

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

для студентів спеціальності

6.05050315 “Обладнання хімічних виробництв і підприємств

будівельних матеріалів”

денної та заочної форм навчання

Затверджено
на засіданні кафедри
«Процеси та обладнання хімічних і
нафтопереробних виробництв»
як конспект лекцій із дисципліни
"Обладнання хімічних виробництв."
Протокол № 2 від 30.09.2014 р.

Суми
Сумський державний університет
2015

Обладнання хімічних виробництв : конспект лекцій / укладач
М. П. Юхименко. – Суми : Сумський державний університет, 2015. –
119 с.

Кафедра «Процеси та обладнання хімічних і
нафтопереробних виробництв»

ЗМІСТ	С.
Вступ	4
1. Обладнання для механічних процесів	5
1.1. Будова та принцип дії дробарок і подрібнювачів	7
1.2. Питання для самоконтролю.....	20
2. Обладнання для гідромеханічних процесів	21
2.1. Будова та принцип дії відстійників	22
2.2. Будова та принцип дії фільтрів	25
2.3. Будова та принцип дії центрифуг	39
2.4. Гідравлічна класифікація і повітряна сепарація	47
3. Обладнання для теплових процесів	55
3.1. Випарні апарати	55
3.2. Печі	66
4. Обладнання для масообмінних процесів	82
4.1. Сушильні установки	82
5. Обладнання для реакційних процесів	96
5.1. Реакційні апарати	96
5.2. Апарати для проведення реакцій на твердому каталізаторі	110
Список рекомендованої літератури	119

ВСТУП

Метою дисципліни є вивчення студентами будови, принципу дії, технічної характеристики та основ розрахунку обладнання хімічних виробництв. Причому основна увага приділяється тому виду обладнання, вивчення якого не передбачається навчальною програмою дисципліни "Машини та апарати хімічних виробництв", а при вивченні вже знайомих конструкцій обладнання наголос робиться на особливостях використання його у виробництвах сірчаної кислоти, двоокису титану та фосфорних мінеральних добрив

Дисципліна "Обладнання хімічних виробництв" є основною дисципліною спеціалізації, що завершує навчальний процес підготовки бакалавра з напрямку 6.05050315 "Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів".

У результаті вивчення дисципліни студент повинен

знати:

- будову, принцип роботи, технічну характеристику та основи розрахунку обладнання для механічних, гідромеханічних, теплових, масообмінних та реакційних процесів, специфіку роботи основного обладнання виробництв сірчаної кислоти, двоокису титану та фосфорних мінеральних добрив;

уміти:

- виконувати підбір та розрахунок обладнання хімічних виробництв.

Розділ 1. Обладнання для механічних процесів

Тема 1. Будова та принцип дії дробарок і подрібнювачів

План

1. Дробарки розколювальної і розламувальної дії.
2. Дробарки роздавлювальної дії.
3. Дробарки розтирально-роздавлювальної дії.
4. Дробарки ударної дії.
5. Дробарки ударно-розтиральної дії.
6. Використання подрібнювачів у хімічних виробництвах.

Ключові терміни:

щоква дробарка, конусна дробарка, валкова дробарка, роликовий млин, бісерний млин, молоткова дробарка, дезінтегратор, барабанний млин, струминний млин, вібраційний млин.

Усі подрібнювачі можна поділити на такі основні групи: 1) розколювальної і розламувальної дії; 2) роздавлювальної дії; 3) розтирально-роздавлювальної дії; 4) ударної дії; 5) різальні машини; 6) колоїдні подрібнювачі. У літературі часто трапляється класифікація подрібнювачів за розміром одержуваних частинок (дробарки великого, середнього і дрібного подрібнення та млини тонкого і колоїдного подрібнення).

1. Дробарки розколювальної і розламувальної дії. Ці дробарки виявились особливо ефективними при великому і середньому подрібненні від розміру частинок 1500 мм до 100-300 мм. До них належать щоківі і конусні дробарки.

Щоківі дробарки можна використовувати для подрібнення великих шматків твердої сировини у хімічному виробництві, а також виробництві будівельних матеріалів. Схему щоківі дробарки наведено на рис. 1.1. Робочими елементами щоківих дробарок є дві щоки: нерухома 1 і рухома 2, що коливаються, на осі 3. Щоки утворюють камеру дроблення. Матеріал потрапляє у камеру дроблення зверху. Під час зближення щік шматки матеріалу руйнуються, а під час розходження подрібнений матеріал випадає крізь нижню щілину в камері дроблення. Приводить у дію щоку шатун 5, з'єднаний з ексцентрикним валом 6.

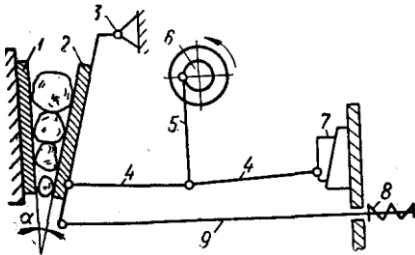


Рисунок 1.1 - Схема щоквої дробарки

Шатун з'єднаний шарнірно рухомою щоквою через розпірні плити 4. Тяга 9 і пружина 8 створюють натяг у рухомій системі і сприяють холостому ходу рухомої плити. Ширину випускної щілини регулюють взаємним переміщенням клинів 7.

Основні переваги щоквих дробарок: простота і надійність конструкції, широта застосування, компактність і простота обслуговування. До недоліків необхідно віднести: періодичний характер дії на матеріал (лише під час зближення щік) і неврівноваженість рухомих мас, що спричиняє шум і вібрацію під час подрібнення. Ступінь подрібнення зростає із збільшенням кута захвату α . Проте для того щоб куски матеріалу не виштовхувалися з дробарки під тиском щік, кут захоплення α не повинен бути більшим від подвійного кута ϕ тертя матеріалу. Як правило, $\alpha = 15 - 22^\circ$.

Конусні дробарки. У конусній (гіраційній) дробарці (рис. 1.2) матеріал подрібнюється безперервним роздавлюванням його між двома конусами. Зовнішній конус 4 нерухомо зв'язаний з рамою дробарки, а внутрішній 3 закріплений на валу 2. Вал підвішено вгорі на кульовій опорі 1. Нижній кінець вала ексцентрично укріплюють у стакані 5, який приводиться в рух через конічну зубчасту передачу. Під час обертання вала внутрішній конус дробарки наближається до одного боку нерухомого конуса, руйнуючи матеріал, а з іншого боку подрібнений матеріал випадає крізь вихідну щілину, яка в цей час розширюється. Отже, на відміну від щоквих дробарок у конусних дробарок, процес руйнування матеріалу і видалення його із зони подрібнення відбувається безперервно.

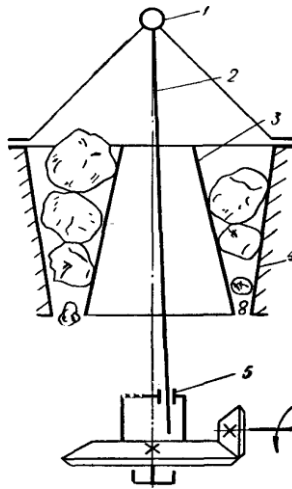


Рисунок 1.2 - Схема конусної дробарки

2. Дробарки роздавлювальної дії. Основним способом подрібнення в машинах цього типу є роздавлювання матеріалу між двома робочими поверхнями. При цьому одна з поверхонь або обидві повинні бути рухомими. До найпоширеніших у хімічній промисловості дробарок такого типу належать *валкові дробарки*. Їх використовують для середнього подрібнення частинок розміром від 100 мм до 10-12 мм.

Робочою частиною валкових дробарок служать горизонтальні валки, кількість яких може бути різною. Найпростіша дробарка має один валок, який обертається навколо горизонтальної осі паралельно нерухомій робочій щочі. У цьому випадку подрібнення відбувається між нерухою щочкою і валком, що обертається. Проте найчастіше дробарки мають пару або кілька пар валків. Парні валки обертаються назустріч один одному, і подрібнення відбувається між валками. Схему валкової дробарки зображено на рис. 1.3. Дробарка складається із валків 2 і 3. Підшипники валка 3 нерухомі, а валка 2 - рухомі. Останні утримуються за допомогою пружини 1, що дає можливість валку 2 зміщуватися, коли у дробарку потрапляють надто міцні сторонні предмети. Розмір шматків продукту визначається шириною щілини між валками.

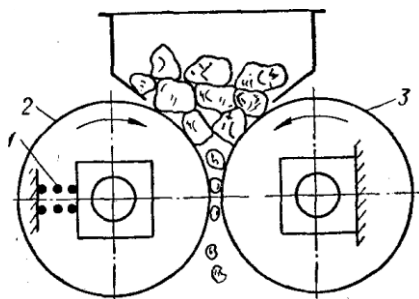


Рисунок 1.3 - Схема валкової дробарки

Валкові дробарки компактні і надійні у роботі. Гладенькі валки для подрібнення зернистих матеріалів мають діаметр 250—350 мм, швидкість обертання валків 2,5—5 м/с. Для більш тонкого роздроблення зернистих матеріалів використовують валки із рифленою поверхнею. Рифлі утворюють деякий кут із твірною вала. Такі валки не тільки роздавлюють, а й розколюють матеріал. Розмір шматків матеріалу, який надходить на подрібнення, повинен бути в 20—25 разів меншим від діаметра гладеньких валків і в 10—12 разів меншим від діаметра рифлених валків.

3. Дробарки розтирально-роздавлювальної дії. У машинах цього типу матеріал подрібнюється комбіновано під дією прямого роздавлювання з розтиранням. Щоб мати розтиральний ефект, поверхні, які роздавлюють матеріал, повинні у відповідних точках мати різницю лінійних швидкостей руху. Це і передбачено в усіх конструкціях дробарок розтиральної дії. До них належать: жорна, бігуни і дискові млини. Ці дробарки використовують для дрібного і тонкого подрібнення. У бігунах (рис. 1.4) матеріал подрібнюється під дією двох важких котків 2, які котяться по дну чаші 4, в яку завантажують подрібнюваний матеріал. Котки обертаються навколо вертикальної осі 5 зубчастою передачею. Навколо горизонтальних осей 3 котки обертаються завдяки тертю між циліндричною поверхнею котків і матеріалом у чаші. Накочуючись на великі шматки дуже міцного матеріалу, котки можуть підніматися кривошипами 1, що запобігає поломці машини.

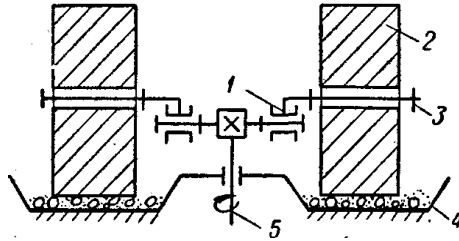


Рисунок 1.4 - Схема бігунів

До появи барабаних млинів бігуни були дуже поширеними дробарками в багатьох галузях промисловості. Тепер їх роль дещо зменшилась, але там, де подрібнюють в'язкі матеріали і подрібнення поєднується з перемішуванням, їх ще використовують, наприклад, у виробництві двоокису титану.

Млини роликові (рис. 1.5) належать до подрібнювачів роздавлювальної і стираючої дії. Застосовують для грубого і середнього подрібнення сухим способом м'яких і середньої твердості матеріалів (вугілля, цементної сировини, фосфоритів, графіту, сірки, мінеральних фарб, частинок двоокису титану та ін.).

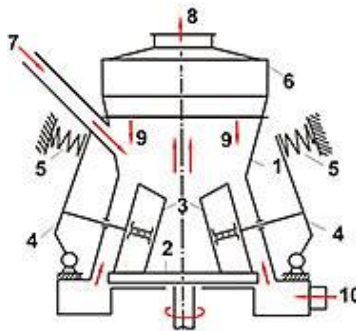


Рисунок 1.5 - Схема роликового млина:

1 - корпус; 2 - подрібнювальне кільце; 3 - ролик; 4 – натискний важіль; 5 - натискна пружина; 6 – повітряний класифікатор; 7 - подача подрібнювального матеріалу; 8 - подрібнений продукт; 9 – повернення великих частинок на помел; 10 - подача повітря

Розрізняють ролико-кільцеві, кульово-кільцеві, котково-чашкові і котково-дискові млини. Ступінь подрібнення досягає 40, а к. к. д. – 0,05 – 0,06.

Відцентрові барабанні млини – використовуються для подрібнення сипких матеріалів (руд, вугілля, будівельних матеріалів, частинок двоокису титану та ін.) для їх подальшого безпосереднього використання, збагачення. Є різновидом барабанних млинів.

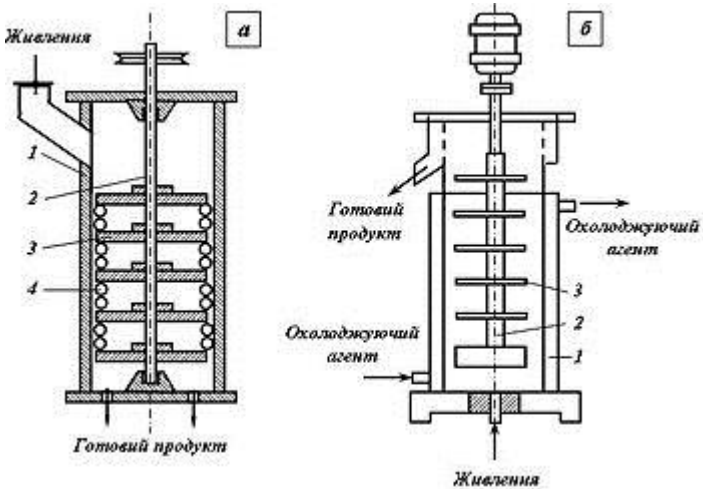


Рисунок 1.6 – Відцентрові барабанні млини:
а – багатокammerний; б – бісерний.

1 – барабан; 2 – ротор-вал; 3 – диски; 4 – ролик

Багатокammerний відцентровий млин (рис. 1.6 а) складається з нерухомого вертикального барабана 1 із ротором-валом 2, що обертається всередині його. На дисках 3 ротора-вала 2 шарнірно закріплені ролики 4 або вільно розміщені кулі. При обертанні вала відбувається роздавлювання частинок подрібнювальними тілами за рахунок дії на них відцентрових сил. Подрібнення матеріалу у таких млинах відбувається сухим або мокрим способом послідовно у міру просування матеріалу уздовж поверхні барабана.

Для дуже тонкого подрібнення застосовується бісерний млин (рис. 1.6 б) аналогічної конструкції, де як подрібнювальне

середовище використовується металевий дріб, керамічні і мінеральні зносостійкі частинки розміром від 1 до 6 мм, кремній-кварцевий бісер діаметром 1 – 2 мм.

