000	1700	2,9–3,15	2,0	1,8 – 1,15 ($20-1000^\circ\text{C}$)
9	Цирконові	$\text{ZrO}_2 > 50$, $\text{SiO}_2 > 25$	2000-2300	1900-2000	3,48–3,83	1,4	0,64
10	Карбідкремнієві	$\text{SiC} > 70$	2000	1800-2000	2,35–2,54	9,3 при 1000°C	0,97

теплоізоляційних матеріалів – легковажні вогнетриви та природні теплоізоляційні матеріали.

При спорудженні печей, крім спеціальних будівельних матеріалів (вогнетривких і теплоізоляційних) широко застосовуються й звичайні: будівельна цегла, бутовий камінь, бетон, пісок, гравій, щебені, розчини.

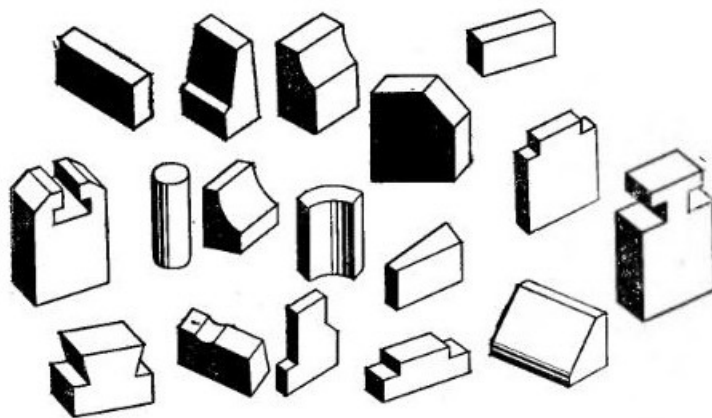


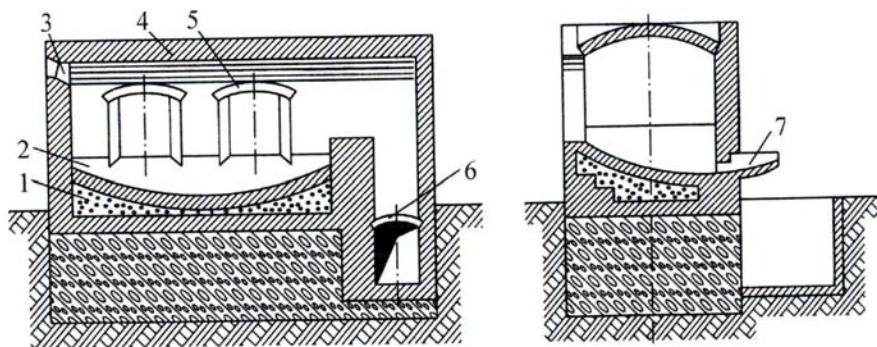
Рисунок 2.5– Звичайні та фасонні вогнетривкі вироби

2.2 Полуменеві печі кольорової металургії

2.2.1 Стационарні відбивні печі

Відбивні печі використовуються для плавки дрібнорозмелених матеріалів (концентратів), а також металів при виробництві міді, олова, цинку, алюмінію, вторинних металів і сплавів. За принципом нагрівання відбивні печі відносять до типу полуменевих печей, де теплота металу, що нагрівається, передається від полум'я при спалюванні палива. Печі опалюються вугільним пилом, мазутом або природним газом.

Полуменеві відбивні печі бувають двох типів: одно- і двокамерні. Однокамерні печі (рис. 2.6) мають деякі переваги проти двокамерних. Вони компактніші, їх спорудження і ремонт дешевші, але продуктивність нижча, ніж двокамерних (на 25–30 %), а витрата палива вища. При меншому використанні теплоти відхідних газів тепловий к.к.д. печей помітно нижчий, ніж двокамерних, але регулювання теплового режиму ефективніше, а розплав, що утворився у ванні, менше забруднюється пилом відхідних газів.



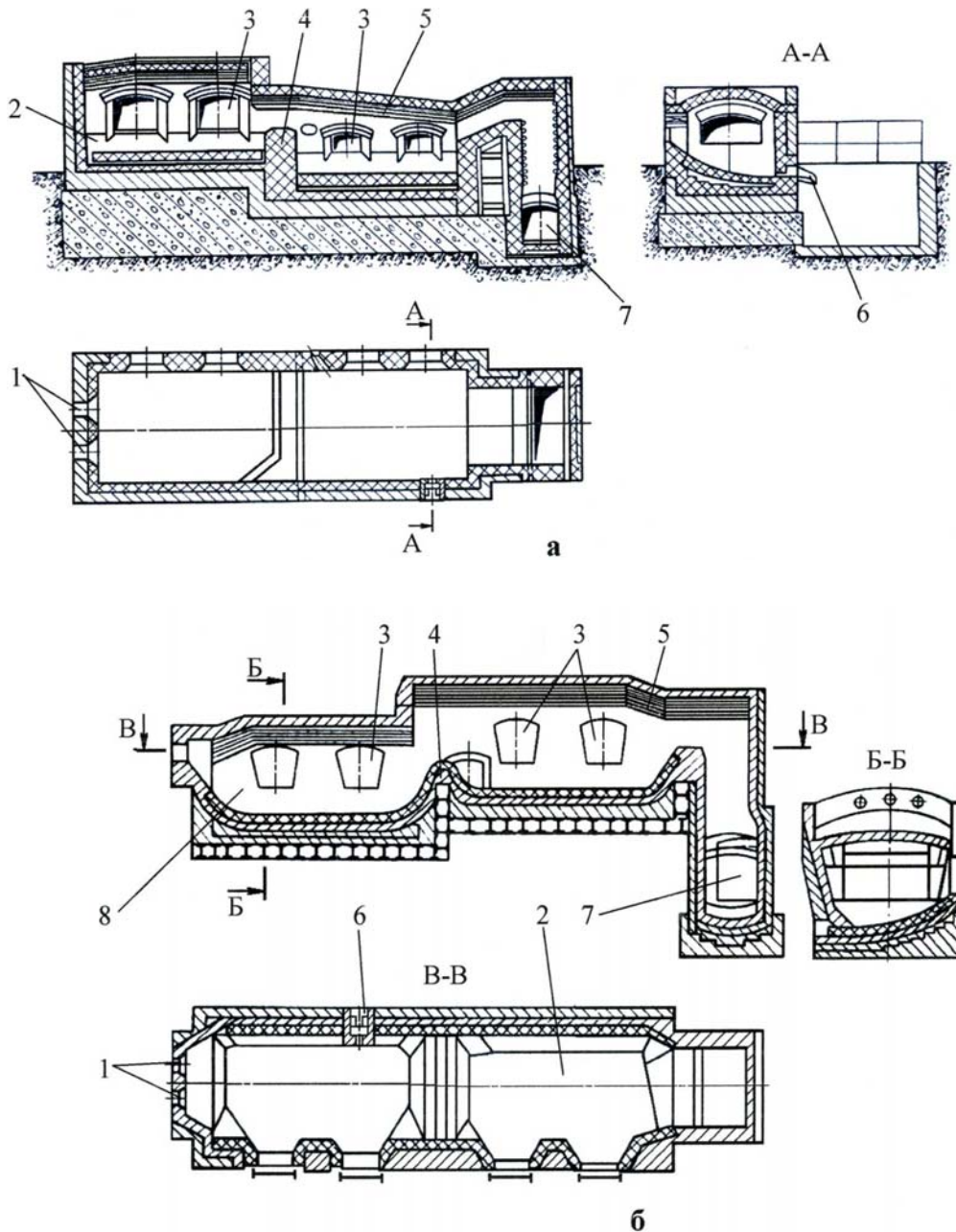
1 – черінь; 2– плавильна камера; 3 – місце для форсунки;
4– склепіння; 5 – завантажувальне вікно; 6 – лежак; 7– льотка

Рисунок 2.6 – Однокамерна відбивна піч

На великих заводах застосовують двокамерні печі (рис. 2.7), що поєднують функції плавильного агрегату (одна камера) і накопичувача-міксеру (друга камера) для коректування хімічного складу, рафінування та зберігання металу на період розливання. Обидві камери розміщені в одному корпусі. Черінь плавильної камери розміщений вище від череня накопичувача, в який метал переливається з плавильного простору самопливом. Така конструкція

порівняно з однокамерними печами істотно підвищує продуктивність, тепловий к.к.д. і практично забезпечує безперервність процесу плавлення.

Двокамерні печі поділяються на прямоотечійні й протитечійні. У прямоотечійних печах (рис. 2.7, а) відхідні газы і полум'я пальників переміщуються в напрямку руху металу з плавильного простору в накопичувач. У протитечійних печах (рис. 2.7, б) – навпаки, газы, що гріють, надходять з накопичувача у плавильний простір.



а – прямоотечійна; б – протитечійна; 1 – місце для форсунки; 2 – плавильна камера; 3 – завантажувальне вікно; 4 – поріг; 5 – склепіння; 6 – лютка; 7 – лежак; 8 – накопичувач
Рисунок 2.7 – Двокамерні відбивні печі

2.2.2 Короткобарабанна піч та її розрахунок

2.2.2.1 Будова і принцип дії короткобарабанної печі

Барабанні печі здебільшого мають місткість 0,5–30 т за рідким алюмінієм. Відношення діаметра до довжини становить 1:3, найчастіше – 1:1,5, звідки й назва – короткобарабанні печі (рис. 2.8). Діаметр барабана дорівнює 2,5–4 м. Продуктивність таких печей сягає 70 т/добу. За кордоном експлуатуються короткобарабанні печі, які випускають фірми “Tolltreck Limited” (Велика Британія), “Tonolli” (Італія) та “Remetall” (Іспанія).

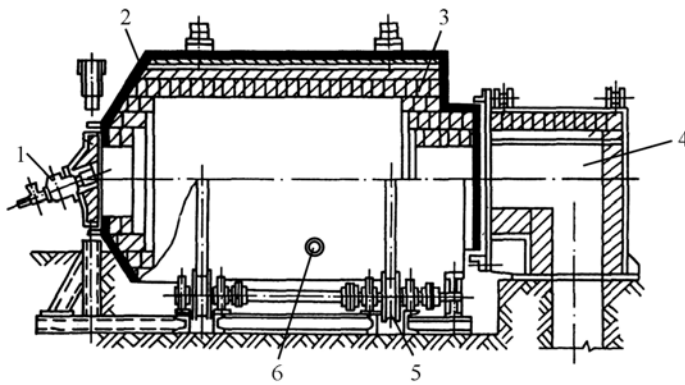
З погляду масо- і теплоперенесення обертіві печі вигідно відрізняються від стаціонарних. Якщо в нерухомій печі метал нагрівається лише внаслідок обігрівання поверхні садки, то в обертівій печі метал нагрівається і зверху, і знизу. В обертівій печі склепіння й черинь постійно обмінюються місцями, тому внутрішня кладка печі, яка нагрівається у верхньому положенні, віддає тепло, коли переходить у нижнє положення. Крім того, метал постійно переміщується в результаті обертання печі, що сприяє теплопередачі. Отже, тепловий к.к.д. обертіві печі значно вищий, ніж стаціонарної.

З погляду технології плавлення обертіві піч також має переваги перед стаціонарною, оскільки матеріал, який завантажується в барабан, враз укривається рідким металом і флюсом та постійно переміщується. Внаслідок поліпшення масоперенесення швидше відбувається плавлення вторинної сировини, а процес плавлення ніби механізується. Постійний контакт рідкого металу з флюсами сприяє частковому рафінуванню сплавів від магнію й цинку.

Плавлення шихти здійснюється у барабані (рис. 2.8), охопленому кожухом, виготовленим з листової сталі завтовшки 16 мм. На кожух насаджені два сталевих бандажі, якими барабан спирається на дві пари сталевих опорних роликів. Упорні котки обмежують осьове переміщення барабана. В середині барабан футеровано шамотною цеглою та шаром азбесту або спеціальною набивною масою. Обертання барабанної печі здійснюється від електродвигуна через редуктор і зубчасті муфти. Швидкість обертання печі становить 1–8 об/хв.

Печі барабанного типу працюють на природному газі або мазуті. Для повнішого використання теплоти факелу пальники встановлюють у торці барабана під кутом близько 20° до горизонтальної осі печі, тобто вони спрямовані на склепіння. Топковий пристрій являє собою поворотну кришку

завантажувального вікна з вмонтованим у ній двопровідним пальником. У позиції завантаження печі цей пристрій відводиться вбік на кут до 110° .



- 1 – пальник (форсунка);
- 2 – кожух;
- 3 – шамотна футеровка;
- 4 – лежак;
- 5 – механізм обертання;
- 6 – льотка для випускання металу

Рисунок 2.8 – Обертова короткобарабанна піч

Завантаження шихти в піч здійснюється через завантажувальну горловинову лотковим живильником, змонтованим на наземному мосту з візком. За допомогою візка можна регулювати завантаження шихти по всьому об'єму печі.

2.3.2.2 Конструктивний розрахунок короткобарабанної печі

Внутрішній діаметр печі можна визначити за формулою:

$$D_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{\text{дг}}}{\pi \cdot \omega_t}}, \quad (2.1)$$

де $V_{\text{дг}}$ – секундний об'єм димових газів, що утворюються в печі за її середньої температури, $\text{м}^3/\text{с}$;

ω_t – допустима швидкість руху газів у печі за її середньої температури (для більшості печей знаходиться в межах $0,5\text{--}2,0$ м/с), м/с.

Довжину печі визначаємо за формулою:

$$L = V_P / S_P, \quad (2.2)$$

де $V_P = V_{\text{Al}} + V_{\text{Ф}}$ – об'єм, що зайнятий розплавом при завантаженні алюмінієвого сплаву та флюсів, м^3 ;

S_P – площа ефективного перерізу печі (площа перерізу розплаву), м^2 .

Коефіцієнт заповнення перерізу печі матеріалом φ знаходимо за формулою:

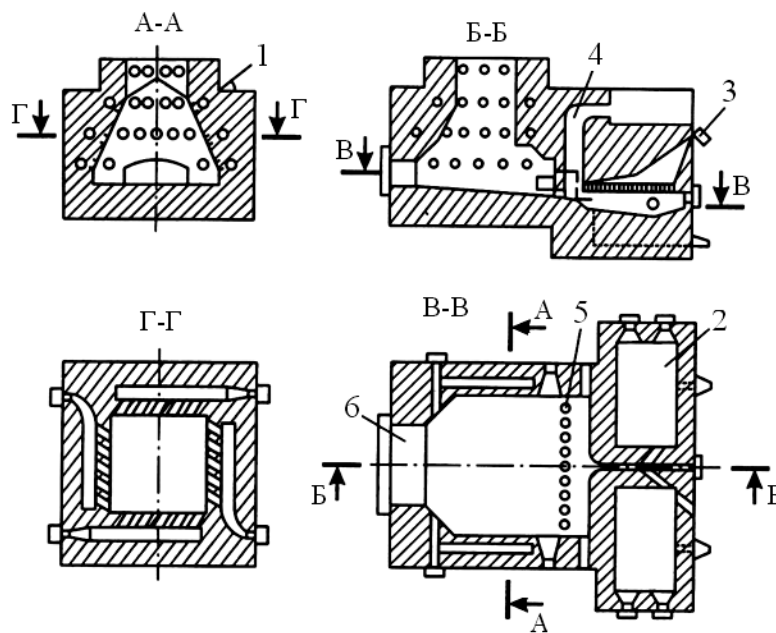
$$\varphi = S_P / S_{\text{заг}}, \quad (2.3)$$

де $S_{\text{заг}} = \pi \cdot R_{\text{вн}}^2$ – загальна площа перерізу печі, м^2 .

2.2.3 Шахтні печі

Шахтні печі працюють з більш високим тепловим к.к.д. (близько 60 %), оскільки шихта, що завантажується і рухається зверху вниз, прогрівається гарячими газами, що відходять і рухаються назустріч. У піч можна завантажувати майже не підготовлену (разом з залізними приробками) шихту, без підсушування (вологу), об'ємом до 10 м³ за одне завантаження, що підвищує продуктивність печі і праці обслуговуючого персоналу.

Існує кілька різновидів шахтних печей. Один з варіантів конструкції надано на рис. 2.9. Піч складається із шахти і двох ванн-накопичувачів місткістю 4 т кожна, що сполучаються з шахтою поздовжніми і поперечними жолобами, по яким перетікає розплавлений метал. Шахта з черенем, похилим у бік накопичувачів, відокремлюється решіткою, що запобігає надходженню в накопичувачі залізних приробок. Предмети, що не оплавлюються та накопичуються на черені шахти, періодично видаляють через бічні вікна.



1, 3 – високошвидкісні пальники; 2 – накопичувач;
4 – димохід; 5 – решітка для затримування залізних
приробок; 6 – вікно для видалення залізних приробок

Рисунок 2.9 – Шахтна піч

Шихта нагрівається швидкісними, високонапірними пальниками, розташованими на різних рівнях за висотою шахти. При цьому роблять

диференційоване нагрівання простору печі: зменшують або збільшують нагрівання шихти, що знаходиться на черені або на будь-якому іншому рівні шахти печі. Найвищого ефекту досягають, коли шахтні печі працюють як оплавні. Однак у разі експлуатації таких печей у комбінації з іншими плавильними печами одержують ще більшу економічну ефективність.

2.2.4 Трубчасті сушильні печі. Барабанні сушила

Для сушіння вологого матеріалу застосовують трубчасті сушильні печі – барабанні сушила прямого та непрямого (побічного) нагрівання.

Сушила прямого нагрівання працюють за принципом протитечії – вологий матеріал та газ рухаються назустріч один одному. Сипучі матеріали, що переробляються, переміщуються вздовж барабана, нагріваючись за рахунок теплоти, що виділилася при спалюванні палива. Для перемішування та транспортування матеріалу до розвантаження барабан оснащено насадками різного виду. Довжина барабана досягає 27 м, діаметр до 3,5 м при співвідношенні діаметра до довжини від 1:4 до 1:8. Швидкість обертання барабана становить 2–6 об/хв. Барабан встановлено на роликівих опорах під кутом 3–6° до горизонталі.

Опорні пристрої (бандажі та опорні ролики) сприймають навантаження і забезпечують плавне обертання сушила. Навантаження від барабана на ролики передається за допомогою бандажів. Трубчасті обертові печі невеликих розмірів мають дві опори, а печі великої довжини є багатоопорними. Відстань між опорами приймають до 20 м. Діаметр роликів складає 0,25–0,33 діаметра бандажа, ширина на 40–80 мм перевищує ширину бандажа. Привід печі зазвичай встановлюють на рівній відстані від торців барабана. Він складається з зубчастої пари (венцової і приводної шестерень), редуктора і електродвигуна.

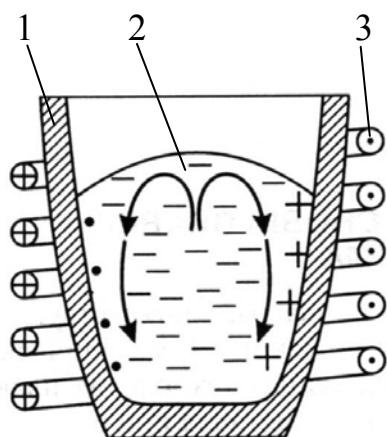
2.3 Індукційні печі. Печі опору

2.3.1 Індукційні тигельні печі

Індукційні тигельні печі є одним із досконалих і економічних плавильних агрегатів, які застосовуються при виробництві чушкових алюмінієво-силіцієвих сплавів та лігатур.

В основу роботи індукційної тигельної печі покладено трансформаторний принцип передачі електричної енергії індукцією від первинного ланцюга до вторинного.

Первинною обмоткою повітряного трансформатора є індуктор, усередині якого знаходиться вогнетривкий тигель з металом. Розплавлений метал є вторинною обмоткою. Під час проходження по індуктору змінний струм створює навколо нього магнітне поле. Частина магнітних силових ліній проходить крізь метал у тиглі та збуджує в ньому електричний струм, який нагріває метал. Унаслідок відштовхувальної дії протилежно спрямованих струмів в індукторі та рідкому металі, середня частина ванни підіймається, що зумовлює енергійне перемішування металу (рис. 2.10).



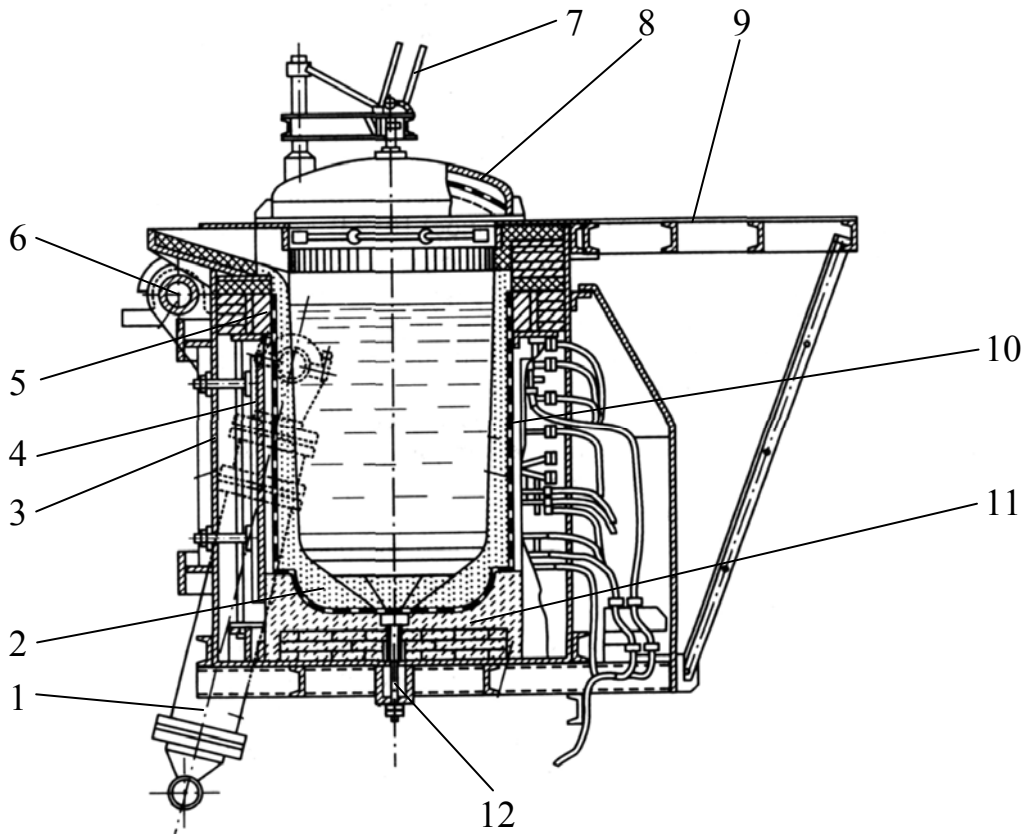
- 1 – тигель;
- 2 – рідкий метал;
- 3 – індуктор

Рисунок 2.10 – Перемішування металу в індукційній тигельній печі під дією електродинамічних сил

Індукційна тигельна піч (рис. 2.11) являє собою тигель з вогнетривкого матеріалу, встановлений на черені, закріпленому у металевому каркасі, і оточений індуктором з магнітопроводами. Піч повертається навколо осі за допомогою двох гідравлічних циліндрів, розміщених з боків печі. Циліндричний кожух з листової сталі, що зварений з рамою та робочою площадкою, утворює каркас печі.

Індуктор – це профільована мідна трубка. Він складається з трьох котушок, виконаних у вигляді виткових секцій з мідних трубок, по яких циркулює вода. Дві нижні котушки, які мають 24 витки, є первинною обмоткою печі, а третя верхня котушка, що має 8 витків, не підключена до напруги й використовується тільки для охолодження верхньої частини тигля.

Недоліком індукційних тигельних печей є можливість порушення цілості оксидної плівки на поверхні ванни і замішування її в розплав у результаті його інтенсивного перемішування.



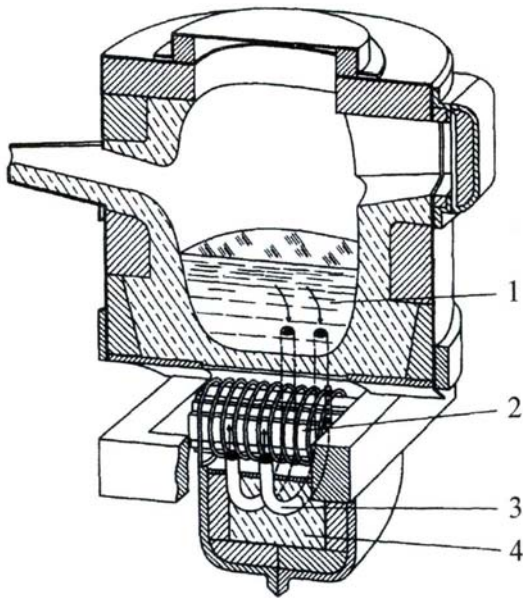
- 1 – гідравлічний циліндр; 2 – тигель; 3 – каркас;
 4 – магнітопровід; 5 – металеве кільце; 6 – вісь повертання печі;
 7 – димохід; 8 – футерована кришка; 9 – робоча площадка;
 10 – індуктор; 11 – черинь; 12 – електрод сигналізації

Рисунок 2.11 – Індукційна тигельна піч ІАТ–6

2.3.2 Індукційні каналні печі

Індукційна канална піч (рис. 2.12), за принципом дії, – це короткозамкнений трансформатор, вторинною обмоткою якого є U-подібний канал у футеровці череневого каменю, заповнений металом. Первинна обмотка – мідна трубка у вигляді спіралі, охолоджувана проточною водою. U-подібний канал охоплює спіраль первинної обмотки, всередині спіралі міститься залізний стрижень – магнітопровід.