4. Дробарки ударної дії. У цих дробарках матеріал подрібнюється ударним навантаженням, яке може виникнути під час падіння подрібнювальних органів на матеріал, зіткнення матеріалу з подрібнювальними органами в польоті, зіткнення в польоті самих частинок матеріалу одна з одною. До дробарок ударної дії відносять *молоткові дробарки, барабанні млини, дезінтегратори.*

Молоткові дробарки (рис. 1.7) у хімічній промисловості застосовують для подрібнення крихких, волокнистих та інших матеріалів, а також матеріалів помірної твердості та малої абразивності (вугілля, гіпс, вапно та ін.). Робочими органами дробарки є молотки 1, вільно насаджені на стрижні 2 дисків 3, змонтованих на валу 4. Під час обертання вала молотки стають у радіальне положення і б'ють шматки матеріалу, який завантажують у живильник. Матеріал вивантажують крізь сито 5, величина отворів якого визначає ступінь подрібнення матеріалу.

Колова швидкість на кінцях молотків дробарки повинна бути достатньою, щоб забезпечити руйнування матеріалу в момент удару. Під час подрібнення вона становить 70—90 м/с.

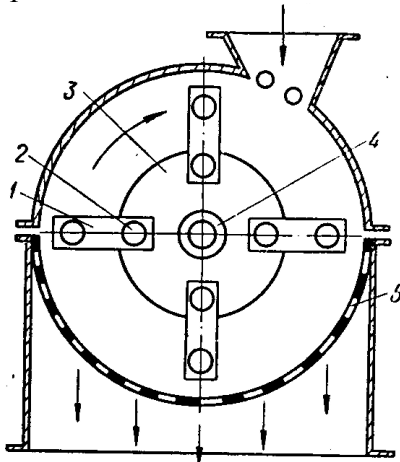


Рисунок 1.7 – Молоткова дробарка

Число обертів ротора (вала з дисками) дробарки – від 2100 *об/хв* до 2800-3000 *об/хв*.

Однobarabанні дробарки (рис. 1.8) менш широко використовують у промисловості для подрібнення твердого матеріалу.

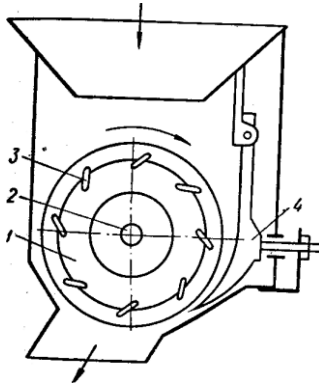


Рисунок 1.8 –Однobarabанна дробарка

Дробарка складається із бронзового литого барабана 1, закріпленого на валу 2, що обертається зі швидкістю 2500 *об/хв*. У барабані є вісім прорізів, у які встановлено гребінцеві ножі 3, що виступають над барабаном на 0,5—5 мм. Залежно від потрібного ступеня подрібнення і властивостей матеріалу величину зазора регулюють притискними колодками 4. Матеріал надходить у дробарку через завантажувальний бункер і подрібнюється ударами ножів.

Дезінтегратори належать до дробарок, подрібнення в яких ґрунтується на принципі вільного удару. Дезінтегратор (рис. 1.9) має два диски 3 і 4, кожен з яких набуває руху від окремого приводного вала 1 і 8.

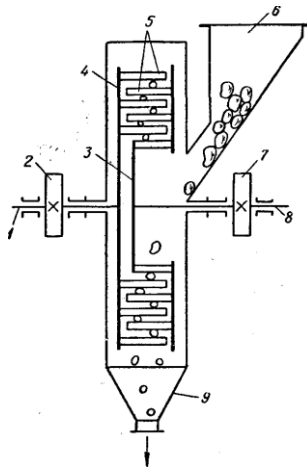


Рисунок 1.9 – Дезінтегратор

Вали обертаються у протилежних напрямках від шківів 2 і 7. На дисках по концентричних колах закріплені пальці 5. Ряди пальців одного диска проходять між рядами пальців другого. Матеріал надходить у дробарку через бункер 6 і подрібнюється ударами пальців дисків, що швидко обертаються. Подрібнений матеріал вивантажується крізь люк 9 у нижній частині корпусу.

Швидкість обертання дисків 200 – 1200 об/хв. Продуктивність дезінтеграторів коливається в межах 0,5 – 20 т/год. Переваги дезінтеграторів: проста будова, високі продуктивність і ступінь подрібнення, надійність у роботі. Недоліки: підвищене спрацювання пальців, значне пилоутворення, значні витрати енергії.

Барабанні млини (рис. 1.10) широко використовують для тонкого помелу матеріалів від розміру частинок 2-10 мм до 0,075-2 мм та для багатотонних виробництв. Робочими елементами цих млинів є захищений броньованими плитами барабан 2 і завантажені у нього подрібнювальні органи 4 (кулі, стрижні, морська галька і т. д.). Під час обертання барабана тіла відцентровою силою притискаються до його стінки, піднімаються на деяку висоту, а потім падають або скочуються вниз. Якщо в барабані перебуватиме подрібнювальний матеріал,

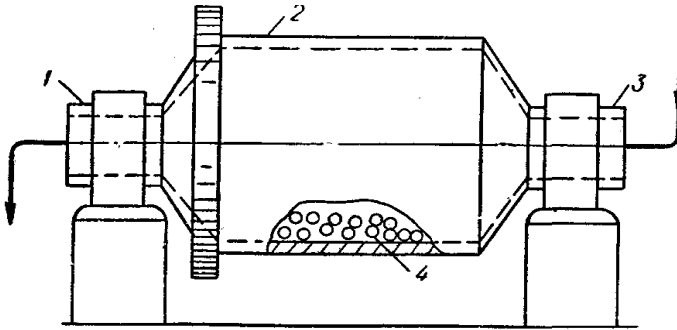


Рисунок 1.10 – Барабанный млин

то перемелювальні органи подрібнюють його биттям при падінні, роздавлюванням і розтиранням під час скочування. Подається матеріал у млин і виводиться з нього крізь порожнисті цапфи барабана 3 і 1. Переміщається матеріал під дією різниці його рівнів на вході і виході, а також під дією обертання барабана. Подрібнений матеріал вивантажується крізь цапфу 1 під дією власної ваги або з потоком повітря, висмоктаного вентилятором.

Млини струменеві (струминні) – установки струминного подрібнення базуються на принципі дезінтеграції речовини у струменях енергоносія шляхом перетворення потенціальної енергії робочого газу в кінетичну енергію частинок, що подрібнюються (рис. 1.11).

Для створення режимів високого тиску, що розвивають у речовині високі напруження і деформації, використовується енергія робочого газу (повітря, азот, перегріта пара, продукти спалення горючого газу). Частинки подрібнюються без помельних тіл внаслідок взаємних зіткнень один з одним при навантаженні ударами, динамічним тертям або в комбінованому режимі. Установки струминного подрібнення дозволяють досягнути високого рівня дисперсності (1 – 10 мкм) з питомою поверхнею 0,5 – 2 м²/год при питомій витраті енергії 200 – 1200 Дж/м² і продуктивності 20 – 2000 кг/год.

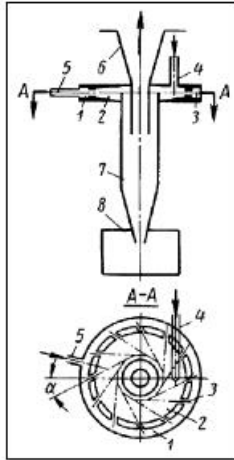


Рисунок 1.11 – Схема струминного млина з плоскою камерою помелу:

1 – розподільчий колектор; 2 – помельно-розділювальна камера; 3 сопло; 4 – труба; 5 – трубопровід; 6, 7 – коаксіальні труби; 8 – бункер для накопичення подрібненого продукту

Розрізняють *прямотечійні* і *протитечійні* струминні млини, відмінні тим, що в одних матеріал руйнується при ударі і стиранні в плоскій або трубчастій помельній камері, а в інших – при зустрічному зіткненні потоків сумішей.

Струминна технологія подрібнення забезпечує отримання порошків високої чистоти з переважно овальною формою частинок. Середній розмір подрібнених частинок у продукті, який уловлюється у циклоні, становить $d = 3 - 5$ мкм, максимальний $d_{\max} = 6 - 12$ мкм, у продукті, який уловлюється у фільтрі, відповідно $d = 1 - 1,4$ мкм; $d_{\max} = 5 - 6$ мкм.

При газоструминному способі подрібнення досягається ширший діапазон зміни режимних параметрів (швидкість зіткнень частинок – 100-400 м/с, температура нагріву до 600 °С). Руйнування частинок у нагрітих надзвукових струменях забезпечує більш високий ступінь подрібнення.

Струминні млини працюють у комплексі з повітряним сепаратором і застосовуються для подрібнення різних матеріалів (вугілля, руд, вапняку, сірки, барвників, азбесту, цементу, пластмас, слюди, мікроподрібнення частинок двоокису титану та ін.).

5. Дробарки ударно-розтиральної дії. Млини вібраційні використовують для тонкого подрібнення при невеликій продуктивності (до 1 т/год) сухим і мокрим способами різних матеріалів (мінеральних барвників, цементу та ін.) головним чином з метою поліпшення їх якості.

Барабан вібраційного млина, заповнений кулями на 80 % об'єму, встановлений на пружинах або гумових опорах і під дією механічного вібратора-дебалансу вібрує разом із кулями з частотою до 3000 коливань на хв при амплітуді 2 – 5 мм. Матеріал, що завантажується у барабан, подрібнюється кулями при їх частих зіткненнях у вібруючій масі. Застосовують млин як періодичної, так і безперервної дії. Вібраційні млини застосовуються для тонкого і надтонкого подрібнення різних матеріалів розміром до 0,25 мм у хімічній промисловості, при виробництві будівельних матеріалів, силікатних та інших виробів. Розмір подрібненого продукту становить до 1 мкм.

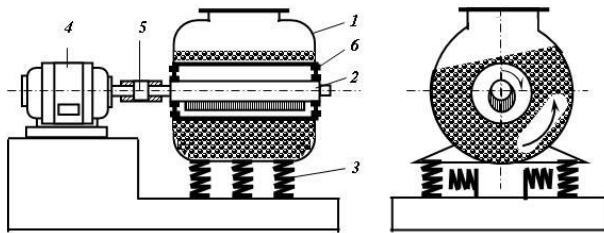


Рисунок 1.12 –Інерційний вібраційний млин

Інерційний вібраційний млин (рис. 1.12) складається з барабана 1, який опирається на пружини 3. Барабан завантажується кулями на 80 – 90 % об'єму. У барабані на підшипниках 6 встановлений дебалансний вал 2, який приводиться у рух від електродвигуна 4. Для виключення

передачі вібрацій від барабана до електродвигуна застосовується гнучка муфта 5. При обертанні дебалансного вала із частотою від 1000 до 3000 хв⁻¹ барабана з кулями і матеріалом, що подрібнюється, надається коливальний рух по еліптичній траєкторії, близькій до колової. При цьому виникає обертальний рух подрібнювального середовища у напрямку, протилежному напрямку обертання вібратора (дебалансного вала). Розпушення, коливання та інтенсивне взаємне переміщення подрібнювальних тіл зумовлює подрібнення матеріалу у млині. Подрібнення здійснюється ударом і стиранням.

6. Використання подрібнювачів у хімічних виробництвах.

6.1. Виробництво сірчаної кислоти. Подрібнення сірчаного колчедану. Витягання шкідливих домішок (міді та сполук миш'яку), що отруюють каталізатор, здійснюється за допомогою флотації. Після флотаційних установок сірчаній колчедан відстоюють, відфільтровують, сушать та спалюють у печах у вигляді пилу, який складається із частинок розміром 0,03 - 0,5 мм. Розмір шматків висхідного колчедану перед спалюванням у печах коливається у межах 6 - 10 мм, тому сировину перероблюють у такій послідовності: 1) класифікація (сортування) на плоскому грохоті; 2) перше (велике) подрібнення на шоківій дробарці; 3) класифікація (сортування) на барабанному грохоті; 4) друге (дрібне) подрібнення на валковій дробарці.

6.2. Виробництво фосфорних мінеральних добрив. Сировиною для отримання фосфорних мінеральних добрив є апатити та фосфорити. Апатити та фосфорити подрібнюють у три стадії: велике, середнє та дрібне подрібнення. Апатити перероблюють у такій послідовності: 1) перша класифікація (сортування) на плоскому грохоті; 2) перше (велике) подрібнення на конусній дробарці; 3) друга класифікація (сортування) на плоскому грохоті; 4) друге (середнє) подрібнення на конусній дробарці; 5) третє (дрібне) мокре подрібнення у барабанному млині; 6) гідрокласифікація у спіральному класифікаторі.

При подрібненні фосфоритів перша та друга стадії подрібнення залишаються такими, як і при переробці апатиту, а на третій стадії використовується сухий спосіб подрібнення у барабанному млині, який працює у замкнутому циклі із повітряно-прохідним сепаратором.

На стадії грануляції, на виході із барабанного гранулятора-сушарки (БГС), готові гранули мають розміри від 0,07-0,5 мм до 5-7 мм. Фракційний склад товарного продукту, який у подальшому охолоджується та подається на пакування, складається із фракції від 1 мм до 4 мм. Тому гранули після БГС сортують на грохоті, після якого дрібну фракцію менше 1 мм подають як ретур у БГС, а крупну – більше 4 мм – подрібнюють у валкових чи молоткових дробарках. Валкові дробарки подрібнюють гранули роздавлюванням, очищення валиків проводиться ножами безперервно чи зміною зазору між валиками періодично. Переваги використання валикових дробарок полягають у надійності роботи, отриманні продукту із невеликим вмістом значно подрібненої фракції. Валкові дробарки використовують у багаторетурних схемах отримання малоадгезійних добрив – амофосу та нітроамофоски.

Молоткові дробарки мають ефективність подрібнення у 1,5-2 рази вище, ніж у валкових дробарок, за рахунок механізму ударного руйнування. Використовують дробарки із рухомими лопатями (молоткові) та нерухомими (роторні). Від форми та кута нахилу лопатей залежить фракційний склад подрібненого продукту: якщо лопаті загнуті вперед – отримуємо переважно фракцію менше 1 мм, якщо лопаті загнуті назад – отримуємо максимальний вихід фракції від 1 мм до 4 мм. Специфічність подрібнення гранул у молотковій дробарці – ефект налипання гранул на поверхні лопатей та утворення на них шару, що пом'якшує удар та зменшує ефективність подрібнення та приводить до «заростання» роздрібнювальної камери. Для усунення цього явища лопаті роблять радіальної форми для кращого самоочищення, використовують обертовий барабан із очисним ножом чи вібраційні відбійні поверхні.