Змінний струм, проходячи по первинній обмотці, утворює навколо неї та вторинної обмотки змінне магнітне поле, що створює в каналі електрорушійну силу індукції. Струм, що виник у каналі, нагріває метал, який знаходиться в ньому, і внаслідок його циркуляції нагріває весь метал в печі.



1 – плавильний простір;

2– індуктор;

3 – U-подібний канал;

4– череневий камінь

Рисунок 2.12 – Індукційна канална піч

Індукційні каналні печі складаються з двох основних частин: шахти і змінної індукційної нагрівальної системи (череневий камінь з каналом). Кожух печі виготовляють з листової сталі, шахту футерують вогнетривкою цеглою або набивною масою. Кожух череневого каменю виготовляють з немагнітних сплавів і футерують методом набивання вогнетривкою крихтою із закріплювачем. Канали, що охоплюють первинну котушку і розміщені в камені, виконують під час набивання футеровки за шаблоном.

Індукційні каналні печі мають наступні переваги: а) невисокі втрати металу на угар; б) можливість плавлення без флюсу; в) високий тепловий к.к.д. (70 %) і продуктивність.

До недоліків слід віднести: а) необхідність залишку в печі металу від попереднього плавлення, що ускладнює перехід на плавлення сплаву, відмінного за хімічним складом від попереднього; б) заборона на плавлення брухту з залізними приробками; в) заростання каналів внаслідок осадження оксидів алюмінію на їхніх внутрішніх стінках, а отже, зниження інтенсивності циркуляції металу у ванні.

Індукційні каналні печі доцільно застосовувати під час безперервної роботи для виготовлення металу або сплаву одного складу (міді, нікелю, мідних і нікелевих сплавів, цинку, алюмінію і його сплавів).

Маркування індукційних печей складається з літер і цифр. На першому місці розташована літера «І», яка вказує тип печі – індукційна. Друга літера вказує тип сплаву (металу), що виплавляють: А – алюміній та його сплави, Г –

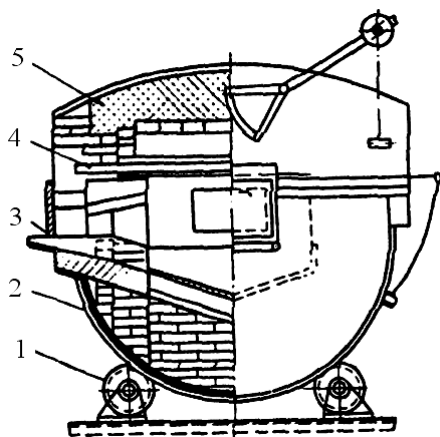
магній та його сплави, Л – мідь та її сплави – латуні, Ц – цинк та його сплави. Наступна літера вказує тип печі: К – канална, Т – тигельна. Цифри після літер характеризують місткість печі. Наприклад, ІАТ–6 – індукційна тигельна піч місткістю 6 т для виробництва алюмінієвих сплавів.

2.3.3 Печі опору

Поворотна відбивна електропіч опору САН (рис. 2.13) має місткість від 0,5 т до 20 т, використовується як міксер-накопичувач під час розливання алюмінію у чушки або для сплавляння кристалічного силіцію з електролітичним алюмінієм і легуючими компонентами.

Основні переваги цих печей:

- а) значне зниження угару порівнянно з полумєневими печами;
- б) висока продуктивність, що зумовлюється великою місткістю і потужністю;
- в) високий коефіцієнт корисної дії (60–70 %);
- г) порівняно незначне поглинання газів розплавом;
- д) порівняно невисока витрата електроенергії (450–500 кВт·год/т);
- є) простота конструкції.



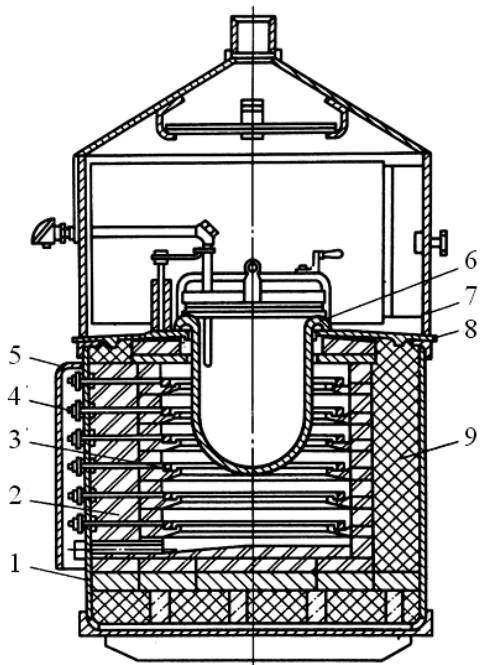
- 1 – коток;
- 2 – кожух;
- 3 – льотка;
- 4 – електронагрівник;
- 5 – футеровка

Рисунок 2.13 – Поворотна відбивна електропіч САН

До недоліків печей цього типу необхідно віднести довгочасність сушіння їх після ремонту, а також неможливість проведення рафінування розплаву безпосередньо в самій печі, тому що при цьому можливі потрапляння крапель металу на спіраль нагрівальних елементів і виведення їх із ладу. Екранування нагрівальних елементів печі в цьому випадку недоцільно, тому що приводить до помітного подовження часу плавки.

Тигельні печі опору САТ (рис. 2.14) складаються із циліндричного кожуха, футеровки з вогнетривкої шамотної цегли, нагрівних елементів, виготовлених із

ніхромової стрічки або дроту, теплоізоляційного шару, що знаходиться між корпусом печі й футеровкою. Кінці нагрівних елементів виведені в коробку для підключення до мережі. Чавунний або сталевий тигель спирається на плити, закріплену на кожусі печі. Піч обладнана витяжним зонтом.



- 1 – кожух;
- 2 – футеровка;
- 3 – нагрівні елементи;
- 4 – кінці нагрівних елементів;
- 5 – коробка;
- 6 – тигель;
- 7 – витяжний зонт;
- 8 – плита;
- 9 – теплоізоляційний шар

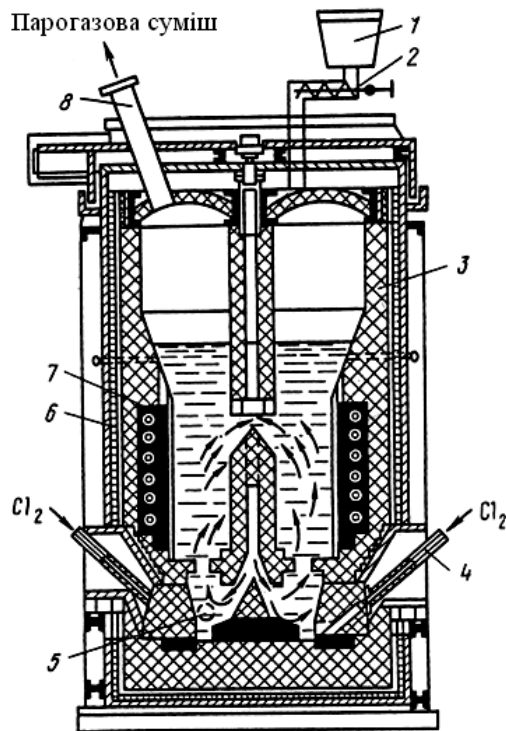
Рисунок 2.14 – Тигельна піч опору САТ

Печі САТ прості по конструкції й одержали широке застосування для виплавлення сплавів, що легко окиснюються, оскільки забезпечують: високу якість розплаву і незначне газонасичення; малий угар металу; високу продуктивність; високий к.к.д. (до 70 %); порівняно невисоку витрату електроенергії (до 500 кВт·год/т); простоту обслуговування; полегшені умови праці; можливість регулювання температури і контролю технологічних параметрів плавки.

Сольовий хлоратор (рис. 2.15) використовується для хлорування титанвмісної сировини. Конструкція апарата дозволяє безперервно виводити разом з частиною розплаву непрохлорований залишок і, отже, здійснювати практично безперервний процес.

Металевий корпус хлоратора облицьовано діабазовою плиткою і футеровано шамотною цеглою. На черені та в бічних стінках хлоратора розташовано графітові електроди, призначені для розігрівання апарата під час пуску і роботи зі зниженою продуктивністю. Під час роботи з високою продуктивністю, коли через перебіг реакцій хлорування утворюється достатня кількість теплоти, можлива робота хлоратора з електродами, відключеними від

трансформаторів. Крім того, через водоохолоджувані штанги, що вставлені в електроди, відводиться надлишкова теплота при нормальному режимі роботи.



- 1 – бункер з шихтою;
- 2 – шнековий живильник;
- 3 – шамотна футеровка;
- 4 – фурми для вдування хлору;
- 5 – льотка для зливання розплаву;
- 6 – кожух;
- 7 – графітові електроди;
- 8 – газохід

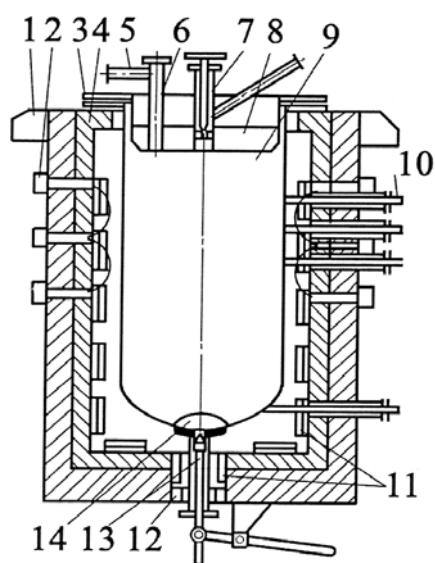
Рисунок 2.15 – Сольовий хлоратор

Шихта в хлоратор завантажується через золотниковий затвор і герметичний шнековий живильник, що працює від загального приводу. Постійний рівень розплаву (3,5–4,2 м) забезпечується накопичувачем, в який перетікає надлишок розплаву. З накопичувача розплав періодично зливається в спеціальні ємності. До череня хлоратора через фурму підводиться газоподібний хлор. Парогазова суміш, що утворюється, через камеру попереднього охолодження надходить в конденсаційну систему.

Схема установки відновлення тетрахлориду титану надана на рис. 2.16. Установка складається з електричної шахтної печі опору, апарата відновлення, комунікацій підведення тетрахлориду титану $TiCl_4$, аргону, води, обладнання для контролю та регулювання процесу. Піч, яка футерується вогнетривкою і теплоізоляційною цеглою, використовується для нагрівання апарата.

На внутрішній поверхні футеровки підвішено ніхромові нагрівники, які розподіляють по двом – чотирьом зонам. У печі є система охолодження, що складається з обладнання для підведення холодного і відведення гарячого повітря. В нижній частині печі є отвір для охолодження злиального обладнання, також розміщено два кронштейни для кріплення важеля та пневмоциліндру приводу вузла зливання хлориду магнію. Для вимірювання

температури поверхні зовнішньої стінки реактора на рівні кожної електричної зони є отвори для введення термопар. Основний елемент апарата відновлення – реторта, яка є циліндром, виготовленим із нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т товщиною 15–25 мм зі сферичним днищем і водоохолоджуванім фланцем. На фланці реторти є кільцевий паз для розміщення гумової прокладки. До днища реторти приварено патрубок із фланцем для приєднання зливального обладнання. Кришка апарата герметизує його. На ній розміщено вузли подавання в апарат вихідних речовин і інертного газу. Кришку заглиблюють в реторту на 250–350 мм, що запобігає виникненню в апараті холодної зони та утворенню нижчих хлоридів титану.



- 1 – опора печі; 2 – колектори подавання та відведення повітря; 3 – водоохолоджуване фланцеве з'єднання; 4 – футеровка печі;
- 5 – штуцер вакуумування та подавання аргону;
- 6 – вузол заливання магнію; 7 – вузол подавання тетрахлориду титану; 8 – кришка реактора;
- 9 – реторта; 10 – контактні термометри (термошупи); 11 – нагрівники; 12 – піщаний затвор; 13 – шток зливного пристосування;
- 14 – несправжнє днище

Рисунок 2.16 – Апарат відновлення

Несправжнє днище апарата є опорою для блоку губчастого титану. Днище запобігає потраплянню титану, що утворюється, в отвір зливального обладнання, створює простір між днищем реторти і блоком титану. Несправжнє днище – металевий диск зі сталі 12Х18Н10Т товщиною 20–50 мм, посилений знизу ребрами жорсткості.

Зливальне обладнання – один з найважливіших вузлів апарата відновлення, повинно бути надійним і зручним в обслуговуванні. В міру збільшення габаритів апаратів здійснено перехід до розміщення зливального обладнання внизу реторти.

2.4 Руднотермічні та електронно-променеві печі

2.4.1 Руднотермічні печі

Дугові електричні печі, які використовують для виплавлення металу та шлаку з руд і концентратів, одержали назву руднотермічних дугових печей. Руднотермічні печі використовують при виробництві силікоалюмінію, силіцію, титанових шлаків, міді, нікелю, олова, цинку, свинцю та ін.

Руднотермічні печі є агрегатами безперервної дії.

За потужністю руднотермічні печі можна поділити на групи: а) печі малої потужності (1,0–2,5 МВт); б) печі середньої потужності (5–12 МВт); в) печі великої потужності (16,5–100 МВт).

Руднотермічні печі залежно від форми ванни поділяють на круглі і прямокутні печі. Переваги круглих печей: а) легше герметизувати склепіння; б) потужність, що виділяється в шихті, рівномірно розподіляється по всій ванні; в) можливе обертання печі.

За способом встановлення ванни розрізняють печі з нерухомою і рухомою ванною.

За конструкцією печі поділять на відкриті, закриті та напівзакриті.

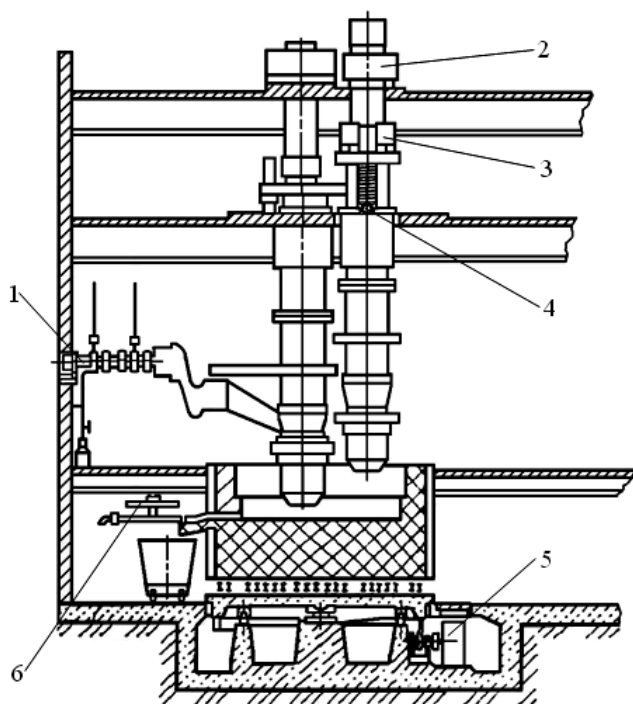
Маркування руднотермічних печей складається з літер і цифр. На першому місці розташована літера «Р», яка вказує тип печі – руднотермічна. Друга літера вказує форму ванни: К – кругла, П – прямокутна. Наступна літера вказує тип печі: О – відкрита, З – закрита. Цифри після літер характеризують потужність печі. Наприклад, РКО-16,5 – руднотермічна кругла відкрита піч потужністю 16,5 МВт.

Первинний алюмінієво-силіцієвий сплав (силікоалюміній) виплавляють у відкритих круглих печах типу РКО-16,5 (рис. 2.17) з трьома однофазними трансформаторами потужністю по 5,5 МВА кожен.

Руднотермічна піч є круглою ванною, яка футерована вогнетривкою цеглою і вугільними блоками (рис. 2.17). Процес ведуть так, що на бічних стінках ванни утворюється гарнісаж, що і захищає їх. Сталевий кожух її встановлюється на фундамент нерухомо або обертається за допомогою спеціального механізму. У нижній частині ванни є отвір (льотка) для випуску одержаного сплаву. Ця частина печі називається горном. Верх ванни, через який завантажується шихта у вигляді брикетів, гранул або шматків, називається

колошником. Над ванною підвішені електроди, які самоспікаються або випалені, діаметром 1400 мм і висотою приблизно 15 м. Три електроди розміщені так, що в плані є кутами рівнобічного трикутника. До щік підвісного електродотримача підведені струмоведучі шинопроводи від пічних трансформаторів.

Електрод має кожух з листової сталі товщиною 2 мм, всередині якого по твірній циліндра розміщені ребра жорсткості – сталеві смуги. У кожух надходить сира електродна маса, що в міру занурення в зону високих температур спікається. У процесі плавлення відбувається вигоряння електрода, тому електрод безупинно опускається разом із кожухом, що оплавляється у ванні. Для утримання електрода є спеціальний механізм, що складається з верхнього і нижнього кілець та гідропідйомника. Кільця складаються із двох півкілець, що можуть спеціальним механізмом затискати електрод і сприймати всю його вагу. Під час руху електрода вниз він затиснутий нижнім кільцем, а верхнє в цей час розтиснене, і за допомогою гідропідйомника електрод може плавно опускатися під дією своєї ваги. Коли нижнє кільце займає крайнє нижнє положення, електрод затискається верхнім кільцем, нижнє розтискається, і електрод підіймається у верхнє положення (перепускання електрода). Рух електрода вгору і вниз, а також його перепускання здійснюються за допомогою дистанційного керування.



- 1 – коротка мережа;
- 2 – затискне кільце;
- 3 – пристрій для перепускання електродів;
- 4 – гідропідйомник;
- 5 – механізм обертання;
- 6 – апарат для пропалювання льотки

Рисунок 2.17 – Руднотермічна електропіч

Змінний трифазний струм подається до електродів від пічного трансформатора через коротку мережу і електроконтактний вузол, що складається з мідних порожнистих щік, усередині яких циркулює вода. Щоки з великим зусиллям притискаються до електрода затискним кільцем із двох півкілець. Щоки розміщені в зоні спеченого електрода, що має достатню електропровідність.

Важливою санітарно-гігієнічною особливістю конструкції застосовуваних руднотермічних печей є відсутність склепіння над колошником (крім надколошникового зонта) для локалізації і видалення пічних газовиділень. Бічні стінки зонта виконані у вигляді штор, а верхня частина з'єднана з газоходами витяжної вентиляції.

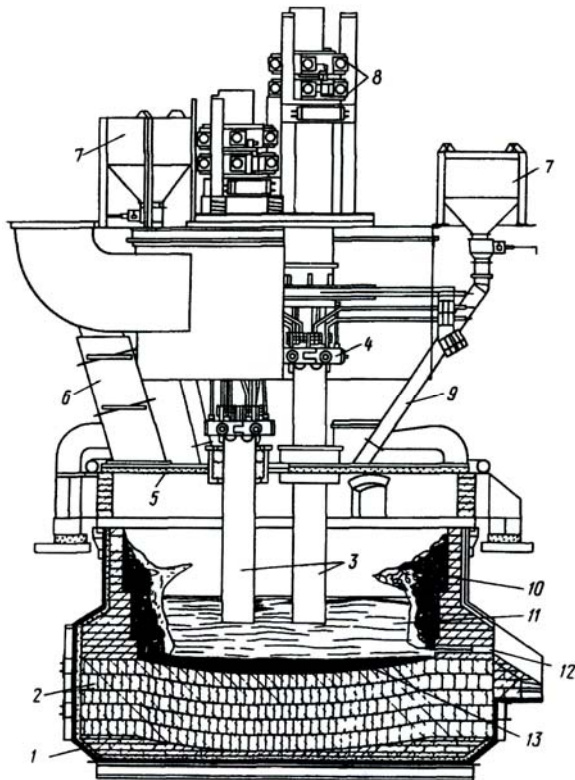
Рудотермічні печі працюють у змішаному режимі – частина енергії виділяється в електричних дугах, частина – при проходженні струму через омичний опір шихти. Струм проходить через тверду шихту, що оточує електрод, шар розплавленого силікоалюмінію на черені ванни і через шихту на інший електрод. Для концентрації великої потужності в порівняно малому об'ємі необхідно мати шихту з великим електроопором і глибокою посадкою електродів, тобто невелику відстань від електрода до череня.

Під кожним електродом утворюється ніби окремих «тигель», але «тиглі» повинні сполучатися між собою, оскільки піч має одну лютку. Для руйнування перемичок між «тиглями» піч має механізм обертання. Однак фактично відбувається не обертання, а повільне повертання печі від деякого середнього положення то в один, то в інший бік так, що переміщення кожуха становить приблизно 400 мм від цього середнього положення.

У кожній фазі печі є знижувальний трансформатор, що використовується також для регулювання напруги. З боку низької напруги електричне коло має бути по можливості коротким для зниження індуктивного опору; напруга з низького боку має становити 130–170 В. Для підвищення коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$) печі мають конденсатори для компенсації реактивної потужності, що підключаються з боку високої чи низької напруги.

Для виробництва титанових шлаків використовують руднотермічні печі (рис. 2.18) потужністю 10,5 МВт з самоспівливими електродами діаметром 900 мм або з графітованими електродами діаметром 610 мм і 710 мм. Діаметр кожуха становить 7,2 м, а висота – 4,5 м, діаметр ванни на рівні розплаву дорівнює 5,6 м, на рівні колошника – близько 6,5 м. Щільність струму в

графітованих і самоспівливих електродах становить не більше 12 A/cm^2 і 3 A/cm^2 відповідно.



- 1 – кожух;
- 2 – футеровка;
- 3 – електроди;
- 4 – струмопідведення;
- 5 – водоохолоджуване склепіння;
- 6 – вентиляційна труба;
- 7 – бункера з шихтою;
- 8 – система перепускання електродів;
- 9 – труботечки;
- 10 – гарнісаж;
- 11 – шлак;
- 12 – лютка;
- 13 – чугун

Рисунок 2.18 – Руднотермічна піч для виплавки титанових шлаків

Показники процесу залежать від виду сировини, що переробляється, типу відновника, характеру підготовки шихти (порошкоподібна або брикетована), конструкції електропечі (з відкритим, напіввідкритим або закритим колошником) та ін.

Піч має досить високу питому (об'ємну) потужність, що дозволяє здійснювати швидке прогрівання шихти до температури близько $900\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ без помітного її проплавлення, а також забезпечувати підтримання в рідкоплинному стані тугоплавких шлаків на кінцевій стадії процесу.

Під час плавлення непроплавлена шихта обрушується в розплав, що супроводжується інтенсивним газовиділенням і підйомом шлаку на значну висоту. Тому висоту шахти печі збільшують. Для попередження аварійного відключення печі під час обрушення шихти в ванну забезпечують підвищену швидкість підйому електродів (близько $2,5 \text{ м/хв}$), що в кілька разів більше, ніж у звичайних печей. Привід здійснюється від лебідки з кінцевими обмежувачами, що лімітують максимальне верхнє і нижнє положення електродів.

Колошникові гази відкритих печей, що містять близько 0,6 % оксиду вуглецю і 3–5 г/м³ пилу, видаляються через витяжну тягу природною вентиляцією. Гази печей, що працюють в напівзакритому режимі, містять близько 30 % CO₂ і видаляються з печі за допомогою вентилятора.

У міру витрати графітованих електродів необхідно робити їхнє перепускання (змінювати положення струмопідвідних щік) і нарощування. Перепускання здійснюють на 300–500 мм протягом плавки після того, як витрачено близько 70–80 % необхідної на процес електроенергії. Піч при цьому вимикають. Цю операцію виконують із використанням спеціального пристосування після випускання розплаву з печі.

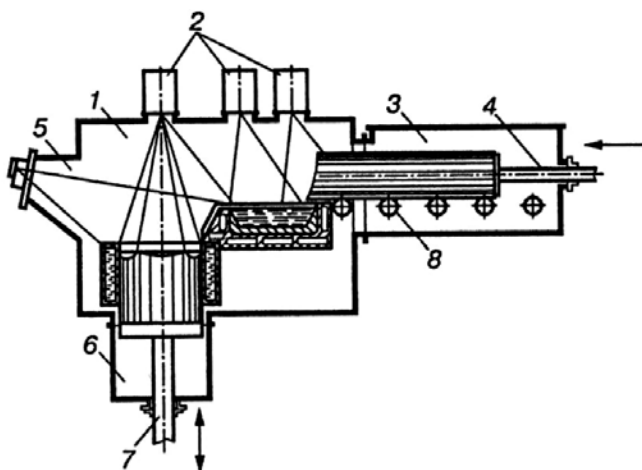
2.4.2 Електронно-променеві печі

В останні роки електронно-променеві печі для виплавки злитків титану та його сплавів набули промислового використання.

Сутність методу електронно-променевого переплаву полягає в тому, що пучок електронів, що володіє високою енергією, бомбардує шихту або металеву заготовку, яка розплавляється в водоохолоджувальному кристалізаторі. Пристрої, призначені для отримання електронів, надання їм великих швидкостей (60–100 тис. км/с) і збирання потоку електронів в промінь з виведенням його в плавильний простір, називають електронними гарматами.

За конструкцією всі електронно-променеві печі поділяють на три типи: а) з використанням металу, що переплавляється в якості анода; б) з радіальними електронними гарматами; в) з аксіальними гарматами.