6.3. *Виробництво двоокису титану.* У виробництві двоокису титану подрібнюють титановмісні руди (ільменіт, титаномагнетит), залізний купорос (побічний продукт), двоокис титану перед його промиванням та наступним прожарюванням, а також після прожарювання для отримання готового продукту.

Подрібнення титановмісних руд здійснюється у барабанному двокамерному млині. У першій камері матеріал подрібнюється ударом та роздавлюванням подрібнювальними кулями діаметром 40-50 мм із марганцевої сталі, які рухаються у катарактному режимі. У другій камері матеріал подрібнюється роздавлюванням та стиранням циліндрами розміром 25x30 мм, які рухаються у лавиноподібному режимі. В першій камері проводиться крупне подрібнення, а в другій – більш дрібне подрібнення. Тонина подрібнення продукту становить 60 мкм.

Подрібнення залізного купоросу здійснюється у валковій дробарці.

Суспензія двоокису титану після очищення, випарювання та прожарювання метатитанової кислоти надходить на стадію мокрого подрібнення за такою схемою: 1) перемішування суспензії в ємності із мішалкою; 2) подрібнення у барабанному млині; 3) перемішування суспензії в ємності із мішалкою; 4) осаджування у відстійнику із механічною мішалкою. У барабанному млині як подрібнювальні органи використовуються кулі чи галька. Матеріал куль – фарфор, стеатит, ураліт. Завантаження подрібнювальними кулями здійснюється на 50-55 % об'єму барабана.

Після коагуляції суспензії, обробки її добавками, концентрування, фільтрації та сушіння осаду пухкі шматочки двоокису титану подрібнюють у дезінтеграторах, струминних млинах, бігунах, валкових дробарках чи роликкових млинах. При подрібненні у останніх частинки двоокису титану набувають лускоподібної форми, і якість фарбника покращується.

Після прожарювання частинки двоокису титану утворюють агрегати розміром до 1 мкм. Для їх подрібнення використовують струминні вертикальні чи горизонтальні млини. Як енергоносії використовують перегрітий пар, подрібнений продукт

уловлюється у циклонах, відпрацьований пар із залишками твердих частинок конденсується у конденсаторах.

Висновок

Для подрібнення твердих матеріалів використовується багато типів подрібнювачів, але треба розробляти малогабаритні, високоефективні машини, які мають зменшені витрати енергії та металу на одиницю кількості подрібнюваного матеріалу і достатньо високий коефіцієнт корисної дії.

Питання для самоконтролю

1. Дайте класифікацію дробарок.
2. Будова та принцип дії щоккових дробарок.
3. Будова та принцип дії конусних дробарок.
4. Будова та принцип дії валкових дробарок.
5. Будова та принцип дії бігунів.
6. Будова та принцип дії молоткових дробарок.
7. Будова та принцип дії дезінтеграторів.
8. Будова та принцип дії барабанних млинів.
9. Будова та принцип дії роликового млина.
10. Будова та принцип дії струминного млина.
11. Будова та принцип дії вібраційного млина.
12. Особливості використання подрібнювачів у хімічній промисловості.

Розділ 2. Обладнання для гідромеханічних процесів

Тема 1. Будова та принцип дії відстійників

План

1. Призначення і класифікація відстійників.
2. Будова відстійників.
3. Використання відстійників у виробництві двоокису титану.

Ключові терміни:

відстійник, відстійники періодичної дії, відстійники напівбезперервної дії, відстійники безперервної дії, однокорпусний відстійник, двокорпусний відстійник, багатокорпусний відстійник.

1. Призначення і класифікація відстійників. У таких апаратах, як *відстійник*, процес поділу рідинних неоднорідних систем – суспензій – відбувається під дією сили тяжіння. Тверді частинки під дією сил тяжіння опускаються на дно відстійника, і суспензія розділяється на дві частини: у верхній утворюється освітлена рідинна фаза, в нижній – волога тверда фаза. У хімічній промисловості відстійники застосовуються переважно для поділу грубих суспензій.

Відстійники поділяються на апарати періодичної, напівбезперервної і безперервної дії.

Відстійники періодичної дії – це невисокі резервуари без перемішувальних пристроїв. Подача суспензії, злив освітленої рідини і видалення осаду відбуваються періодично.

Відстійники напівбезперервної дії. У відстійниках напівбезперервної дії подача суспензії і зливання освітленої рідини відбуваються безперервно, а осад у міру накопичення періодично видаляється через нижні спускові пристрої. При цьому швидкість протікання суспензії повинна бути такою, щоб тверді частинки встигли осісти на дно відстійника.

Відстійники безперервної дії. У відстійниках безперервної дії подача суспензії, зливання рідини і видалення осаду відбуваються безперервно. Конструктивно ці апарати виконуються одно-, дво- і багатокорпусними (рис. 2.1-2.3).

2. Будова відстійників. У таких апаратах, як *одноярусний відстійник* (рис. 2.1), суспензія подається через трубопровід 2 у циліндричний невисокий корпус 1 із конічним днищем. Освітлена рідина після осадження із неї твердих частинок витікає із кільцевого прямокутного жолоба 3. Згущена суспензія осідає на конічне днище і поволі переміщується гребками мішалки 4 до центрального патрубку 5, через який відсмоктується насосом. У відстійнику утворюються три структурні зони: зона освітленої рідини – h_1 , зона згущування суспензії – h_2 , зона розміщення лопаток мішалки – h_3 . Відстійники виконуються діаметром до 100 м, продуктивністю 125 т/год осаду. Недолік – громіздкість конструкції.

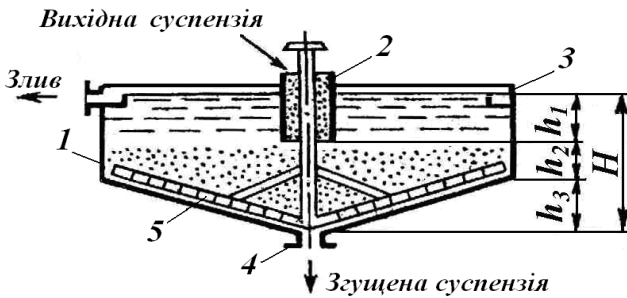


Рисунок 2.1. – Одноярусний відстійник:

- 1 – корпус; 2 - трубопровід подачі суспензії; 3 – кільцевий жолоб;
4 – мішалка; 5 - патрубок виведення осаду

Такі апарати, як *двоярусний відстійник* (рис. 2.2), мають два відділення, розміщені одне над одним. Верхнє й нижнє відділення з'єднані трубою, яка опущена нижче за рівень суспензії, що згущується в нижньому відділенні. Суспензія подається окремо в обидва відділення, а згущений продукт відкачується тільки з нижнього відділення. Освітлена рідина відводиться з верхньої частини кожного відділення апарата.

У такому відстійнику тиск стовпа більш важкої суспензії зрівноважується вищим стовпом освітленої рідини. Зміною висоти стовпа рідини можна регулювати висоту стовпа згущуваної суспензії і розподіл живлення.

В одно- і двоярусних відстійниках значна кількість рідини втрачається з видаленням осаду. Для зниження втрат застосовують проміжне промивання осаду.

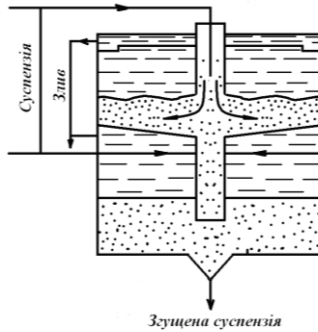


Рисунок 2.2 – Двоярусний відстійник

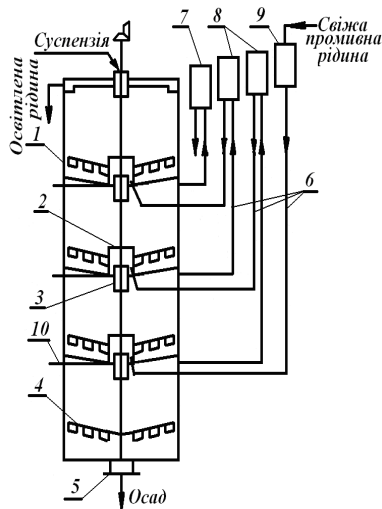


Рисунок 2.3 – Багатоярусний відстійник:
 1 – корпус; 2 – пастка; 3 – перехідна труба;
 4 – гребкова мішалка; 5 – патрубок виведення осаду; 6 –
 трубопроводи; 7, 8, 9 - бачки;
 10 – трубопроводи виведення суспензії

У таких апаратах, як *багатоярусний відстійник* (рис. 2.3), суспензія безперервно подається у верхній ярус. Згущений осад збирається на дні пастки 2. Сюди ж подається промивна рідина з розташованого нижче ярусу бачка 8 по трубопроводу 6. Промивною водою осад вимивається і надходить на розташований нижче ярус, де знову відстоюється і знову промивається. Видалення осаду з корпусу 1 проводиться через патрубок 5. Свіжа промивна рідина надходить з бачка 9 в нижню частину передостаннього ярусу. Згущена суспензія з ярусу на ярус рухається по перехідній трубі 3. подача осаду до пастки здійснюється гребковою мішалкою 4.

Виведення осаду з ярусу можна здійснювати по трубопроводах 10.

3. Використання відстійників у виробництві двоокису титану. Якщо суспензія двоокису титану піддана осаджуванню у відстійниках навіть без коагулянтів, то швидкість фільтрування розчину на фільтрах збільшується у 3-4 рази. Суспензія у відстійник подається через трубу, яка встановлюється паралельно стінці відстійника, що спричиняє утворення обертального руху суспензії, кращому розподіленню коагулянту та прискоренню процесу осаджування частинок шламу. Робочий об'єм відстійника близько 400 м³. Із реактора розкладення у відстійник суспензія подається із температурою 65 °С. Стінки бетонного відстійника всередині покриваються гумуванням та кислотостійким футеруванням, які добре зберігають тепло, якого достатньо, щоб за час відстоювання розчин не охолонув нижче 60 °С. При температурі 40-45 °С починають утворюватися кришталіки залізного купоросу, що значно збільшує в'язкість розчину. Тому відстійники повинні встановлюватися у утеплювальних приміщеннях, трубопроводи перекачування суспензії повинні бути теплоізолюваними, а при значних відстанях перекачування мати пункти обігріву. Корпус відстійника можна виготовляти із сталі, внутрішні стінки відстійника гумують та футерують кислотостійкою цеглою.

Висновок

Відстійники є найбільш поширеними у хімічній промисловості апаратами, але вони є достатньо габаритними (особливо за займаною площею), тому використовуються для першого ступеня очищення суспензій.

Питання для самоконтролю

1. Опишіть принцип дії типового гравітаційного відстійника.
2. Дайте класифікацію відстійників.
3. Будова та принцип дії одноярусного відстійника.
4. Будова та принцип дії двоярусного відстійника.
5. Будова та принцип дії багатоярусного відстійника.
6. Особливості використання відстійників у виробництві двоокису титану.

Тема 2. Будова та принцип дії фільтрів

План

1. Класифікація фільтрів.
2. Фільтри періодичної дії: листовий та плитково-рамний фільтрпрес.
3. Фільтр безперервної дії: барабанний вакуум-фільтр.
4. Використання фільтрів у виробництві двоокису титану.

Ключові терміни:

листовий фільтр, плитково-рамний фільтрпрес, барабанний вакуум-фільтр.

1. Класифікація фільтрів. За принципом дії фільтри поділяються на дві основні групи: періодичної і безперервної дії.

За конструктивною ознакою ці групи поділяються на:

- 1) фільтри, що працюють під вакуумом і під тиском;
- 2) фільтри з криволінійними і плоскими поверхнями;
- 3) фільтри з незв'язаними (волоконними або зернистими) тканинними, жорсткими і напівпроникними перегородками.

За призначенням фільтри бувають освітлювальні, згущувальні, розподільні.

2. Фільтри періодичної дії: листовий та плитково – рамний фільтрпрес

Автоматизовані вертикальні листові фільтри. У циліндричному корпусі 2 вертикального листового фільтра (рис. 2.4) із конічним днищем на горизонтально розміщених трубах 3 встановлені фільтрувальні рами 4, положення рам закріплюється фіксатором 10. Корпус зверху закривається кришкою 1.

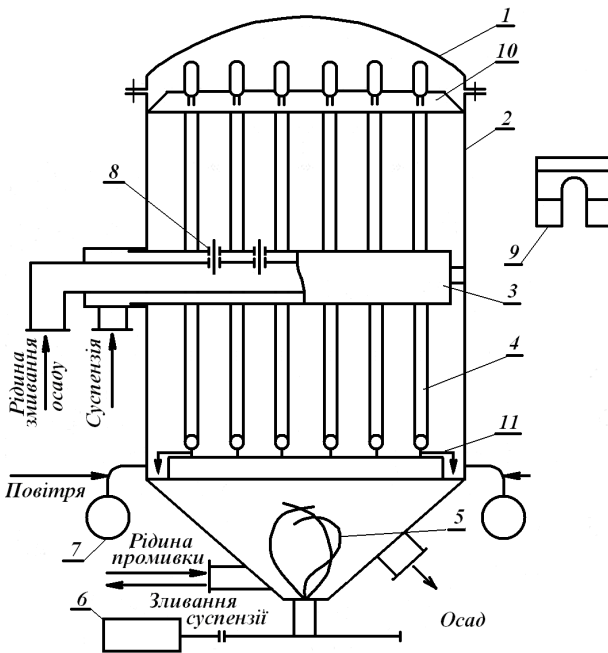


Рисунок 2.4 – Автоматизований вертикальний листовий фільтр: 1 – кришка; 2 – корпус; 3 – труби подачі суспензії і рідини для змиву осаду; 4 – фільтрувальна рама; 5 – механізм вивантаження осаду; 6 – привід механізму; 7 – колектор відведення фільтрату; 8 – отвори; 9 – вигляд фільтрувальної рами; 10 – фіксатор; 11 – трубки виведення фільтрату з рами

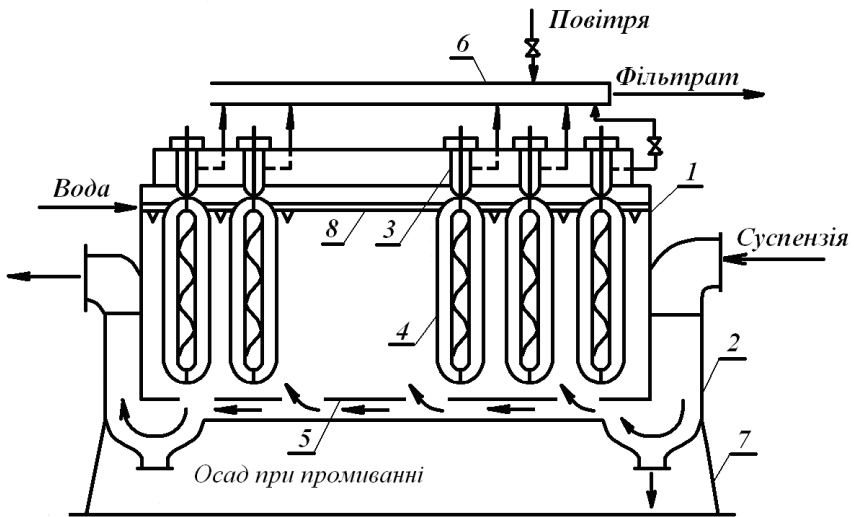
Рами складаються з металевого каркаса із сіткою, яка зверху закривається фільтрувальною тканиною. Загальний вигляд рами показаний позицією 9. Суспензія подається в кільцеву щілину між внутрішньою і зовнішньою горизонтальними трубами, через отвори 8 вона заповнює внутрішній простір корпусу. Фільтр працює під тиском. Фільтрат через тканину та сітку рами надходить усередину рами і з нижньої частини через трубки 11 відводиться в колектор фільтрату 7. Осад залишається на поверхні тканини. Після закінчення процесу фільтрації подачу суспензії припиняють і у внутрішню трубу подають рідину для змиву осаду, а потім – повітря для просушування і відділення залишків осаду з тканини. Повітря надходить у внутрішню порожнину рами через колектор відведення фільтрату. Із тканини осад падає на конічне днище і вивантажується механізмом вивантаження 5, що працює від привода 6. Конічне днище може промиватися водою.