Поширення отримали печі з радіальними і аксіальними гарматами. У печах, забезпечених радіальними гарматами, заготовка, яка сплавляється, подається зверху, що є недоліком печей, оскільки внаслідок цього їх висотні габарити за інших рівних умов вдвічі більші, ніж у печей з горизонтальним подаванням і аксіальним гарматами. В останні роки застосовують печі з проміжною ємністю (рис. 2.19). Завдяки збільшенню поверхні розплаву прискорюється процес рафінування, за рахунок чого зростає їх продуктивність. Поряд з переплавом металевих заготовок в електронно-променевих печах переплавляють і шихту. Такі печі обладнано герметичними бункерами і живильниками.



- 1 – камера плавлення;
- 2 – електронні гармати;
- 3 – камера заготовки;
- 4 – механізм подавання заготовки;
- 5 – оглядова система;
- 6 – камера злитка;
- 7 – механізм витягування злитка;
- 8 – рольганг

Рисунок 2.19 – Схема електронно-променевого агрегату з проміжною ємкістю

2.5 Електролізери для одержання та рафінування кольорових металів

Для електролітичного виробництва кольорових металів або сплавів використовують *електролізні ванни* або *електролізери*.

2.5.1 Електролізери для одержання алюмінію

2.5.1.1 Типи електролізерів для одержання алюмінію

Вугільний струмопровідний черинь алюмінієвого електролізера (рис. 2.20) працює як катод, а занурені в розплав електроди як анод. У плані електролізна ванна має прямокутну форму. Кожух роблять зі сталевих листів, які футерують шаром шамоту, а саму ванну викладають вугільними плитами і блоками.

Алюмінієві електролізери класифікують за потужністю та конструкцією.

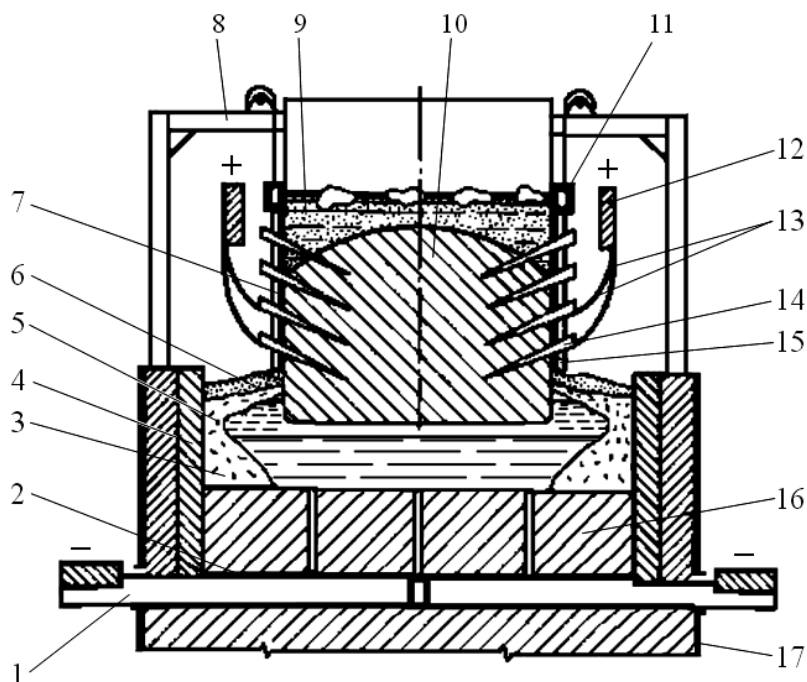
Потужність електролізерів (струмове навантаження) може бути малою (80–100 кА), середньою (150–175 кА) та великою (255–500 кА).

За конструкцією анода та анодного струмопідведення алюмінієві електролізери поділяють на три типи (рис. 2.21):

- а) електролізери з самоспівним анодом та бічним струмопідведенням;
- б) електролізери з самоспівним анодом та верхнім струмопідведенням;
- в) електролізери з попередньо випаленими анодами.

Алюмінієвий електролізер будь-якої конструкції і потужності складається з катодного пристрою, анодної системи, катодної і анодної ошиновок, опорних

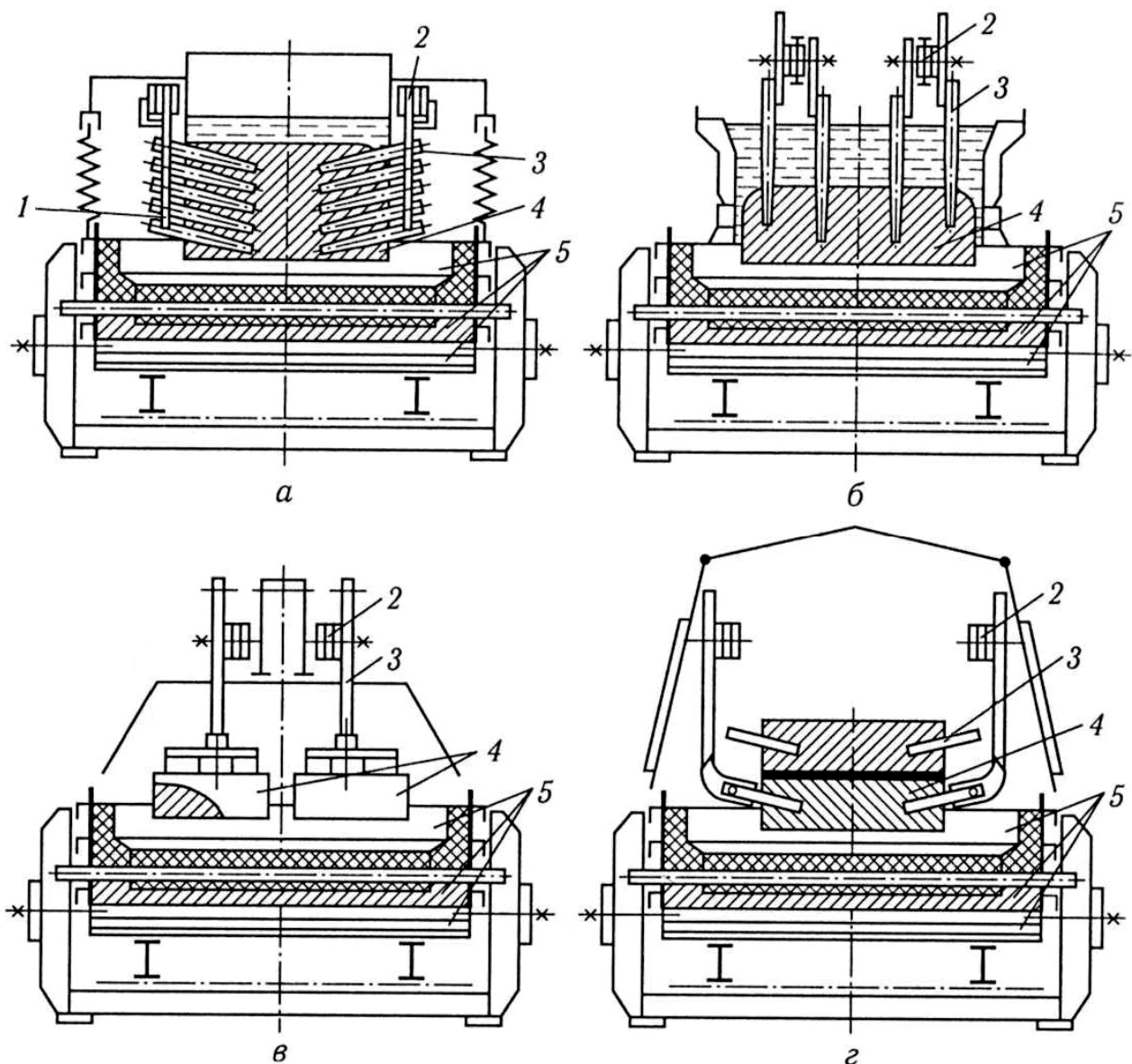
металоконструкцій. Електролізери також обладнено спеціальними пристроями для вловлювання та відведення газів, що утворюються під час електролізу.



1 – стрижень для підведення струму; 2 – чавунне залиття;
 3 – охолодь; 4 – вугільна футеровка; 5 – бічний гарнісаж;
 6 – корка електроліту; 7 – кожух анода; 8 – каркас; 9 – рідка
 анодна маса; 10 – анод; 11 – анодна рама; 12 – анодна шина;
 13 – анодний спуск; 14 – штир для підведення струму; 15 – упорна
 серга; 16 – вугільний катодний блок; 17 – катодний кожух

Рисунок 2.20 – Схема електролізної ванни для одержання алюмінію з самоспівним анодом та бічним струмопідведенням

В електролізерах з самоспівним анодом і бічним струмопідведенням (рис. 2.21, а) основою анода є прямокутний кожух, зварений зі сталевого листа. Безперервне нарощування анода відбувається завдяки постійному завантаженню зверху брикетів анодної маси (нафтовий кокс з кам'яновугільним пеком). Під час роботи, внаслідок згоряння нижньої частини, анод спеціальним пристроєм опускають, забезпечуючи його ковзання всередині кожуха. Завантажена електродна маса у верхній частині кожуха розм'якшується, плавиться, і, просуваючись униз, все більше нагрівається. В зоні високих температур видаляються леткі речовини, маса коксується, спікається і перетворюється на повністю монолітний блок. Підведення струму до самоспів-



- a* – самоспільний анод з бічним струмопідведенням;
б – самоспільний анод з верхнім струмопідведенням;
в – анод із попередньо випалених блоків (багатоанодний);
г – з анодом із попередньо випалених блоків (блочний);
 1 – серга упорна; 2 – анодні шини; 3 – штирі для підведення струму (анодотримач); 4 – анод; 5 – катодний пристрій

Рисунок 2.21 – Електролізери з різними анодами і типами струмопідведення

ливих анодів здійснюється сталевими штирями.

В електролізерах з самоспільним анодом і верхнім струмопідведенням (рис. 2.21, б) штирі допомагають також закріплювати анод над ванною.

Поступово найбільш заглиблені штирі висмикують із затверділої маси і закріплюють їх вище. Через деякий час вони спікаються разом із твердіючою анодною масою. За бічного струмопідведення штирі занурюють у неспечену масу крізь кожух. У процесі роботи у міру згоряння анода нижні штирі витягають і переставляють у верхній ряд. В обох випадках сталеві штирі з'єднані з основною струмопідвідною шиною. Вертикальне струмопідведення є досконалішим, оскільки дає змогу збільшити потужність електролізерів, значно спрощує їх обслуговування та підвищує продуктивність праці.

Використання електролізерів зі самоспівливими анодами дає змогу здешевити процес отримання алюмінію завдяки виключенню з технології високовартісного і тривалого процесу – пресування й випалювання анодів.

Однак це виробництво має істотні недоліки:

а) неоднорідність вихідного матеріалу та знижена щільність унаслідок самовипалювання зумовлюють підвищений електроопір анода і, як наслідок, високі витрати електроенергії;

б) технологія виробництва анодів не забезпечує однорідність розподілу струму по всій робочій поверхні електрода;

в) гази (продукти випалення та коксування анодної маси) значно забруднюють атмосферу цеху.

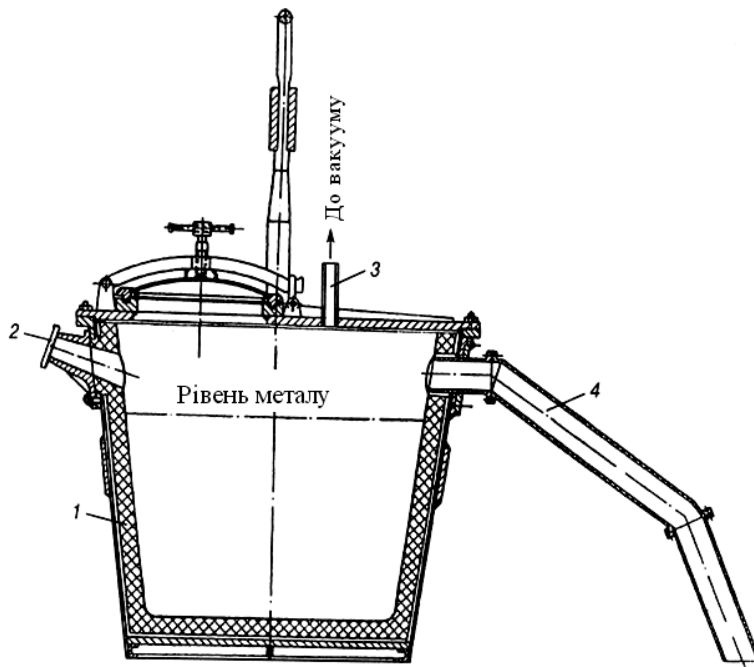
Електролізні ванни із заздалегідь випаленими анодами цих недоліків не мають (рис. 2.21, в). Анодний вузол складається з вугільних або графітизованих блоків (до 20 і більше), розміщених у два ряди. Блоки, що згоріли, замінюють на нові. Ванни мають систему газозловлювання.

До перспективних напрямів в алюмінієвій промисловості належить застосування електролізерів із безперервно випаленими анодами (рис. 2.21, г). У ваннах встановлюють аноди із кількох випалених блоків, розміщених один над одним і склеєних між собою спеціальною вуглецевою масою. У міру витрачання анод нарощують зверху черговим блоком.

Обслуговування електролізерів складається з таких операцій: подавання у ванну глинозему; контролю і коригування складу електроліту; регулювання відстані між анодом і катодом; вилучення алюмінію; обслуговування анодів.

У сучасних електролізерах за добу виробляють 500–1200 кг алюмінію. Його видалення з ванни порушує нормальний перебіг процесу, і тому намагаються максимально збільшити проміжок часу між випусками. Зазвичай алюміній видаляють раз на добу або через 2–5 діб за допомогою спеціальних

вакуум-ковшів (рис. 2.22) місткістю 1,5–5,0 т алюмінію. Ковші футеровані шамотом, робоче розрідження становить 70 кПа, забірний патрубок крізь шар електроліту занурюють у рідкий алюміній і внаслідок вакууму він засмоктується у ківш.



- 1 – футеровка;
- 2 – оглядове вікно;
- 3 – патрубок для приєднання до вакуумного насоса;
- 4 – патрубок для збирання металу

Рисунок 2.22 – Вакуум-ківш для вилучення алюмінію

2.5.1.2 Конструктивні елементи електrolізера

Катодний пристрій. Конструктивна основа катодного пристрою – сталевий кожух. За ступенем теплового захисту череня розрізняють електrolізери без днища та електrolізери з днищем.

Катодні пристрої з кожухами без днища конструюють для електrolізерів малої потужності. Вони встановлюються на цегляний цоколь, викладений на бетонному фундаменті. Цоколь є масивною кладкою, що складається з 4–5 рядів червоної і 2–3 рядів шамотної цегли. Кожух кріплять до фундаменту за допомогою анкерних лап, верхні кінці яких приварюють до кожуха, а нижні заливають в фундамент бетоном. На поверхню шамотної кладки наносять шар череневої вуглецевої маси, на яку укладають у перев'язку череневі вугільні блоки. У нижню частину черневих блоків перед їх розміщенням заливають чавуном сталеві катодні стрижні – блюмси, вільні кінці яких виходять назовні і підводять струм до череня.

Бічні стінки катодного кожуха футерують 1–2 рядами вугільних плит. Простір між плитами і кожухом (40–50 мм) заповнюють засипкою з шамотної крупки або глинозему. Розміри вугільних блоків і плит: череневі блоки мають перетин 400x500 мм і довжину 600 мм, 800 мм, 1200 мм або 1600 мм, в деяких випадках – до 2500 мм; бічні плити – товщину 200 мм, висоту 600–800 мм і довжину 550 мм.

Череневі блоки встановлюють на відстані 25–50 мм один від одного. У простір між блоками набивають череневу вуглецеву масу, яка при випаленні череня коксується, і шви, що утворюються, міцно пов'язують блоки.

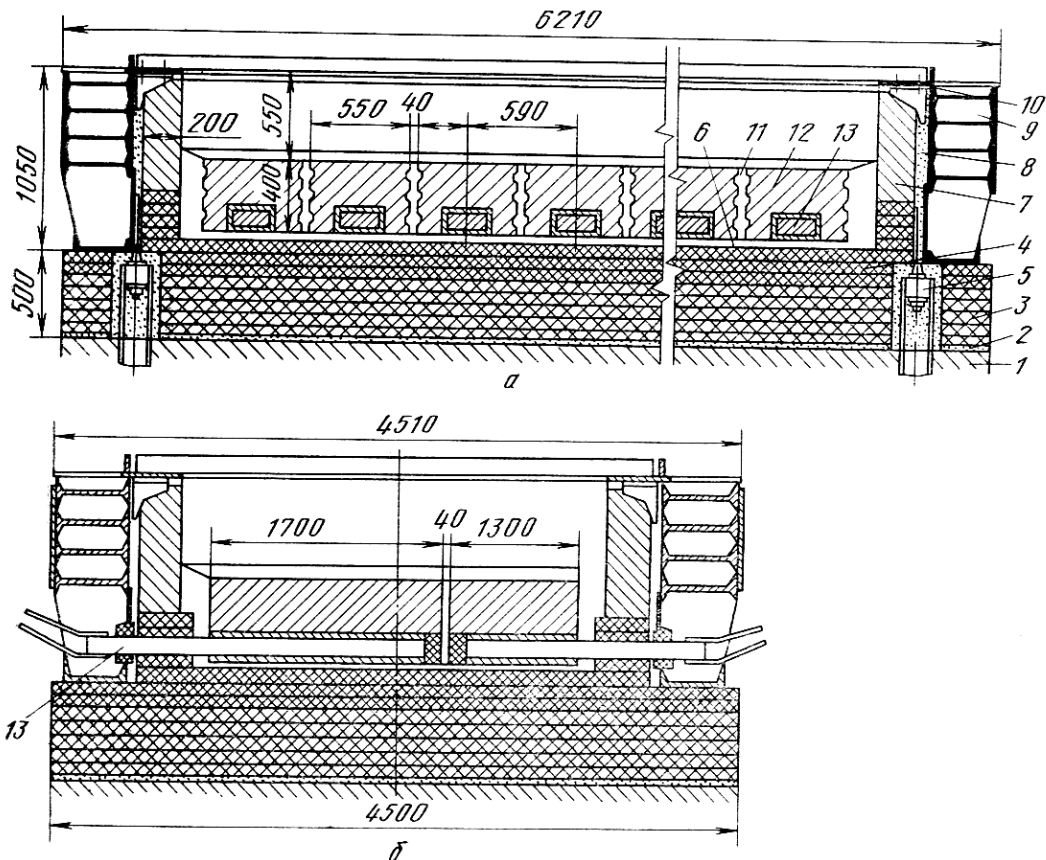
Розміри шахти електролізера залежать від потужності електролізера. Глибина шахти зазвичай становить 400–600 мм, відстань від анода до стінок шахти по подовжній стороні – близько 440–650 мм, по торцевій стороні – близько 500–600 мм.

Кожух без днища зазвичай виконують у вигляді рами, звареної із сталевих балок і листів (рис. 2.23).

Для електролізерів середньої і великої потужності застосовують кожухи з днищем (рис. 2.24) – зварене з листової сталі (товщиною 10 мм) корито, укріплене вздовж поздовжньої сторони балками (контрфорсами). Контрфорси є вертикальними стійками, стягнутими поперек електролізера на рівні днища сталевими тягами попарно. Верхні кінці контрфорсів утримують кожух електролізера від распираючих зусиль у черені, а нижні кінці контрфорсів спираються попарно на залізобетонні розпірні балки. Міцність катодного кожуха визначається жорсткістю контрфорсів.

На катодний кожух електролізерів чотирма колонами спирається несуча конструкція – каркас електролізера. На каркасі кріплять анодний пристрій, укриття електролізера, глиноземні бункери і механізми для переміщення анода і панелей укриття.

Анодний пристрій електролізера з самоспівним анодом складається з анодної кожуха, анодної рами, штирів і власне анода. Анод (рис. 2.21, а, б) знаходиться всередині жорсткого анодного кожуха прямокутної форми, звареного з листової сталі і укладеного для жорсткості в швелерную раму. Між анодом і кожухом прокладають алюмінієвий лист товщиною 1,0–1,5 мм (обичайку), щоб вуглецева маса при коксуванні не чіплялася до сталевого кожуха. Обичайка захищає нижню частину вугільного анода від окислення, а у верхній частині не дозволяє рідкій анодній масі витікати через вікна. Обичайка

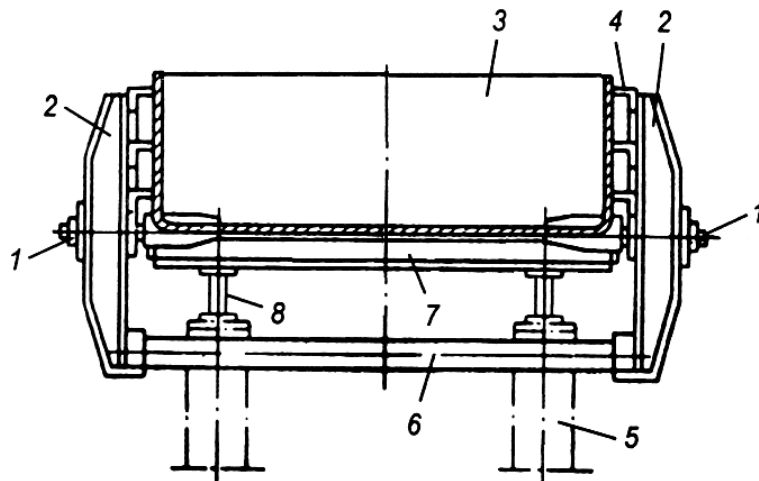


- a* – поздовжній розріз; *б* – поперечний розріз;
 1 – фундамент; 2 – піщаний шар; 3 – червона цегла;
 4 – шамотна цегла; 5 – анкер; 6 – вуглецева подушка;
 7 – вугільні блоки; 8 – засипка з глинозему; 9 – сталевий кожух;
 10 – лист кожуха; 11 – подовий шов; 12 – вугільні
 подові блоки; 13 – катодний стрижень (блюмс)

Рисунок 2.23 – Катодний пристрій електролізера з кожухом без днища

опускається і витрачається разом з анодом. Тому її нарощують зверху, коли кромка алюмінієвого листа виявиться на висоті 250–300 мм від рівня рідкої анодної маси.

Підвіс анода і підведення струму до нього здійснюються штирями, виконаними у вигляді конічних сталевих стрижнів довжиною 800–1000 мм. В електролізерах з бічним підведенням струму штири забивають у тіло анода в шаховому порядку в 4–5 горизонтальних рядів, і вони мають нахил до горизонту приблизно 15 градусів. Два нижніх ряди штирів підключено до струму. Струм до них підводиться з допомогою анодних спусків – мідних смуг,



- 1 – стяжна балка з гайкою; 2 – контрфорси; 3 – корито
 кожуха; 4 – елементи жорсткості поздовжніх стінок;
 5 – залізобетонна колона; 6 – розпірна балка контрфорсів;
 7 – поперечна сталева балка; 8 – поздовжня балка

Рисунок 2.24 – Кожух с днищем контрфорсного типу

верхні кінці яких приварені до анодних шин, а нижні за допомогою клинових з'єднань притиснуті до штирів. В електродизерах з верхнім підведенням струму штири розташовуються в чотири ряди в вуглецевій масі вздовж анода, а по висоті анода – зазвичай на двох, рідше на чотирьох горизонтах. По мірі спрацьовування анода він опускається за допомогою основного механізму.

В електродизерах з випаленими анодами анодний масив зібраний із попередньо випалених вугільних блоків, розташованих в два ряди вздовж ванни (рис. 2.2, в). Кожний анод – вугільний блок шириною 700–900 мм, заввишки 550–650 мм і завдовжки 1450–1600 мм. У блоці (рис. 2.2, в) є гнізда, в які чавуном заливають сталевий кронштейн. Чавун застосовують тому, що він має однаковий з матеріалом анода коефіцієнт теплового розширення. Кронштейн сполучений з алюмінієвим анодотримачем (штангою). Штанги анодотримачей притискають до анодних шин спеціальними затисками. Шини виконують функції анодної рами, одночасно підводять струм та утримують вагу елементів конструкції. Переміщення анодної рами з анодним масивом здійснюється підйомним механізмом, аналогічним основному механізму у електродизерів з самоспівкливим анодом і верхнім струмопідведенням.

2.5.2 Електролізери для одержання магнію

Магнієві електролізери відрізняються від алюмінієвих електролізерів:

а) анодні відсіки електролізерів слід добре герметизувати, оскільки на аноді утворюється газоподібний хлор, який в подальшому використовують у виробництві титану;

б) у конструкції магнієвих електролізерів має бути передбачено розділення магнію та хлору, що утворюються, для уникнення взаємодії цих речовин;

в) магнієві електролізери футерують вогнетривами з алюмосилікатів через погану розчинність оксидів металів у хлоридному розплаві;

г) в магнієвих електролізерах не треба постійно нарощувати або часто замінювати аноди, оскільки хлор, що утворюється на графітованих анодах, не вступає у взаємодію з ними.

У виробництві магнію застосовують електролізери двох типів – діафрагмові і бездіафрагмові.

Діафрагмовий електролізер має прямокутний кожух, зварений зі сталевого листа (завтовшки 12 мм) і укріплений ребрами жорсткості. Зсередини кожух обклеєно листовим азбестом (завтовшки 10 мм). Черинь і стінки шахти викладені з діатомітової і шамотного цегли. Аноди виконують з графітованих вугільних блоків, а катоди – з маловуглецевої сталі марки Ст.3.