Вертикальні листові фільтрпреси із чотирикутними рамами відрізняються від фільтра вищерозглянутої конструкції гідравлічним вивантаженням осаду, а також тим, що трубки виведення фільтрату безпосередньо сполучені із колектором. Фіксація рам здійснюється внутрішнім зубчастим кільцем, розміщеним усередині корпусу.

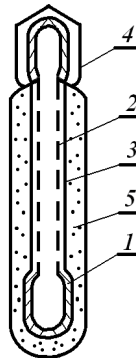
У листових горизонтальних фільтрпресах чотирикутні рами розміщуються на візку усередині циліндричного корпусу, встановленого під нахилом до горизонту. Фільтрація здійснюється під тиском при закритому корпусі. Процес включає також промивання і просушування осаду повітрям. Потім корпус відкривається, візок із рамами висувається з корпусу, і осад з рам розчищається вручну. Каркас чотирикутних рам – трубчастий.

Горизонтальний листовий фільтрпрес із круглими рамками

Корпус фільтра (рис. 2.5) складається з верхнього 1 і нижнього 2 напівциліндрів, які здатні роз'єднуватись. Напівциліндри встановлені на стійках 7. Піднімання і опускання нижнього напівциліндра здійснюється гідравлічним пристроєм, а їхнє стиснення – ексцентриковим валом.



а



б

Рисунок 2.5 – Листовий горизонтальний фільтрпрес із круглими рамками:

- а) конструкція фільтра: 1 – верхній напівциліндр;
 2 – нижній напівциліндр; 3 – трубки рамок; 4 – круглі листи;
 5 – перфорована плита; 6 – колектор фільтрату; 7 – стійки;
 8 – труба із соплами.
- б) лист фільтра: 1 – рамка; 2 – дротяна сітка;
 3 – фільтрувальна тканина; 4 – мішок; 5 – осад

Напівциліндри герметизуються за допомогою ущільнювальних шнурів, розміщених у канавках стикових площин. Усередині корпусу розміщені круглі рамки 4 із трубчастим каркасом. Вивідні трубки рамок 3 вставляються в отвори порожнистої рами, розміщеній у верхній частині верхнього напівциліндра. По обох боках рамки 1 (рис. 2.5 б) встановлена дротяна сітка. Рамка поміщається в мішок 4 із фільтрувальної тканини 3, який зав'язується навколо шийки відповідної трубки. Суспензія через канал надходить під розподільну перфоровану плиту 5 і заповнює циліндр. Фільтрат проходить через тканину і сітку рамки, надходить у її внутрішню порожнину, а звідти – у відповідну трубку під тиском 3,5 МПа, і через скляну трубку входить у колектор фільтрату 6. Після закінчення фільтрації осад промивається водою, що надходить через сопла труби 8, потім в апарат подається повітря із тиском 5 МПа, яке витісняє залишки промивної рідини і підсушує осад. Нижній напівциліндр відкидається і усередину рамок подають повітря або пару, що відділяє осад від тканини. Залишки осаду знімають шпателем. Скляна трубка дозволяє стежити за якістю фільтрату, і рамка може бути виключена з роботи за допомогою крана.

Плитковорамний фільтрпрес (рис. 2.6). Рамні фільтрпреси складаються з опорних стійок 1 і 10; на першій укріплена упорна плита 2, на другій – механізм затискання плити і стійки 7. Стійки зв'язані між собою прогонами 6, які спираються на шпренгельні ферми 11. Шток затискного механізму опирається об затискну плиту 5, яка вільно підвішена на прогонах. Кронштейни плити для полегшення переміщення її по прогонах постачені роликками. Між упорною плитою і затискними плитами розміщені плити 3 і рами 4, які утворюють камери фільтрпреса.

Плити являють собою плоскі пластини, що мають внутрішню рифлену з обох боків поверхню. Рифлення плит має на меті створення каналів для стікання фільтрату і виконується у вигляді вертикальних борозен у вигляді усічених пірамідок і похилих борозен, що сходяться до вивантажувального отвору.

Окрім прямокутних плит, використовуються круглі плити. Їхні габаритні розміри дещо більші, ніж квадратні, але для їх затиску потрібні менші зусилля, оскільки за інших рівних умов можна одержати меншу площу контакту між плитою і рамою.

Затискні пристрої бувають механічними (гвинтовими) і гідравлічними.

Робота фільтрпреса відбувається так. Плити з обох боків накриваються фільтрувальною тканиною (серветкою), у ній прорізаються отвори відповідно до отворів у плитах і рамах. Після цього плити і рами стискаються за допомогою затискного пристрою. У праві живильні канали подається фільтрована рідина (рис. 2.7), яка надходить через отвори рам у камери, утворені плитами і рамами. Під тиском рідина проникає через тканину і через нижній отвір і через кран стікає в корито. Фільтрування триває до заповнення осадам простору між плитами.

Після фільтрування відбувається промивання. Промивна рідина (рис. 2.7) надходить у лівий канал, з якого через похилі отвори в плитах з протилежного до осаду боку надходить у простір між серветкою і плитою. Пройшовши через серветку у шар осаду, вона з кранів витікає у жолоб. Після промивання іноді проводять просушування осаду стисненим повітрям, яке нагнітається в канал для промивання. Потім відпускається затиск, проводиться розбирання плит і рам і зняття осаду із серветок. Потім цикл роботи фільтру повторюється.

3. Фільтр безперервної дії: барабанний вакуум-фільтр

Барабанні вакуум-фільтри. Робочий орган – циліндричний барабан із подвійною стінкою, що поволі обертається. Простори між стінками розділено радіальними перегородками на ряд комірок 1 (рис. 2.8). Комірки закриті перфорованими листами, що вкриті фільтрувальною тканиною в один або два шари. При використанні двох шарів нижній – більш пухкий, верхній – щільніший. Комірки сполучені дренажними трубками 2 із маточиною (рос. ступица), до якої кріпляться порожнисті цапфи із розподільним пристроєм 8, що знаходиться під вакуумом. Барабан приводиться в дію від привода через зубчасте колесо. Розподільний пристрій складається з круглого

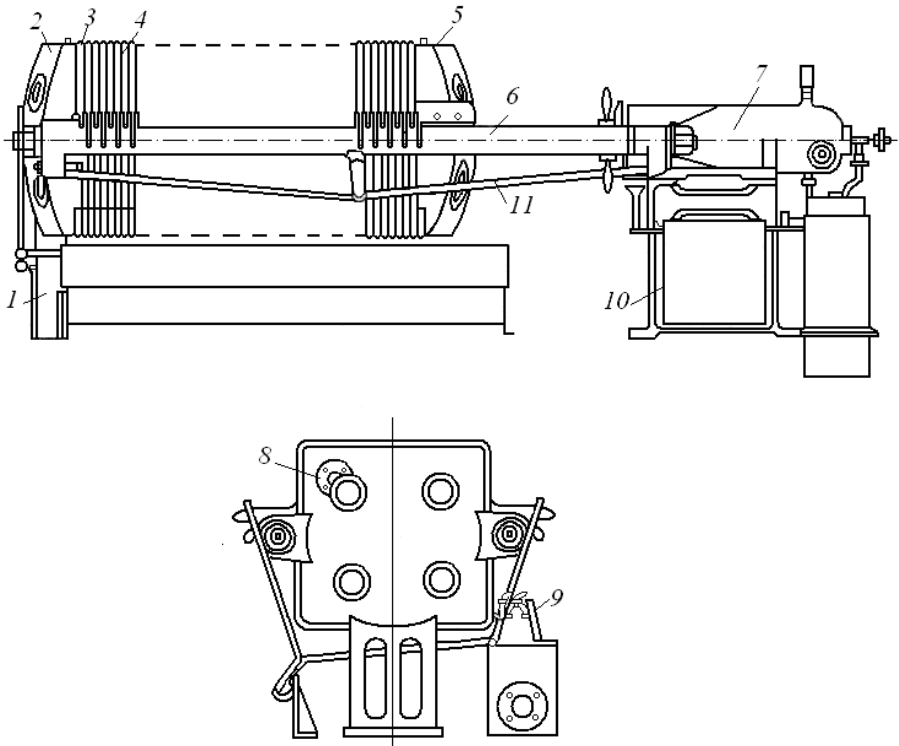


Рисунок 2.6 – Плитково – рамний фільтрпрес:
 1 і 10 – опорні стійки; 2 – упорна плита; 3 –
 фільтрувальні
 плити; 4 – фільтрувальні рами; 5 – затискна плита;
 6 – прогони; 7 – механізм затискання плит;
 8 – штуцер для підведення суспензії;
 9 – кран для відведення фільтрату; 11 – шпренгельна
 ферма

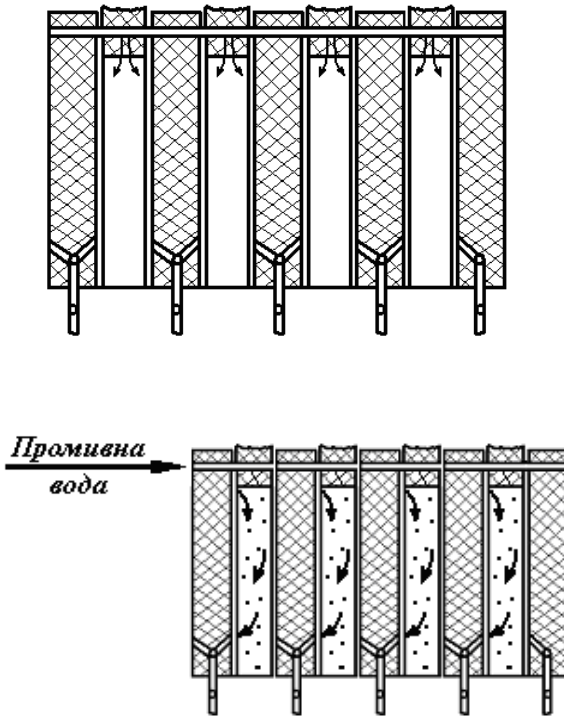


Рисунок 2.7 – Схема фільтрування і промивання на рамному фільтрпресі

корпусу, коміркової й розподільної шайб. Корпус розділений перегородками на відсіки із штуцерами. Коміркова шайба має по колу отвори за кількістю комірок фільтра, вона обертається разом із барабаном, а розподільна шайба закріплена на корпусі розподільного пристрою і має секторні вікна. Шайби пришліфовані й притиснути одна до одної вакуумом і пружиною. Суспензія подається в корито 11, що має маятникову мішалку 13, в корито занурена нижня частина барабана. У зоні I під дією вакууму відбувається фільтрування, при цьому на тканині утворюється осад. Фільтрат збирається в порожнині

комірок *I* і через дренажні трубки *2* і відсік *12* відводиться у збірник фільтрату. У зоні *II* комірки вже не занурені в суспензію і під дією вакууму повітря витісняють рідину з пор осаду, зневоднюючи його. У зоні *III* осад зрошується рідиною з форсунок *4* через пори тканини *5*, натягнутої на ролики *3*. Тут комірки через канал *6* сполучені зі збірником промивного фільтрату. Під дією вакууму промивна рідина витісняє з пор осаду залишки рідкої фази. У зоні *IV* відбувається друге зневоднення (просушування), залишки промивної рідини надходять у збірник промивного фільтрату. У зоні *V* ножами *9* із тканини віддаляється осад. Через штуцер *7* в осередки подають стиснене повітря для відділення осаду від тканини. У зоні *VI* через штуцер *10* у комірки подають стиснене повітря, яке проходить через тканину і барботується через суспензію, при цьому тканина відмивається від частинок, застряглих у її порах, – відбувається регенерація тканини.

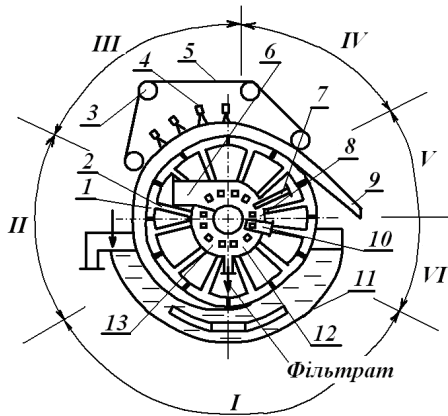


Рисунок 2.8 – Барабанний комірчастий вакуум-фільтр:

1 – комірка барабана; 2 – дренажні труби; 3 – ролики; 4 – форсунок; 5 – промивна тканина; 6 – канал розподільного пристрою; 7 – штуцер; 8 – розподільний пристрій; 9 – ніж; 10 – штуцер; 11 – корито; 12 – відсік розподільного пристрою; 13 – маятникова мішалка. I – зона фільтрування; II – зона просушування; III – зона промивання; IV – зона другого просушування; V – зона видалення осаду; VI – зона регенерації тканини

Барабанний фільтр, що працює під тиском

Комірчастий фільтрувальний барабан 1, що обертається, поміщений у кожух 2 (рис. 2.9).