Катоди і аноди розташовані в шахті вертикально і скомплектовані в електродних пакетах, підключених до шин, які підводять струм, по паралельній схемі. Кожен такий пакет складається з анода і розташованих по обидві його сторони двох або чотирьох катодів. Число пакетів залежить від продуктивності електролізера. Струмове навантаження на один пакет становить 15–20 кА.

Катод діафрагмового електролізера складається зі сталевого листа, зміцненого ребрами жорсткості, та струмопідводної штанги з вуглецевої сталі. У нормально працюючому електролізері катоди розташовані строго паралельно анодам при межполюсній відстані 5–8 см. Термін роботи катодів діафрагмових електролізерів складає 2,0–2,5 року.

Між анодами і катодом в електроліт занурено на глибину 150–250 мм керамічні перегородки (діафрагми), завдяки яким простір над анодами (анодні комірки), куди спливають бульбашки хлору, відокремлюється від катодних комірок, де накопичується магній. Анодні комірки зверху герметизують

шамотобетонними перекриттями, які прокладено на всю ширину ванни. За поздовжньою віссю перекриття має проріз для анода. Термін роботи електролізера визначається зносом діафрагми.

Діафрагмові електролізери можуть мати верхнє, бічне або нижнє введення анодів. При *бічному введенні* кінці *анода* закладено в кладку бічних стінок електролізера. Струм підводиться з двох сторін алюмінієвими стрижнями, з'єднаними з анодом чавунною заливкою.

В електролізерах з *верхнім введенням анодів* (рис. 2.25) заміна анодів можлива без відключення електролізера. Найбільш вразливою є верхня частина анода, яка виступає над електролітом. Для зменшення швидкості окислення графіту, виступаючі частини анода просочують ортофосфорною кислотою або розплавленим метафосфатом натрію. Хороший ефект дає також водяне охолодження анодних головок, прийняте на деяких закордонних заводах. Термін роботи електролізерів з верхнім введенням становить 12–14 місяців.

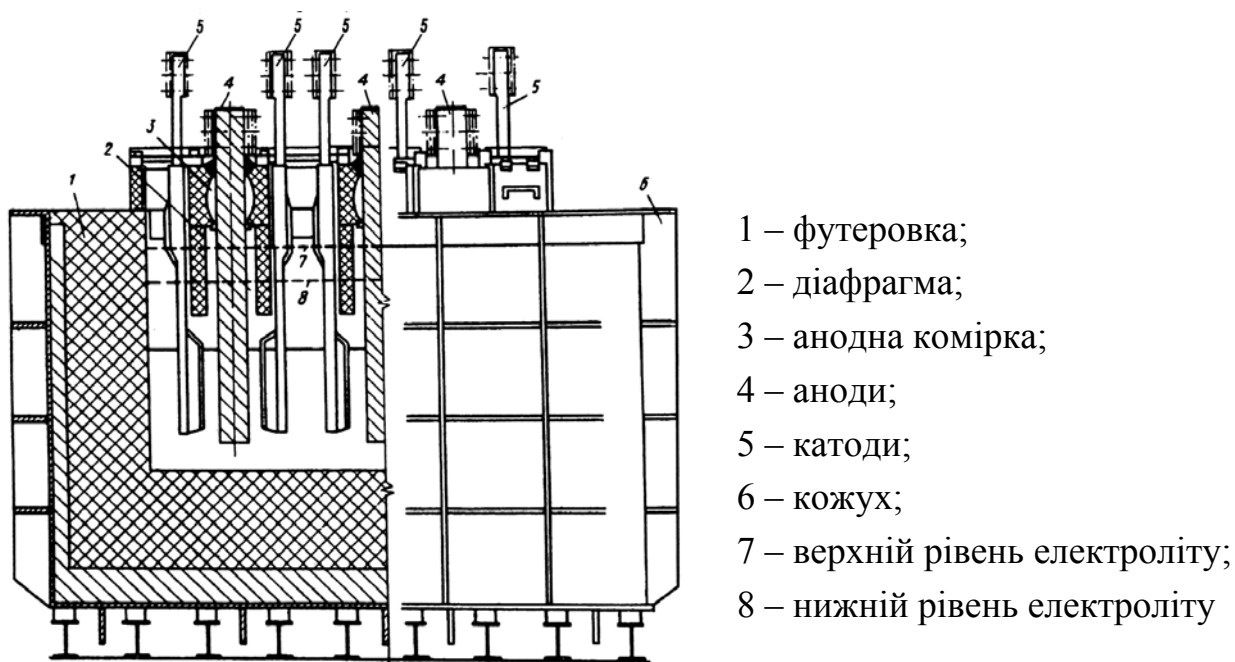
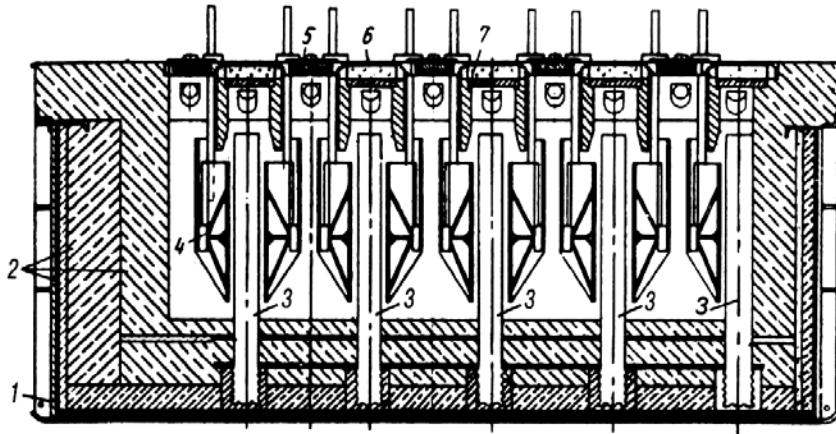


Рисунок 2.25 – Діафрагмовий електролізер з верхнім введенням анодів

В електролізерах з *нижнім введенням анодів* (рис. 2.26) зазначені недоліки відсутні, але ускладнена механізація видалення шламу. Експлуатація їх на карналіті показала, що при інших рівних умовах вихід за струмом на 2–3 % більше і падіння напруги на 0,1–0,2 В менше, ніж у електролізерів з боковим введенням анодів. Іншою перевагою цього електролізера є можливість підвищення його потужності через збільшення ширини робочого простору.

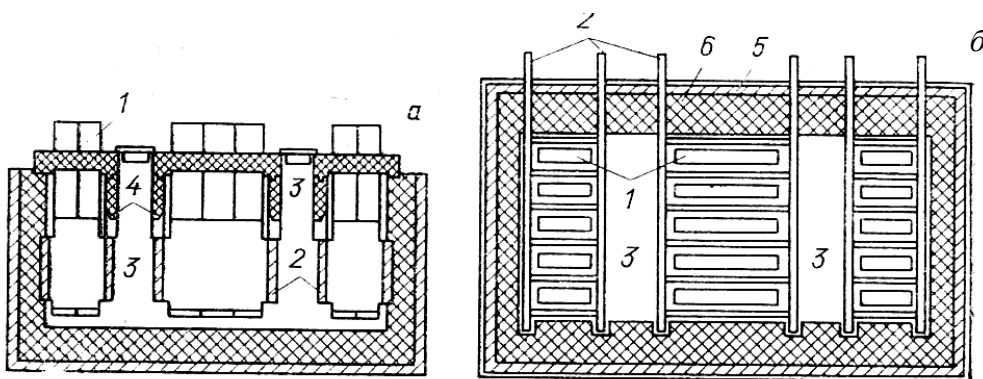


1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – аноди; 4 – катоди; 5 – катодні кришки; 6 – анодні перекриття; 7 – діафрагми

Рисунок 2.26 – Діафрагмовий електролізер з нижнім введенням анодів

Відмінності *бездіафрагмових електролізерів* (рис. 2.27) порівняно з діафрагмовими: а) комірки для збирання магнію відокремлені перегородками від електролізних (робочих) комірок; б) в робочих комірках катодний і анодний простір не розділені діафрагмами; в) катоди закріплені нерухомо, повністю занурені в електроліт, а їх кінці виведено через бічну футеровку.

У бездіафрагмових електролізерах робочий простір більш насичений електродами, ніж в діафрагмових, тому і продуктивність в розрахунку на 1 м^2 електроліту в 1,4–1,5 разів вище.



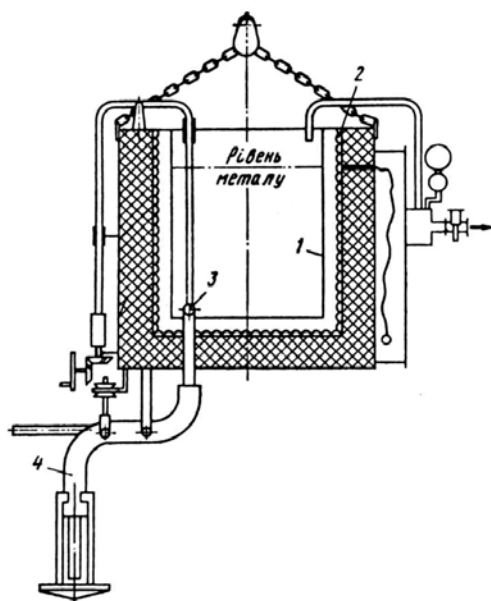
a – поздовжній розріз; *б* – поперечний розріз; 1 – аноди; 2 – рамні катоди; 3 – збірні комірки; 4 – перегородки; 5 – кожух; 6 – футеровка

Рисунок 2.27 – Бездіафрагмовий електролізер із верхнім введенням анодів і рамним катодом, трьома електролізними відділеннями та двома збірними комірками

Перегородки між робочими і збірними комірками перешкоджають змішуванню магнію і хлору, що виділяються. Аноди зібрані з графітових брусів таким самим способом, як і для діафрагмових електролізерів. Ширина анодів визначається шириною робочої комірки. Катоди в кожній комірці об'єднані в єдину конструкцію – рамний катод, що складається з декількох жорстко з'єднаних сталевих листів товщиною 50 мм, розміщених між анодами. Межполюсна відстань є нерегульованою, її величина (6,5 см) змінюється тільки в міру зносу анодної поверхні.

Обслуговування електролізерів складається з завантаження в них сировини і добавок (3–4 рази на добу), підтримання заданих режимів роботи, витягання отриманого магнію (2–3 рази на добу) і шламу.

Для видалення шламу застосовують спеціальний пристрій, що відсмоктує, уявляє собою коліно з двох труб. Вертикальну трубу підключають до вакуум-ковша (рис. 2.28), і вона може обертатися навколо своєї осі, переміщаючи перфоровану горизонтальна трубу по дну електролізера. Частота видалення шламу залежить від виду сировини.



- 1 – тигель;
- 2 – нагрівач;
- 3 – запірний клапан;
- 4 – забірний пристрій

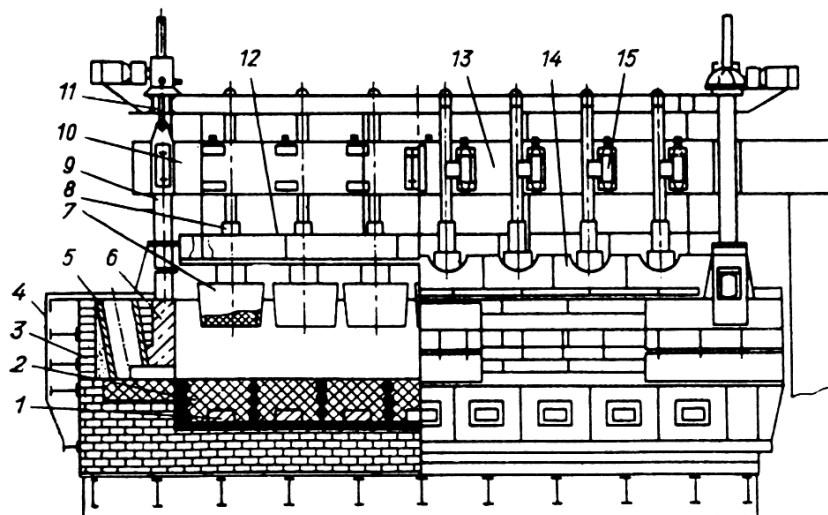
Рисунок 2.28 – Вакуум-ківш для витягання магнію

2.5.3 Електролізери для рафінування алюмінію та магнію

2.5.3.1 Електролізери для рафінування алюмінію

Сучасні електролізери для електролітичного рафінування алюмінію конструюються на силу струму до 75 кА. Катодна і анодна щільності токаодинакові і складають 0,5–0,6 А/см².

По своєму зовнішньому вигляду рафінувальні електролізери схожі на електролізери з випаленими анодами, проте анодний пристрій у них розташований знизу, а катодний пристрій – згори ванни (рис. 2.29).