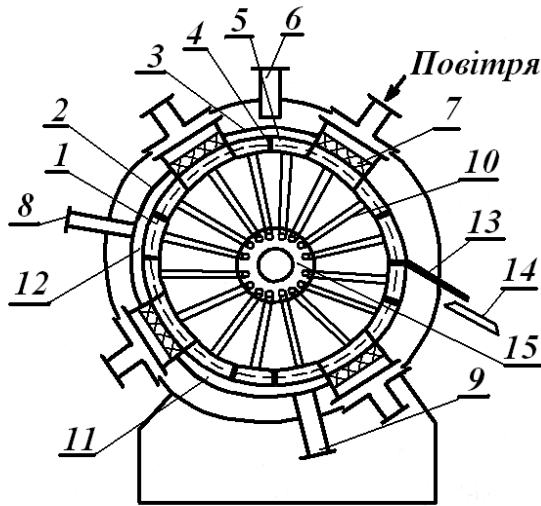


Рисунок 2.9 – Барабанний фільтр, що працює під тиском:

1 – комірчастий фільтрувальний барабан; 2- кожух; 3, 11, 12 – герметичні камери; 4 – перегородки; 5 – комірки барабана; 6, 8, 9 – штуцери; 7 – ущільнення; 10 – дренажні труби; 13 – ніж; 14 – лоток; 15 – розподільна головка; 16 – фільтрувальна перегородка

Фільтрувальна перегородка – перфорований лист, – укритий тканиною, розміщеною в западинах комірок 5, утворених перегородками 4. Кільцевий простір між кожухом і барабаном розділений ущільненнями 7 на герметичні камери – 3, 11, 12. Ущільнення притиснуті до барабана стисненим повітрям. Суспензія подається через штуцер 9 у камеру 11 і фільтрується. Фільтрат по дренажних трубках 10 через розподільну головку 15 відводиться у збірник фільтрату. Промивна рідина через штуцер 8 подається в камеру 12 і промиває осад. Осушення осаду проводиться стисненим повітрям, яке подається через штуцер 6 у камеру 3. Осад знімається ножами 13 і по лотку 14 видаляється з фільтра. Ділянка зняття осаду не закрита кожухом. До

ущільненень подається змащувальна рідина. Ножі автоматично підіймаються при наближенні перегородки 4, виготовленої з пластмаси з низьким коефіцієнтом тертя. Барабан обертається від привода через зубчасте колесо. Фільтр використовується для поділу суспензій, які швидко осаджуються. Продуктивність у 1,5 – 2 рази вища, ніж під вакуумом. Перевага – повна герметичність, що дає можливість фільтрувати та вловлювати отруйну пару. Недолік – тертя в рухомих частинах.

4. Використання фільтрів у виробництві двоокису титану

4.1. Використання барабанного фільтра на стадії очищення розчину від шламу («чорна» фільтрація)

На цій технологічній стадії використовуються барабанні фільтри із наливним шаром деревної муки та ножовим зніманням осаду. Барабан має фільтрувальну сітку, яка закріплюється на поверхні перфорованих елементів, розміщених навколо барабана. У цапфу барабана установлюються дві нерухомі вакуумні труби, одна з яких постійно підтримує вакуум у барабані, а через іншу відсмоктується фільтрат, який під дією вакууму проникає скрізь наливний шар у середину барабана. Під барабаном розміщена мішалка, яка виконує коливальні рухи, що перешкоджає осадженню шламу та деревної муки на днище барабана. При кожному обертанні барабана шнек-репульпатор підводиться до поверхні барабана та ножем зрізається 0,5 мм шару деревної муки разом із шламом. Тривалість роботи фільтра 12 робочих годин. Залишок шару осаду товщиною 5-10 мм скидається у каналізацію. Перевагою є добра чистота розчину та достатня механізація технологічних операцій. Недоліками є значні витрати (до 6 %) робочого розчину при переході від стадії фільтрації після наливання шару деревної муки, витрати розчину зі зрізаним шаром деревної муки, труднощі підбору якісної деревної муки за формою частинок та гранулометричним складом, наявність кислих стоків зі шламом та збільшення об'ємів стоків за рахунок видалення у шлам деревної муки.

4.2. Використання барабанного фільтра на стадії відмивання метатитанової кислоти від хромофорних домішок («біла» фільтрація)

На першій стадії фільтрації використовується барабанний фільтр із наливним шаром деревної муки та ножовим зніманням осаду. Осад метатитанової кислоти (МТК) з поверхні барабана зрізається ножом із незначним шаром деревної муки та спрямовується у шнек-репульпатор, в якому репульпується хімічно очищеною водою. Фільтрат (гідролізна кислота) подається на утилізацію. Після репульпації суспензії насосом подається на другу стадію фільтрації, на якій використовуються барабанні фільтри із валиковим зніманням осаду та фільтрувальною тканиною (шар деревної муки на цій стадії не використовується!). Шар осаду товщиною 10-15 мм із фільтрувальної тканини знімається валиком, поверхня якого покривається шаром гуми. Шар осаду зрізається із валика ножом та спрямовується у шнек-репульпатор, куди подається хімічно очищена вода. Осад репульпується водою та самопливом спрямовується у реактор відбілки. Недоліками є явище окиснення у осаді хромофорних домішок при контактуванні осаду з повітрям, втрати МТК з фільтратом при заміні фільтрувальної тканини, значні енерговитрати на приводи обертання барабана, шнека-репульпатора та валиків.

4.3. Використання листового фільтра на стадії відмивання метатитанової кислоти від хромофорних домішок («біла» фільтрація)

Основний вузол листового фільтра – фільтрувальний листовий елемент являє собою рамку, яка виготовляється із корозійностійкого матеріалу. Всередині рамка заповнена насадками із фільтрувальними пазами. Рамка забезпечена по боках фільтрувальною тканиною, під поверхнею якої створюється вакуум (за рахунок відкачування повітря із порожнини рамок через відповідні патрубки та колектори). На спеціальній металоконструкції закріплена серія таких фільтрувальних елементів, створюючи батарею.

Фільтрувальна поверхня залежить від кількості рамок і усередньому становить 80-200 м². Батарея рам підключається до вакуумного колектора. Потім батарея краном опускається у резервуар із робочою суспензією. Залишкова суспензія через переливний патрубок переливається в висхідну ємність. За рахунок вакууму фільтрат просисається скрізь фільтрувальну тканину, на поверхні якої затримується осад. Після утворення осаду МТК товщиною 35-40 мм подачу суспензії припиняють і переміщують батарею з рамками у резервуар із хімічно очищеною водою, яка за рахунок вакууму просисається через шар осаду, відмиваючи його. Після промивання осаду батарея рам переноситься на резервуар із широкою воронкою для вивантаження осаду. Вакуум відключається, і осад під дією сил тяжіння скидається у ємність-репульпатор, в якому осад репульпується хімічно очищеною водою до відповідної концентрації.

Перевагами є: добре відмивання МТК від домішок; фільтрувальні елементи знаходяться у середовищі суспензії при наборі осаду та у водному середовищі при промиванні, що значно скорочує контакт осаду із повітрям та подальше окиснення хромофорних домішок у осаді; скорочення стадій промивання; зниження енерговитрат. Недоліками є: значний об'єм ручної праці; труднощі автоматизації процесу; часте очищення ємностей від налиплого на стінках апарата осаду.

Цим недолікам допомагає запобігти нова технологія фільтрування, яка відрізняється від традиційної тим, що в ній запропонований інший механізм процесу. Стадія набору осаду здійснюється аналогічно попередньому, але батарея фільтрувальних рам не витягується із ємності, а залишається в ній, залишок суспензії зливається із ємності у висхідну ємність через трубопроводи з регульовальними кранами. Потім відкриваються чотири клапани подачі хімічно очищеної води, ємність заповнюється водою і проводиться промивання осаду. Ця технологія фільтрування має переваги: швидкість зливу суспензії залежить від діаметра зливної труби; об'єм зливної суспензії, що зливається дуже малий, оскільки осад на

фільтрувальних елементах витискає суспензію; батарея фільтрувальних рам постійно знаходиться у ємності, що виключає контакт осаду з повітрям та окиснення домішок; не треба використовувати кран-тельфер для перенесення батареї рам; осад постійно утримується на поверхні фільтрувальних елементів за рахунок вакууму; не треба використовувати ресивер та вакуумні шланги.

4.4. Використання прес-фільтрів

Розчин після освітлення на барабанних фільтрах із вмістом у ньому шламу до 0,5 г/л піддають фільтрації на прес-фільтрах. Використовують два типи фільтрів – камерний та рамний. Камерний прес-фільтр являє собою конструкцію пластин, які при стисканні утворюють між пластинами камеру. Рамний прес-фільтр передбачає між пластинами рамку, за рахунок чого утворюється порожнина, яка заповнюється шламом у процесі фільтрування. Фільтрування проводиться під тиском до 5 ат.

Особливостями фільтрування на прес-фільтрах є: явище значного ущільнення осаду, що призводить до погіршення відмивання МТК від хромофорних домішок; вологість осаду досягає 50 %, за рахунок чого виникають проблеми репульпації осаду.

Висновок

Фільтри є одними із найбільш поширених у хімічній промисловості апаратів, номенклатура їх типів різноманітна і тому треба їх підбирати за величиною фільтрувальної поверхні, враховуючи умови конкретної технології виробництва.

Питання для самоконтролю

1. Дайте класифікацію фільтрів.
2. Опишіть будову та принцип дії автоматизованого вертикального листового фільтра.
3. Опишіть будову та принцип дії горизонтального листового фільтрпреса із круглими рамками.
4. Опишіть будову та принцип дії плитково-рамного фільтрпреса.
5. Опишіть будову та принцип дії барабанного вакуум-фільтра.

Тема 3. Будова та принцип дії центрифуг

План

1. Класифікація центрифуг.
2. Центрифуги з пульсуючим (ФГП) вивантаженням осаду.
3. Центрифуги з ножовим (ФГН) вивантаженням осаду.
4. Горизонтальна осаджувальна центрифуга зі шнековим вивантаженням осаду (ОГШ).
5. Використання центрифуг у виробництві двоокису титану.

Ключові терміни:

центрифуга ФГП, центрифуга ФГН, центрифуга ОГШ.

1. Класифікація центрифуг. Центрифуги класифікують:

1. За фактором поділу – тихохідні, нормальні, швидкісні;
2. За способом вивантаження осаду – ручна, гравітаційна, шнекова, ножами і шкрябаннями; пульсуючими поршнями.
3. За конструкцією опор і розміщенням осі барабана – підвісні вертикальні (на колонках); вертикальні стоячі (із підпертим валом); горизонтальні; похилі.
4. За організацією процесу – періодично і безперервно діючі. Періодично діючі бувають підвісні на трьох колонах (триколонні), підвісні із верхньою опорою.

2. Центрифуги з пульсуючим (ФГП) вивантаженням осаду

Центрифуги з пульсуючим (ФГП) вивантаженням осаду застосовують для поділу суспензій із кристалічною твердою фазою. Вони ефективні також при обробці волоконних матеріалів. Одно- і двокаскадні центрифуги – машини загального призначення. Їх випускають з одно- і двостороннім вивантаженням осаду (здвоєні). Центрифуги з ротором більше двох каскадів – спеціалізовані.

Суспензія подається по завантажувальній трубці 11 (рис. 2.10) і через конічний живильник 9 надходить на пруткове сито 15, закріплене на перфорованому барабані 10. Барабан встановлений на порожньому валу 7, який приводиться в рух від електродвигуна 1 через клинопасову передачу і шків 3. Під дією

відцентрової сили, що виникає при обертанні барабана, суспензія притискається до сита, а фільтрат проходить через осад, сито і отвори в барабані й надходить у приймальну ємність, з якої відводиться через патрубок виведення фільтрату. Усередині барабана розміщений поршень-штовхач 8, закріплений на штоку 6, сполученому з поршнем 2. Поршень-штовхач має поворотно-поступальну ходу і обертальний рух. Рухом штовхача керує гідравлічна система, що включає масляний насос з електродвигуном 4 і механізм керування 5. При поворотно-поступальній ході поршень-штовхач знімає осад з сита і скидає його у вивантажувальний патрубок. Товщину шару осаду на поверхні сита регулюють за допомогою змінного кільця 14, закріпленого на конічному живильнику. Подача рідини для промивання осаду здійснюється по трубопроводу 13, який проходить через кришку 12. Концентрація твердої фази і швидкість подачі суспензії повинні бути сталими.

Переваги: безперервність, висока продуктивність, невеликі дроблення твердої фази, високий ступінь зневоднення, ефективне промивання. Недолік: підвищений знос твердої фази з фільтратом, особливо при зворотному ході поршня.

При малій концентрації суспензії не встигає фільтруватися і потрапляє під регульовальне кільце, що призводить до вимивання осаду і потрапляння рідини в бункер готового продукту. При високій концентрації суспензії виникає вібрація центрифуги через нерівномірний розподіл осаду по колу барабана, тому для кожної оброблюваної суспензії є верхня і нижня межа концентрації.

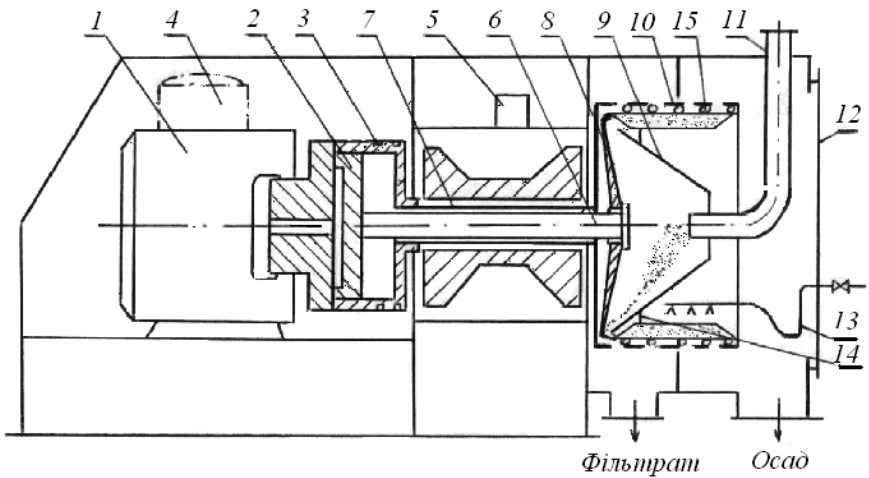


Рисунок. 2.10 – Центрифуга ФГП із пульсуючим вивантаженням осаду:

1 – електродвигун; 2 – поршень; 3 – шків; 4 – масляний насос з електродвигуном; 5 – механізм керування гідросистемою; 6 – шток; 7 – порожнистий вал; 8 – поршень-штовхач; 9 – конічний живильник; 10 – барабан; 11 – завантажувальна труба; 12 – кришка; 13 – трубопровід для промивної рідини; 15 – сито; 14 – змінне кільце

У двокаскадних центрифугах збільшена довжина фільтрувального барабана. Ротор такої центрифуги складається з двох фільтрувальних барабанів, вставлених один в один з можливістю поздовжнього відносного переміщення. Барабан другого каскаду і поршень-штовхач закріплені на порожнистому валу і не можуть переміщатися в осьовому напрямку. Барабан першого каскаду здійснює такий рух, що осад переміщається поперемінно по ситах першого і другого каскадів.

2. Центрифуги з ножовим (ФГН) вивантаженням осаду

Фільтрувальні центрифуги призначені для розділення суспензій із середньою та дрібнозернистою (розмір частинок понад 30 мкм), переважно розчинною, твердою фазою об'ємною концентрацією понад 10 %. При обробленні суспензій

із меншою концентрацією твердої фази значно збільшується цикл їх розділення, а центрифуги цього типу призначені для роботи з більш короткими циклами, ніж інші типи фільтрувальних центрифуг.

На центрифугах типу ФГН не рекомендується обробляти нерозчинні продукти або продукти з нерозчинними домішками, тому що у цих випадках затрудняється регенерація підшару, що залишається на фільтрувальній основі. Конструкцією центрифуг передбачений високий ступінь зневоднення та промивання осаду.

Будова автоматизованої центрифуги з консольним розміщенням ротора показана на рис. 2.11. Загальною конструктивною ознакою цих центрифуг є горизонтальне розміщення осі ротора 5, вал 7 якого обертається у підшипниках качання 6, установлених у станині 8. Привід центрифуги здійснюється від електродвигуна через клинопасову передачу.

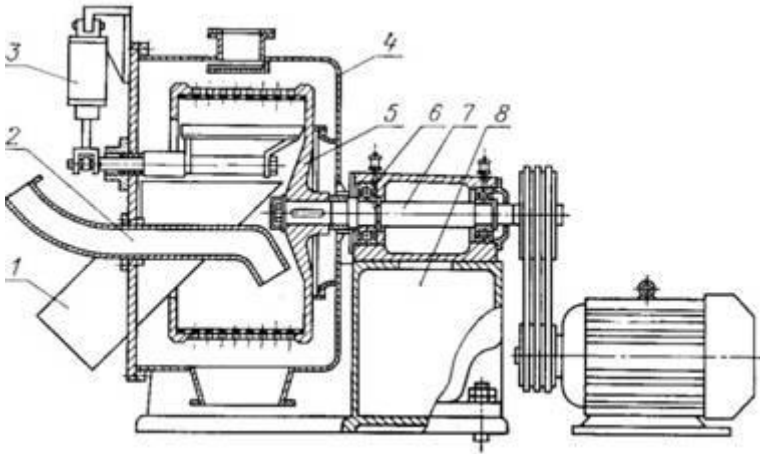


Рисунок 2.11 – Центрифуга типу ФГН:

1 – розвантажувальний бункер; 2 – живильна труба; 3 – механізм зрізання (привід із ножем); 4 – кожух; 5 – ротор; 6 – підшипниковий вузол; 7 – вал; 8 – станина

На передній кришці центрифуги змонтовано: механізм зрізання осаду 3, розвантажувальний бункер 1, живильна труба 2, труба

для промивання та регенерації (для фільтраційних центрифуг), регулятор рівня шару завантаження та перемикачі руху ножа. В кожусі 4 центрифуги передбачено люк для доступу при заміні або ремонту сит для фільтрувальних центрифуг і люк-повітровід для відведення парів і газів із порожнини кожуха. Завантажувальний клапан встановлено безпосередньо на баці з мішалкою для суспензії. Суспензія подається в ротор 5 через завантажувальний клапан і живильник (на рисунку 2.11 не показані). Завантаження продукту регулюється за допомогою регулятора, який дозволяє проводити як одноразове, так і багаторазове завантаження до отримання необхідної товщини шару осаду в роторі.

Після завантаження ротора здійснюється віджимання – видалення з осаду рідкої фази, а потім промивання осаду рідиною, що подається через промивний клапан та промивну трубу (на рисунку 2.11 не показані). По закінченні промивання повторюється операція віджимання. Віджимний осад зрізається ножом механізму зрізу 3, ссипається у приймальний бункер 1 і виводиться з центрифуги. Незрізаний шар видаляється шляхом промивання (регенерації) фільтрувальної основи спеціальними розчинами, що надходять через клапан регенерації та промивну трубу. Фільтрат, промивна вода та рідина регенерації відводяться з центрифуги роздільно через відокремлювальний клапан.

Тривалість операцій віджимання, промивання та регенерації контролюється за допомогою реле тривалості, встановленого на станції автоматичного управління.

3. Горизонтальна осаджувальна центрифуга зі шнековим вивантаженням осаду (ОГШ)

Осаджувальні центрифуги зі шнековим вивантаженням осаду призначені для поділу суспензій із нерозчинною твердою фазою. Їх застосовують для зневоднення кристалічних і зернистих продуктів, а також для освітлення суспензій. За напрямом руху осаду і суспензії розрізняють протитечійні та прямотечійні центрифуги. Ротори можуть бути горизонтальними й вертикальними з конічною або циліндроконічною формою. У горизонтальних центрифугах ротор поміщається між опорами, рідше – консольний,

у вертикальних – підвісний. За призначенням осаджувальні центрифуги поділяються на: зневоднювальні, універсальні й освітлювальні. Зневоднювальні розділяють висококонцентровані суспензії з розмірами частинок не менше 25 мкм, для них чинник поділу $\Phi < 2000$, високопродуктивні $l_6/D_6 < 1,7$. Універсальні розділяють суспензії малої і середньої концентрації з розмірами твердих частинок більше 10 мкм, $\Phi = 2000 - 3000$, $l_6/D_6 = 1,7 - 2,2$. Освітлювальні призначені для очищення низькоконцентрованих суспензій від високодисперсної твердої фази, $\Phi > 2500$, $l_6/D_6 > 2,2$, вони високопродуктивні, дають чистий фугат.

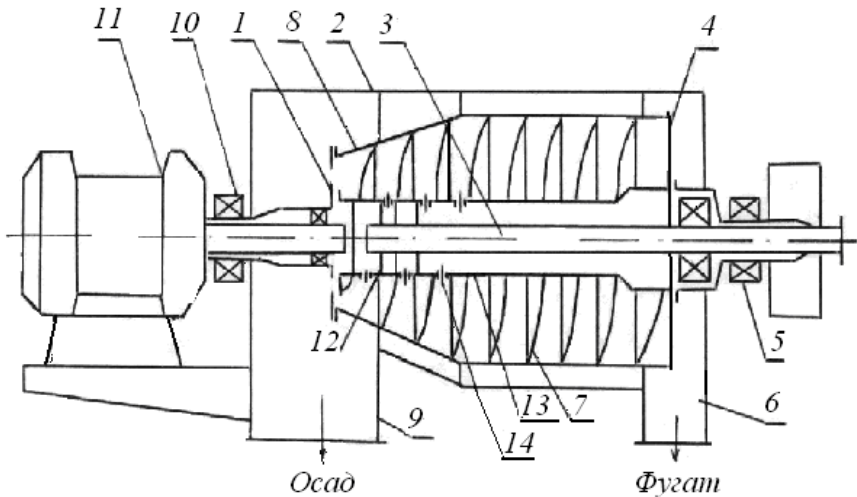


Рисунок 2.12 – Горизонтальна протитечійна осаджувальна центрифуга зі шнековим вивантаженням осаду:

1, 4 – кришки; 2 – кожух; 3 – нерухома труба; 5, 10 – підшипникові вузли; 6 – камера кожуха для фугату; 7 – шнек; 8 – циліндроконічний ротор; 9 – збірник осаду; 11 – планетарний редуктор; 12 – кільця; 13 – барабан шнека; 14 – отвори

У горизонтальних протитечійних центрифугах суспензія подається по трубі 3 у внутрішню порожнину барабана шнека 13, де обертається з частотою, близької до частоти обертання циліндроконічного ротора 8 (рис. 2.12). Через отвори 14 в

барабані суспензія надходить у ротор, що обертається, і переміщається до зливних вікон кришки 4. Частинки твердої фази під дією відцентрових сил осідають на стінці ротора і шнеком 7 переміщуються в зону осушення осаду, де він ущільнюється, звільняючись від рідини. В кінці зони осушення осад викидається в збірник 9 через вікна кришки 1. Фугат через вікна кришки 4 виливається в камеру кожуха 6. Цапфи кришок 1 і 4 спираються на підшипникові вузли 5 і 10. Ротор поміщений у кожух 2. Ротор і шнек обертаються з різними, але близькими частотами. Це досягається за допомогою планетарного або спеціального редуктора 11. Суспензія подається на межу між зонами осушення і осадження, що досягається за допомогою кілець 12.

4. Використання центрифуг у виробництві двоокису титану

На стадії видалення купоросу із суспензії після кристалізації раніше використовували підвисні центрифуги з ручним вивантаженням осаду. Пізніше, зі збільшенням об'ємів виробництва двоокису титану, широке використання знайшли центрифуги НГП – безперервно діючі горизонтальні із пульсуючим вивантаженням осаду. Недоліками центрифуг НГП є: 1) виникнення за рахунок розриву фільтрувальної перегородки та зношення шпальтових сит промоїн у шарі осаду, що призводить до сильної вібрації центрифуги та проникнення частини суспензії в осад (купорос) та значної вологості осаду; 2) погана фільтрація суспензії, яка містить частинки лускоподібної форми; 3) частина дрібних кристаликів проскакує через зазори поміж шпальтами та потрапляє у відфільтрований розчин.

На сьогодні почали використовувати центрифуги ФГН – фільтрувальні горизонтальні з ножовим зніманням осаду. Працює центрифуга за такими стадіями: 1) набір осаду; 2) віджимання осаду; 3) промивання осаду; 4) сушіння осаду; 5) вивантаження осаду. Оптимальний діапазон величини фактора розділення від 300 до 600. Перевагами є можливість автоматизації процесу, недоліками – подрібнення кристалів при

зрізанні шару осаду та труднощі регенерації фільтрувальної перегородки.

Після шарового млина мокрого подрібнення подрібнена суспензія подається на центрифугу ОГШ (відстійні горизонтальні шнекові), в якій відбувається розділення на велику та дрібну фракції. Дрібна фракція надходить на поверхневу обробку, а велика повертається на додаткове подрібнення у шари млина. Оптимальний діапазон величини фактора розділення від 200 до 600. Перевагами є висока продуктивність центрифуг та можливість проведення тонкого розділення суспензій з великою концентрацією твердої фази, а недоліками – ненадійний в експлуатації привід, забивання осадом кожуха, швидке зношення оперення шнека, зношення поверхні вивантажувальних вікон абразивним осадом.

Висновок

Центрифуги є одними із найбільш поширених у хімічній промисловості апаратів, номенклатура їх типів різноманітна, і вони є достатньо ефективними, тому треба їх підбирати, враховуючи умови конкретної технології виробництва.

Питання для самоконтролю

1. Дайте класифікацію центрифуг.
2. Опишіть будову та принцип дії центрифуги ФГП.
3. Опишіть будову та принцип дії центрифуги ФГН.
4. Опишіть будову та принцип дії центрифуги ОГШ.
5. Особливості використання центрифуг у виробництві двоокису титану.

Тема 4. Гідравлічна класифікація і повітряна сепарація

План

1. Конструкції гідравлічних класифікаторів.
2. Конструкції повітряних сепараторів та класифікаторів.
3. Конструкція повітряно-прохідного сепаратора.

Ключові терміни:

спіральний, багатосекційний та рейковий класифікатор, гідро – циклон, пневмокласифікатор, повітряно-прохідний сепаратор.

1. Конструкції гідравлічних класифікаторів

Гідравлічна класифікація здійснюється в горизонтальному або у висхідному потоці води. Швидкість потоку обирається так, щоб із класифікатора виходили частинки, менші за певний розмір, а осаджувалися – більші за певний розмір.

Гідравлічні класифікатори – класифікатори, в яких вихідний сипкий матеріал розподіляється за розміром у циліндричній, конічній або пірамідальній ємності методом відстоювання під дією гравітаційних або відцентрових сил у водному середовищі.

Апарати гідравлічної класифікації поділяються за двома основними ознаками: за силовим полем, під дією якого здійснюється розділення суспензії, і за способом розвантаження пісків. За силовим полем розрізняють класифікатори гравітаційні і відцентрові, за способом розвантаження пісків – із примусовим і самопливним розвантаженням.

За способом видалення зернистої частини матеріалу гідравлічні класифікатори поділяють на класифікатори із механічним розвантаженням (скребкові, елеваторні) та з розвантаженням самопливом (конічні, пірамідальні, гідроциклони, дугові сита).

За принципом дії розрізняють гідравлічні класифікатори, в яких процес розділення здійснюють під дією гравітаційних сил та сил опору середовища (конічні, пірамідальні, скребкові, елеваторні), та класифікатори, в яких, крім названих сил, діють ще й відцентрові сили (гідроциклони).

Для проведення процесу існують *гідралічні спіральний та рейковий класифікатори* – це нахилені корита, в яких рухається спіраль (шнек) (рис. 2.13 а) або рама з гребками (рис. 2.13 б).

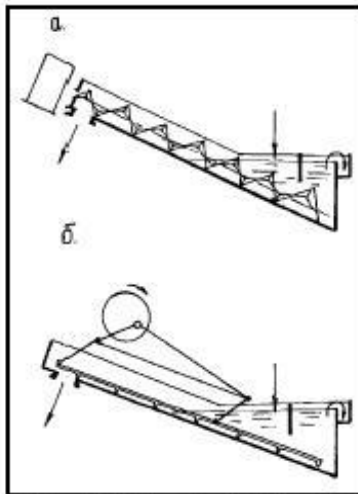


Рисунок. 2.13 – Гідралічні класифікатори:
а – спіральний; б – рейковий

Гідралічні класифікатори багатосекційні (багатокамерні) призначені для розділення матеріалів на кілька класів за швидкістю їхнього осадження у водному середовищі (рис. 2.14).