1 – сталевий стрижень (блюмс); 2 – вугільний череневий блок;
 3 – шамотна футеровка; 4 – кожух; 5 – завантажувальна кишеня;
 6 – магнезитова футеровка; 7 – катод; 8 – катодна алюмінієва штанга;
 9 – металоконструкція, що несе; 10 – катодна рама; 11 – підйомний механізм;
 12 – кришка стаціонарна; 13 – катодна шина; 14 – кришка алюмінієва знімна; 15 – ексцентриковий затискач

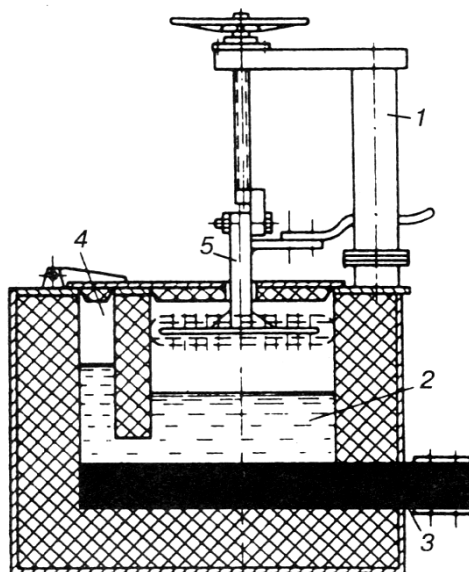
Рисунок 2.29 – Електролізер для рафінування алюмінію

2.5.3.2 Електролізери для рафінування магнію

Електролізер для електролітичного рафінування магнію надано на рис. 2.30. Прямокутний сталевий кожух електролізера усередині викладено високоглиноземною вогнетривкою цеглою. Черінь – графітований блок, з'єднаний з позитивним полюсом джерела постійного струму, а від катодного магнію (зверху) струм відводиться по сталевому пластинчастому катоду, зануреному в рідкий метал.

На черені знаходиться анодний сплав, в який через кишеню в міру розчинення додають магній в твердому або рідкому стані. Чистий катодний магній, що накопичується зверху, час від часу відсмоктують вакуумним ковшем. Домішки, що накопичується в анодному сплаві, утворюють з магнієм

інтерметаліди, які в твердому вигляді осаджуюся на черені. З електролізера їх видаляють через кишеньку.



- 1 – поворотний кронштейн; 2 – анодний сплав;
3 – графітовий анод; 4 – кишенька для завантаження
анодного металу; 5 – сталевий пересувний катод

Рисунок 2.30 – Електролізер для рафінування магнію за тришаровим способом

Електролізер для електричного рафінування магнію працює за анодною щільністю струму $0,6-0,8 \text{ А/см}^2$ і катодною щільністю струму $0,6-1,0 \text{ А/см}^2$. Междуполюсна відстань становить $7,5-12,0 \text{ см}$, напруга – близько $4,0-4,5 \text{ В}$. Вихід за струмом катодного магнію дорівнює $90-95 \%$. Питома витрата електроенергії постійного струму становить $9,5-10,0 \text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$. Електролітичне рафінування магнію є безперервним процесом.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Типи апаратів для вилуговування.
2. Конструкція апаратів для вилуговування бокситів та бокситових спеків.
3. Конструкція апаратів для відокремлення червоного шламу від технологічних розчинів глиноземного виробництва.
4. Типи автоклавів, будова та їх принцип дії.
5. Конструкції згущувачів.
6. Розрахунок відстійників.
7. Типи апаратів для фільтрування неоднорідних систем.
8. Конструкція апаратів для фільтрування технологічних розчинів і пульп кольорової гідрометалургії.
9. Конструкція та принцип діє барабанного вакуум-фільтра.
10. Класифікація, позначення і принцип дії центрифуг.
11. Конструкція фільтрувальної центрифуги для розділення пульп у кольорової гідрометалургії.
12. Класифікація випарних апаратів.
13. Конструкція апаратів для випарювання технологічних розчинів і пульп кольорової металургії.
14. Багатокорпусні випарні установки. Типи установок, принцип дії.
15. Визначення оптимального числа корпусів багатокорпусної випарної установки.
16. Типи апаратів для перемішування розчинів і пульп.
17. Апаратура для проведення цементацийного осадження кольорових металів або їх сполук з розчинів.
18. Конструкції екстракторів, що використовують в кольоровій гідрометалургії.
19. Розрахунок екстракторів.
20. Призначення, типи і принцип дії йонообмінних установок.
21. Металургійні печі та їх вибір. Вимоги до печей.
22. Основні конструктивні елементи металургійних печей.
23. Види і конструкції фундаментів металургійних печей.
24. Конструкції металевих каркасів металургійних печей.
25. Футеровка металургійних печей.
26. Класифікація вогнетривких матеріалів.
27. Способи нагрівання металургійних печей.

28. Класифікація методів електричного нагрівання печей.
29. Класифікація відбивних печей для плавлення вторинної алюмінієвої сировини. Конструкція, принцип дії печей.
30. Конструкція відбивних плавильних і рафінувальних печей, що використовують у виробництві міді.
31. Конструкції шахтних печей, що використовують в кольоровій металургії.
32. Конструкція печей для випалу в киплячому шарі, що використовують в кольоровій металургії.
33. Конструкція обертових трубчастих печей для спікання шихт у виробництві глинозему.
34. Конструкція руднотермічних печей для виплавки силікоалюмінію.
35. Конструкція руднотермічних печей для виробництва титанового шлаку.
36. Конструкція електронно-полуменевих печей для виробництва злитків титану та його сплавів.
37. Конструкція хлораторів для виробництва тетрахлориду титану.
38. Конструкція ректифікаційних колон для виробництва очищеного тетрахлориду титану.
39. Конструкція установки відновлення для магнієтермічного відновлення тетрахлориду титану.
40. Конструкція установки для вакуумної сепарації реакційної маси під час одержання губчастого титану.
41. Конструкція електронно-променевих печей для виробництва злитків з губчастого титану.
42. Конструкція вакуумно-дугових печей для виробництва злитків титану та титанових сплавів.
43. Конструкція індукційних (тигельних, канальних) печей для плавлення вторинної алюмінієвої сировини.
44. Конструкція електролізерів для виробництва та рафінування алюмінію.
45. Конструкції електролізерів для виробництва та рафінування магнію.

ГЛОСАРІЙ

Агітатор – реактор з механічною мішалкою і паровою сорочкою або змішувачем для обігрівання.

Анодні спуски – мідні смуги, верхні кінці яких приварені до анодних шин, а нижні за допомогою клинових з'єднань притиснуті до штирів.

Аптейк – початкова ділянка лежача, що нахилений в сторону печі.

Блюмс – сталевий катодний стрижень.

Гарнісаж – шар затверділого електроліту.

Дифузор – реактор для вилуговування у вигляді сталевий клепаної ємності з завантажувальними та розвантажувальними люками, які закриваються відкидними кришками.

Контрфорс – вертикальна стійка, стягнута поперек електролізера на рівні днища сталевими тягами попарно.

Лежак – димовідвідний канал печі.

Міксер – камера відбивної плавильної печі для створення певного запасу розплавленого металу, що забезпечує безперервність її роботи.

Мішалка – пристрій для механічного перемішування рідин і пульп

Мульда – коритоподібна лита сталева коробка для завантаження шихтових матеріалів у піч; забезпечена спеціальним замковим пристроєм для кріплення її на хоботі завалкової машини.

Муфель – камера нагрівальної печі з вогнетривкої цегли або жаростійкого металу для перешкодження дії продуктів згоряння на поміщених в неї металовиробів (напівфабрикатів).

Набивка – вогнетривка футеровка череня та інших елементів плавильних печей, тиглів індукційних печей, розливних ковшів поверх шару кладки з сипких вогнетривких матеріалів (магнезит, корунд, шмамот, кварц) з використанням ущільнюючих вібропристроїв.

Наварка – виготовлення робочого шару череня плавильної печі спіканням декількох шарів сипких вогнетривких матеріалів з додаванням технологічного шлаку.

Нагрівач – елемент печі опору побічної дії, що генерує теплоту за законом Джоуля-Ленца при контактному підводенні енергії і віддає її тілу, що нагрівається внаслідок теплообміну.

Накип – тверді відкладання, що утворюються на внутрішніх стінках труб, парових котлів, водяних економайзерів, пароперегрівачів, випарників та інших теплообмінних апаратів, в яких випаровується або нагрівається вода, що містить солі.

Накопичувач – пристрій (камера печі) для створення певного запасу оброблюваного металу в лінії безперервного технологічного агрегату, що забезпечує безперервність його роботи.

Налагодження – сукупність операцій з підготовки, оснащення, регулювання та налаштування агрегату (установки, апарата) для забезпечення його роботи в заданих умовах певного часу (зміна, доба тощо).

Насос – пристрій для напірного переміщення (всмоктування, нагнітання) головним чином рідини в результаті надання їй зовнішньої енергії (кінетичної або потенційної); також пристрої для стиснення або розрідження газів або для переміщення матеріалів потоком газу.

Ножиці – агрегат (машина) для поздовжнього або поперечного різання металу.

Обичайка – циліндричне або конічне кільце або коротка труба, які отримують переважно вальцюванням при товщині листа до 40 мм, розкочуванням при більшій товщині листа; для виготовлення (найчастіше з використанням зварювання) довгомірних труб, котлів, резервуарів, баків та інших листових металоконструкцій.

Пальник – пристрій для спалювання газу.

Перколятор – реактор для вилуговування просочуванням (тобто перколяцією).

Форсунка – пристрій для розпилювання та спалювання мазуту.

Футеровка – вогнетривка кладка.

Шлаковик – спеціальна камера для уловлювання значних (за розмірами) фракцій винесення, розташована перед виходом газів з печі (в напрямку руху газів) до газоходу.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Процессы и аппараты цветной металлургии [Текст] / С. С. Набойченко, Н. Г. Агеев, А. П. Дорошкевич, В. П. Жуков, Е. И. Елисеев, С. В. Карелов, А. Б. Лебедь, С. В. Мамяченков. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 700 с. – 1250 экз.
2. Нестеренко, Т.М. Теоретичні основи гідрометалургійних процесів [Текст] / Т. М. Нестеренко, І. Ф. Червоний, В. П. Грицай. – К.: Вища школа, 2013. – 408 с. – Бібліогр.: с.401–403. – ISBN 978-966-642-505-1. – 500 прим.
3. Єгоров, С. Г. Конструкції агрегатів кольорової металургії [Текст] / С. Г. Єгоров, І. Ф. Червоний, Р. М. Воляр, під ред. д.т.н., проф. Червоного І. Ф.; Запорізь. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 230 с. – Бібліогр.: с.230. – ISBN 978-966-8462-60-3. – 500 прим.
4. Крапухин, В. В. Печи для цветных и редких металлов [Текст] / В. В. Крапухин. – М.: Металлургия, 1980. – 392 с. – Библиогр.: с.386. – 1000 экз.
5. Башенко, В. В. Электроплавильные печи цветной металлургии [Текст] / В. В. Башенко, А. В. Донской, И. М. Соломахин. – М.: Металлургия, 1971. – 320 с. – Библиогр.: с.318–320. – 3700 экз.
6. Койбаш, В. А. Оборудование предприятий вторичной цветной металлургии [Текст] / В. А. Койбаш, А. А. Резняков. – М.: Металлургия, 1976. – 232 с. – Библиогр.: с. 229-231. – 1250 экз.
7. Москвитин, В. И. Металлургия легких металлов [Текст]: учебник для вузов / В. И. Москвитин, И. В. Николаев, Б. А. Фомин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 416 с. – Библиогр.: с.411–413. – 1000 экз.– ISBN 5–89594–107–9.
8. Виробництво алюмінієвих сплавів з рудної та вторинної сировини [Текст] / Т. М. Нестеренко, О. М. Нестеренко, Г. О. Колобов, В. П. Грицай. – К.: Вища школа, 2007. – 207 с. – Бібліогр.: с.202–203. – ISBN 978-976-642-354-5. – 500 прим.
9. Мاستрюков, Б. С. Теория, конструкция и расчёт металлургических печей. Т.2. Расчёты металлургических печей [Текст] / Б. С. Мاستрюков. – М.: Металлургия, 1986. – 376 с. – Библиогр.: с.372. – 13000 экз.
10. Шкляр, М. С. Печи вторичной цветной металлургии [Текст] / М.С. Шкляр. – М.:Металлургия, 1987. – 216 с. – Библиогр.: с. 214-216. – 1275 экз.

Методичне видання

Т. М. Нестеренко

к.т.н., доцент

О. С. Воденнікова

к.т.н., доцент

КОНСТРУКЦІЙ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ КОЛЬОРОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Конспект лекцій

для студентів ЗДІА

напряму навчання 6.050401 «Металургія»

(галузь знань 0504 «Металургія та матеріалознавство»)

денної та заочної форм навчання

Підписано до друку .06.2017 р. Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.

Умовн. друк. арк. 5,5. Наклад 1 прим.

Замовлення №

Запорізька державна інженерна академія
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 2958 від 03.09.2007 р.

Віддруковано друкарнею
Запорізької державної інженерної академії
з оригінал-макету авторів

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226
ЗДІА