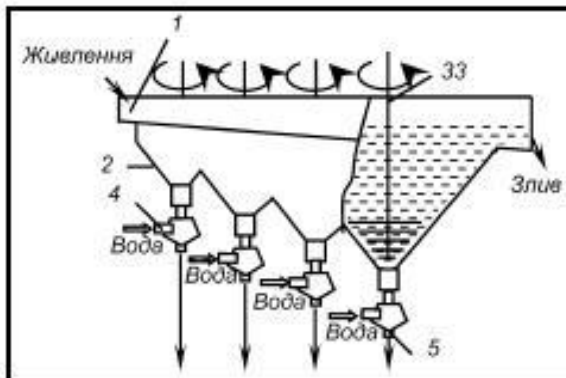


Рисунок 2.14 – Гідралічний багатосекційний класифікатор:
1 – жолоб; 2 – класифікаційні секції (камери); 3 – мішалки; 4 – вортекси; 5 – розвантажувальні конуси

Такі класифікатори являють собою відкритий жолоб 1, що розширюється до зливного порога, яким протікає горизонтальний потік суспензії.

Крім того, використовують *гідроциклони*, а тонкі частинки осаджують у відстійних центрифугах.

За призначенням розрізняють гідроциклони:

класифікаційні – для розділення мінеральних зерен за їх розміром, а саме: на тонкозернистий та грубозернистий шлам;

згущувальні – для одержання осаду з підвищеною концентрацією твердих частинок і зливу;

збагачувальні – для розділення пульпи на продукти за густиною.

Залежно від тиску на вході розрізняють:

напірні гідроциклони, в яких надлишковий тиск – понад 100 кПа, низьконапірні – менше 100 кПа і вакуумні (сифонні) – тиск на вході менший від атмосферного.

В останніх початкове прискорення пульпи на вході до апарата досягається за рахунок розрідження, що створюється сифоном для примусового вивантаження зливного продукту.

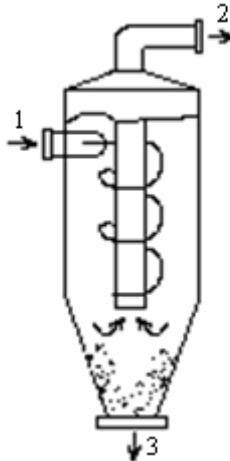


Рисунок 2.15 – Гідроциклон:
1 – пульпа; 2 – злив; 3 – шлам (піски)

Гідроциклон (рис. 2.15) складається з короткої циліндричної (верхньої) частини з патрубком для тангенціального введення пульпи (по дотичній до поверхні циліндра) і конічної (нижньої) частини з отвором біля вершини конуса для розвантаження пісків (грубозернистої, згущеної або важкої фракції пульпи). Кут конусності для класифікації і згущення $10 - 20^\circ$, освітлення — $10 - 20^\circ$, збагачення у важких суспензіях — $30 - 45^\circ$, збагачення у воді — $90 - 120^\circ$. Верхня частина циліндра закривається кришкою, в центрі якої встановлено зливний патрубок, що слугує для розвантаження тонкозернистої, розрідженої фракції.

Футерування гідроциклонів карбідом кремнію сприяє збільшенню їхнього терміну служби в 5 – 10 разів.

2. Конструкції повітряних сепараторів та класифікаторів

Зернисті матеріали розділяються переважно під дією гравітаційних та інерційних сил у висхідному повітряному потоці у *гравітаційних пневмокласифікаторах (повітряних сепараторах)*.

Найпростіший із них являє собою вертикальний вільний канал, у середню частину якого вводять полідисперсний матеріал. Дрібна фракція виноситься повітряним потоком через верхній патрубок у циклон, а великі частинки випадають униз. Підвищити ефективність розділення дозволяє *багатотрубний класифікатор Гонеля*, в якому послідовно полідисперсна суміш проходить через вертикальні трубопроводи різного діаметра (від меншого до більшого) та поділяється на велику, середню та дрібну фракції. Дані пневмокласифікатори не забезпечують достатньої ефективності розділення, оскільки за рахунок короткочасного контакту фаз у велику фракцію потрапляє значна кількість дрібної. Використовуються такі пневмокласифікатори для розділення сипких матеріалів за граничним розміром 0,05-0,1 мм, їх ефективність вивільнення дрібної фракції становить 0,2-0,25.

Подальший розвиток цих апаратів представив *зигзагоподібний класифікатор Кайзера* (рис. 2.16 а), в якому за рахунок повороту потоку повітря виникають відцентрові сили,

що забезпечує більший контакт фаз і підвищує ефективність розділення. Більш простий у виготовленні є апарат (рис. 2.16 б), в якому на двох протилежних стінках одна під одною закріплені суцільні полиці. Такі пневмокласифікатори використовуються для розділення сипких матеріалів за граничним розміром 0,1 – 10 мм, їх ефективність вивільнення дрібної фракції становить 0,7 – 0,75.

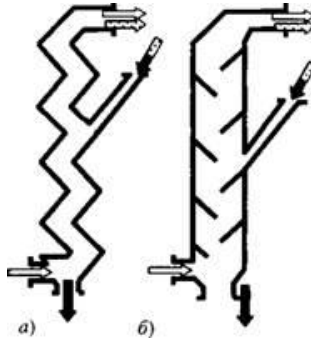


Рисунок 2.16 – Схеми класифікаторів:
а – зигзагоподібний Кайзера; б – із суцільними полицями

Інтенсивність контакту фаз значно підвищується при установці в апараті перфорованих полиць, що забезпечує місцеве збільшення швидкості та турбулентності потоку. Тому такі класифікатори забезпечують вищу ефективність вивільнення дрібної фракції, яка становить 0,8 – 0,85 при розділенні сипких матеріалів за граничним розміром 0,06 – 7 мм. Схема *гравітаційного полицного пневмокласифікатора* із перфорованими полицями подана на рис. 2.17. Окрім полицних контактних елементів, можуть використовуватися перфоровані ґратки (рис. 2.18) чи клиноподібні елементи.

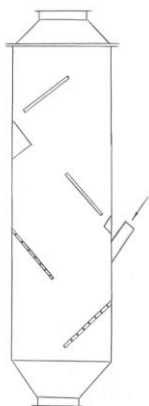


Рисунок 2.17 – Гравітаційний поличний пневмокласифікатор із перфорованими полицями

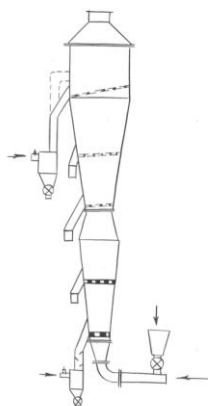


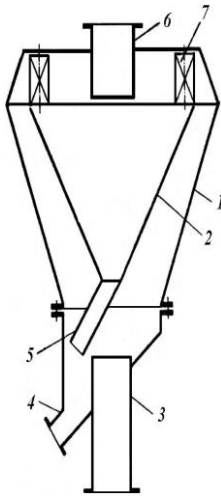
Рисунок 2.18 – Гравітаційний пневмокласифікатор із перфорованими ґратками

Певну, але недостатню чіткість розділення (ефективність вивільнення дрібної фракції становить 0,3 – 0,4 при розділенні сипких матеріалів за граничним розміром 0,5 – 1 мм) забезпечують пневмосепаратори киплячого (псевдозрідженого) шару.

Меншими енерговитратами порівняно із вертикальними пневмокласифікаторами характеризуються інерційні горизонтальні пневмокласифікатори. Вони являють собою порожню осаджувальну камеру, яка в нижній частині поділена на ряд приймальних бункерів. У перший бункер, у напрямку руху потоку, випадають частинки великої фракції, у другий – частинки середньої фракції, у третій – частинки дрібної фракції. Ефективність вивільнення дрібної фракції у таких апаратах становить 0,38 – 0,42 при розділенні сипких матеріалів за граничним розміром 0,1 – 0,5 мм. Оскільки треба забезпечувати ламінарність рухомого потоку, то інерційні пневмокласифікатори мають значні габарити та незначну продуктивність.

3. Конструкція повітряно-прохідного сепаратора

Для відокремлення твердих частинок із газового потоку використовують повітряно-прохідний сепаратор (рис. 2.19), в якому осадження проводиться під дією відцентрової сили.



*Рисунок 2.19 – Повітряно-прохідний сепаратор:
 1 – корпус; 2 – внутрішній конус; 3 – патрубок для введення вихідної зернової суміші з потоком повітря;
 4, 5 – патрубки для відведення великих частинок (велика та середня фракції);
 6 – патрубок для відведення повітря із дрібними частинками (дрібна фракція);
 7 – поворотні лопатки*

Повітряно-прохідний сепаратор працює у замкнутому режимі разом із кульовим барабанним млином. Газодисперсна суміш, яка відсисається із барабанного млина, входить у робочу камеру сепаратора 1 по патрубку 3 зі швидкістю 20 м/с. За рахунок розширення корпусу сепаратора швидкість потоку знижується, і великі частинки під дією гравітаційних сил випадають із потоку та виводяться через патрубок 4, після чого спрямовуються на додаткове подрібнення у барабанний млин. Далі газодисперсний потік проходить через поворотні лопатки 7 та тангенціально закручується. За рахунок відцентрових сил із потоку виділяються частинки середньої фракції та виводяться із апарата через патрубок 5, а повітря разом із дрібними частинками виводиться через патрубок 6.

Висновок

Гідрокласифікатори мають значні габарити та витрати розріджувальної рідини, що приводить до виникнення великих об'ємів рідких стоків. Оскільки різниця величин густин рідини та твердих частинок незначна, зменшити габарити гідрокласифікаторів буде проблематично, а знижувати витрати розріджувальної рідини буде доцільно. У пневмокласифікаторів різниця величин густин повітря та твердих частинок достатньо велика, тому деякі конструкції

характеризуються значно меншими габаритами та витратами повітря. До таких апаратів слід віднести гравітаційні пневмокласифікатори із перфорованими полицями, питомі витрати повітря яких становлять 0,5 – 0,7 м³ повітря на 1кг вихідної зернистої суміші.

Питання для самоконтролю

1. Дайте класифікацію гідрокласифікаторів.
2. Опишіть будову та принцип дії спірального гідро класифікатора.
3. Опишіть будову та принцип дії рейкового гідро класифікатора.
4. Опишіть будову та принцип дії багатосекційного гідро класифікатора.
5. Опишіть будову та принцип дії гідроциклону.
6. Опишіть будову та принцип дії гравітаційного поличного пневмокласифікатора.
7. Опишіть будову та принцип дії повітряно-прохідного сепаратора.

Розділ 3. Обладнання для теплових процесів

Тема 1. Випарні апарати

План

1. Класифікація випарних апаратів.
2. Типові конструкції випарних апаратів.
3. Особливості конструкції випарного апарата у виробництві двоокису титану.

Ключові терміни:

випарні апарати із природною циркуляцією, плівкові випарні апарати, випарні апарати з посиленою природною циркуляцією, випарні апарати із примусовою циркуляцією, випарні апарати з винесеною поверхнею нагрівання, роторний випарний апарат, випарні апарати із заглибним пальником

1. Класифікація випарних апаратів

Строгої загальноприйнятої класифікації випарних апаратів немає, проте їх можна класифікувати за рядом ознак:

- 1) за розміщенням поверхні у просторі – горизонтальні, вертикальні, рідше похилі;
- 2) за видом теплоносія – парові, газові, з електрообігрівом, обігрівом високотемпературними теплоносіями: олією, водою при високому тиску;
- 3) за організацією процесу кипіння – у великому об'ємі і у трубах та каналах;
- 4) за режимом циркуляції – із природною і примусовою циркуляцією;
- 5) за кратністю циркуляції – з одноразовою і багаторазовою циркуляцією;
- 6) за поверхнею нагріву – із паровою оболонкою, змійовикові, із трубчастою поверхнею.

До конструкцій висуваються такі вимоги: простота, надійність, технологічність виготовлення, монтажу і ремонту, стандартизації вузлів і деталей, дотримання режиму (тиск, температура, час перебування), високі значення коефіцієнта теплопередачі K .

2. Типові конструкції випарних апаратів

Випарні апарати із природною циркуляцією. Такі апарати випускаються з центральною циркуляційною трубою (рис. 3.1 а) або з двома виносними циркуляційними трубами. Апарат складається з корпусу 1, в нижній частині якого розміщується парова камера із кип'ятильними трубками 2, закріпленими в нижній і верхній трубній плиті 3. Нижня частина корпусу закривається еліптичною або конічною кришкою 8. По осьовій частині парової камери розміщена центральна циркуляційна труба 6. Розчин подається на верхню трубну плиту і заповнює днище і нижню частину кип'ятильних труб. У міжтрубний простір подається пара. Під дією різниці температур розчин закипає, і парорідинна суміш підіймається по кип'ятильних трубах, а на трубній плиті відбувається відокремлення пари від рідини. Пара, яка називається вторинною, піднімається в камеру 7, обтікає відбійник 4 і через сепаратор 5 виходить з апарата. Відбійник і сепаратор забезпечують гравітаційно-інерційну сепарацію пари, внаслідок чого краплини рідини відділяються від пари. Рідина надходить у циркуляційну трубу, де вона має дещо меншу температуру, а отже, й густину. Природна циркуляція виникає під дією різниці густин рідини в циркуляційній трубі і в кип'ятильних трубах. Швидкість рідини на вході в труби називається швидкістю циркуляції. Для збільшення рушійної сили природної циркуляції циркуляційні труби роблять виносними. Ці труби не обігріваються, тому густина рідини в них ще більша, в результаті чого рушійна сила циркуляції зростає.

Теплота від гріючої пари передається шляхом теплопередачі, який складається з тепловіддачі при конденсації гріючої пари, перенесення теплоти теплопровідністю через стінку труби і тепловіддачі при кипінні рідини в трубах і каналах. Гази, що не конденсуються, виводяться з парової камери трубопроводом із вентиляем (пристроєм) 9, оскільки тиск у паровій камері більший, ніж у камері вторинної пари. Апарат встановлюють на лапи 10. При випаровуванні розчинів, що кристалізуються, в апаратах встановлюють конічні днища. В процесі роботи в

кип'ятильних трубах необхідно підтримувати оптимальний п'езометричний рівень рідини, оскільки це сприяє збільшенню коефіцієнта тепловіддачі. Упарений розчин видаляється з нижньої частини днища. Величина необхідного згущення забезпечується кратністю циркуляції.

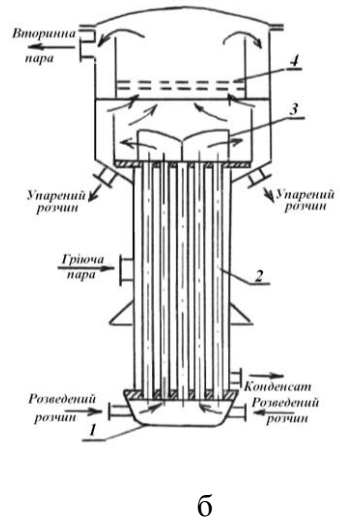
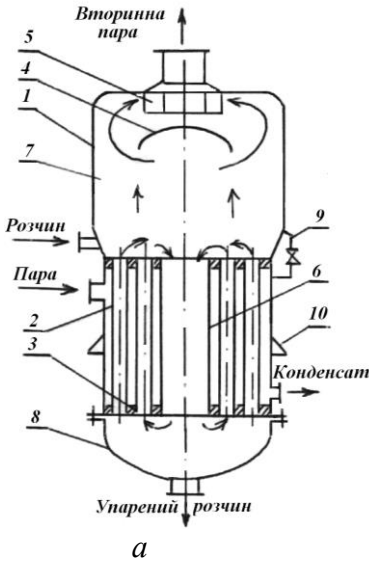
Плівкові випарні апарати. Одним із недоліків апаратів із природною циркуляцією є великий час перебування розчину в апараті. При тривалій дії температури речовина може змінювати свої властивості. Тому для випаровування таких розчинів застосовуються плівкові апарати з одноразовою циркуляцією розчину (рис. 3.1 б). Розчин подається в нижню камеру 1, закипає в трубах 2, парорідинна емульсія ударяється об поверхню сепаратора 3 із зігнутими лопатками, набуває обертального руху і відцентровою силою відкидається до периферії, завдяки чому відбувається сепарація пари. Потім пара проходить через сітчастий сепаратор 4 і виводиться з апарата. Довжина труби в таких апаратах складає від 5 до 9 м. На більшій частині довжини труби розчин кипить у плівці рідини, що підіймається вгору. Гідростатичний стовп у трубах невисокий, тому знижуються втрати корисної різниці температур від гідростатичної депресії. Зниження витрати розчину може призвести до розриву і висихання плівки у верхній частині труби. Робота апарата в такому режимі небажана.

Існують конструкції плівкових апаратів із гравітаційно-стікаючою вниз плівкою рідини. В таких апаратах гідростатичний стовп розчину відсутній. Проте вони не знайшли широкого застосування через складність розподілу розчину, що випаровується, по трубках апарата.

Недоліки: утруднений ремонт через велику довжину труб, розчин не має рівномірної концентрації, при передачі розчину з одного корпусу в інший потрібна установка гідравлічного затвора для уникнення прориву пари. Ці апарати дорожчі, ніж із природною циркуляцією.

Випарні апарати з посиленою природною циркуляцією

Застосовуються для випарювання розчинів, що кристалізуються (рис. 3.1 в). Складається із корпусу 1, трубних решіток 2, в яких розвальцьовані труби 4. Над решіткою встановлені перегородки 3, які утворюють вертикальні канали. Ззовні апарата розміщена циркуляційна труба 5, під апаратом – камери 6 для осадження кристалів. У трубках розчин підігрівається і закипає в каналах, утворених перегородками 3. Розміри каналів невеликі, тому відносна швидкість



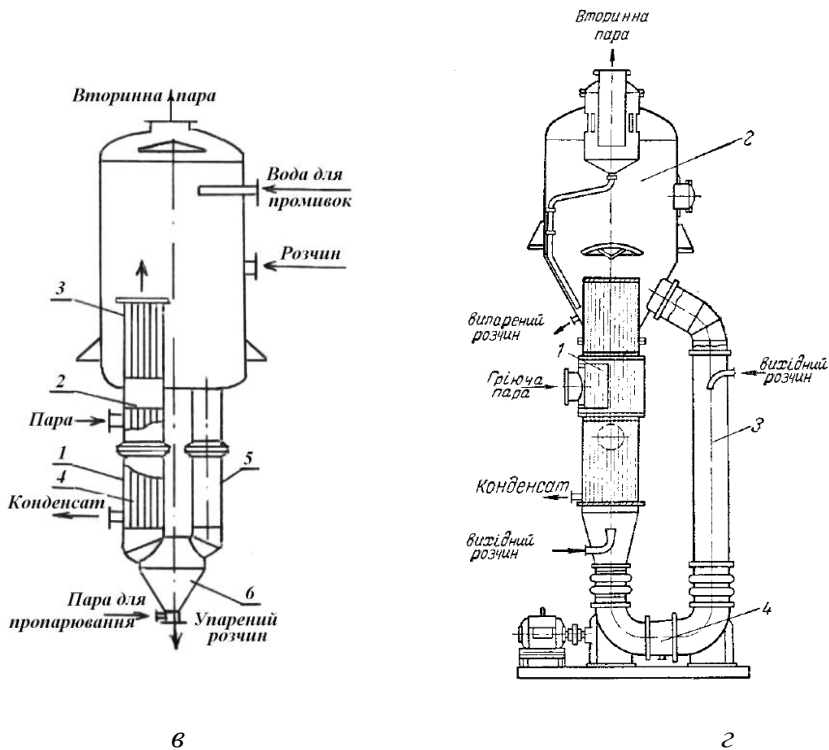


Рисунок. 3.1 – Типові конструкції випарних апаратів:

- а) із центральною циркуляційною трубою: 1 – корпус; 2 – кип'ятильні труби; 3 – трубні плити; 4 – відбійник; 5 – сепаратор; 6 - центральна циркуляційна труба; 7 – камера; 8 – кришка; 9 – вентиль; 10 – лапи;
- б) плівковий: 1 – нижня камера; 2 – труби; 3 – сепаратор із зігнутими лопатками; 4 – сітчастий сепаратор;
- в) із підсиленою природною циркуляцією: 1 – корпус; 2 – трубна решітка; 3 – перегородки; 4 – труби; 5 – циркуляційна труба; 6 - камери;
- г) з примусовою циркуляцією: 1 – нагрівальна камера; 2 – сепаратор; 3 – циркуляційна труба; 4 – циркуляційний насос

пузирів пари також мала, і рушійний напір, створений стовпом рідини, використовується для посилення (збільшення швидкості) циркуляції. Із збільшенням висоти перегородок

зростає висота киплячого шару, а отже, збільшуються рушійний натиск і швидкість циркуляції.

До апаратів із посиленою природною циркуляцією можна віднести і апарати з винесеною зоною кипіння. У таких апаратах відсутня циркуляційна труба. Над кип'ятильними трубками встановлюється циліндрова обичайка, усередині якої відбувається скипання розчину.

Випарні апарати з примусовою циркуляцією

Апарат складається із нагрівальної камери, циркуляційної труби, циркуляційного насоса, верхньої камери–сепаратора (рис. 3.1 з). У трубах нагрівальної камери рідина рухається зі швидкістю 2–3 м/с під тиском. Зона кипіння знаходиться біля верхнього кінця труби. Велика швидкість знижує відкладення на трубах (накип) і збільшує коефіцієнт тепловіддачі. У міжтрубному просторі має місце тепловіддача при конденсації, а в трубах – тепловіддача при примусовому кипінні рідини. Висока інтенсивність тепловіддачі дозволяє знизити поверхню нагрівання порівняно з апаратами із природною циркуляцією. Апарат застосовується головним чином при упарюванні в'язких рідин. Недолік – підвищені витрати потужності на привід циркуляційного насоса.

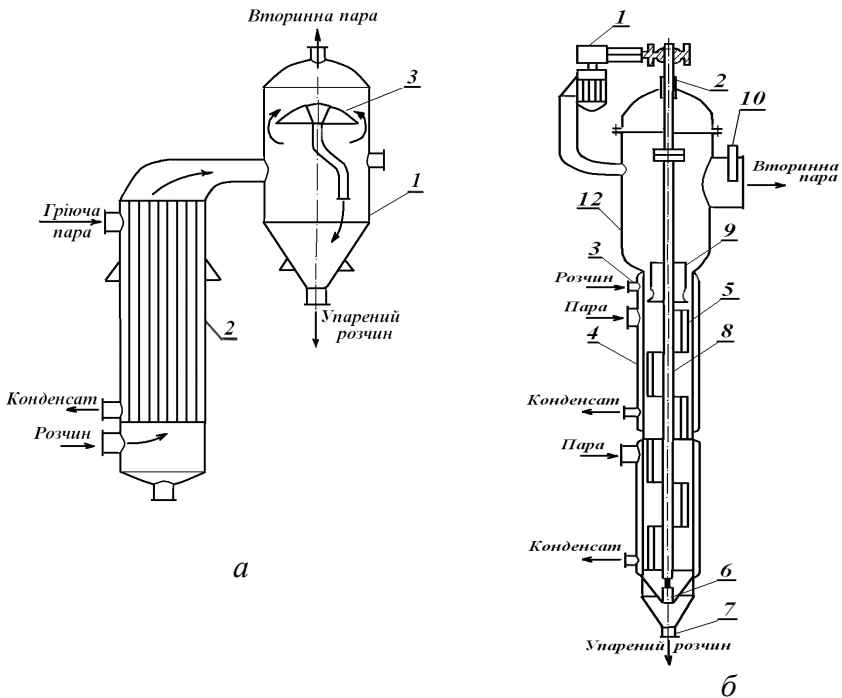
Випарні апарати із винесеною поверхнею нагрівання

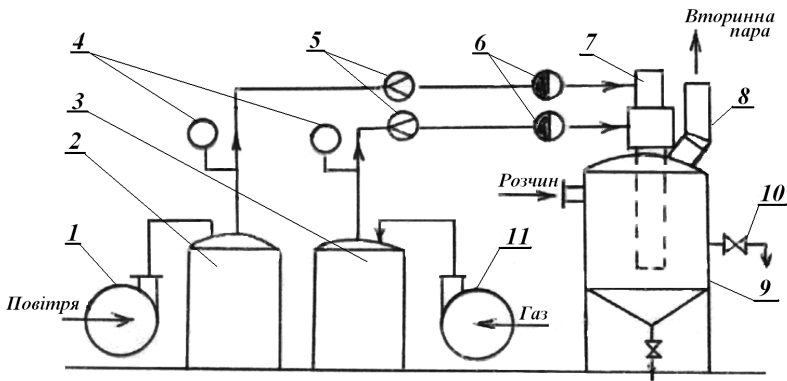
Такі апарати (рис. 3.2 а) застосовуються для випаровування пінистих розчинів. Розчин перегрівається в кип'ятильних трубах 2 і надходить у сепаратор 1, де скипає. Швидкість руху рідини різко знижується, процес скипання відбувається спокійно, що запобігає винесенню краплин рідини і піни з апарата. Для уловлювання дрібних краплинок встановлюється додатковий сепаратор 3. Кількість гріючих камер – одна або дві.

Роторний випарний апарат

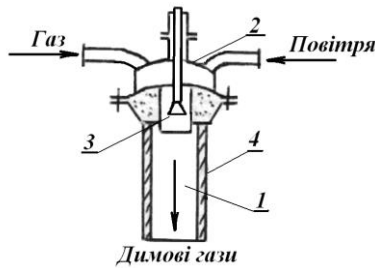
Застосовується для упарювання розчинів у тонкій плівці, особливо в'язких і термолабільних розчинів (рис. 3.2 б). Рідина подається насосом дозування у верхню частину апарата по патрубку 3 і тонкою плівкою стікає по внутрішній стінці циліндричного корпусу. Формування плівки здійснюється розподільником розчину 9. Гріюча пара подається в оболонку 4

апарата. Розчин захоплюється лопатками 5, розміщеними на валу 8, і відцентровою силою відштовхується до стінки корпусу. Паста, яка утворюється на стінках корпусу, знімається лопатками і потрапляє на дно, звідки вона видаляється з апарата через патрубок 7 і секторний затвор 6. Колова швидкість ротора 2–3,5 м/с. Апарат характеризується високою інтенсивністю тепловіддачі і малим перебуванням розчину в ньому (10–15 с), що підвищує якість продукту. Внизу вал закріплюється в опорному підшипнику, а вгорі він проходить через ущільнення 2. Вал обертається від привода 1. Недоліки: мала поверхня нагріву, а отже, і невелика продуктивність.





в



г

Рисунок. 3.2 – Типові конструкції випарних апаратів:

а) із винесеною поверхнею нагріву: 1 – корпус; 2 – циркуляційні труби; 3 – циркуляційний насос; 4 – відбійник;

б) роторний: 1 – привід; 2 – ущільнення; 3, 7 – патрубки; 4 – оболонка апарата;

5 – лопатки; 6 – секторний затвор; 8 – вал; 9 – розподільник розчину;

в) схема установки із заглибним пальником: 1 – насос; 2, 3 – ресивери;

4 – манометр; 5 – витратомір; 6 – зворотний клапан; 7 – пальник; 8 – труба для виведення вторинної пари; 9 – корпус випарного апарата; 10 – вентиль;

г) заглибний пальник: 1 – камера згоряння; 2 – камера змішування; 3 – запальник;

4 – вогнетривка футерівка

Випарні апарати із заглибним пальником

Випарні апарати з заглибним пальником застосовуються для випаровування сильно забруднених і накипоутворюючих рідин (рис. 3.2 в). Апарат являє собою циліндричний корпус із конічним днищем. Постійний рівень рідини в апараті підтримується зливною трубою 10. Під рівень рідини на певну глибину занурюється пальник 7. Пальники діаметром 50 мм занурюють на глибину 250 мм, діаметром 250 мм – на глибину 500 мм. Повітря стискається компресором 1 і через ресивер 2, який вирівнює тиск, подається через витратомір 5 і зворотний клапан 6 у камеру змішування пальника (рис. 3.2 г). Туди ж газодувкою 11 через ресивер, витратомір і зворотний клапан подається газ. Тиск повітря і газу вимірюється манометром 4. Занурення пальника проводять після розігрівання вогнетривких стінок камери. Димові гази барботують через розчин, нагрівають його і випаровують. Пара і відпрацьовані гази надходять у конденсатор або скруббер, де конденсуються і очищаються.

Випарні апарати з горизонтальним і похилим положенням гріючих камер

Випарний апарат із горизонтальним розташуванням гріючої камери (рис. 3.3 а) застосовується для випаровування концентрованих електролітичних лугів. Він має горизонтальний виносний кип'ятильник 1 з U – подібними трубами. Розчин подається в корпус сепаратора 2, входить у нижні труби, а випарений розчин виходить з верхніх труб. Циркуляція розчину обумовлена різницею гідростатичних напорів рідини на вході й виході в кип'ятильні труби. Упарений розчин з кристалами збирається у солевіддільнику 3. Коефіцієнт теплопередачі в такому апараті невеликий через товсті чавунні стінки труб. Кип'ятильник пересувається на колесах.

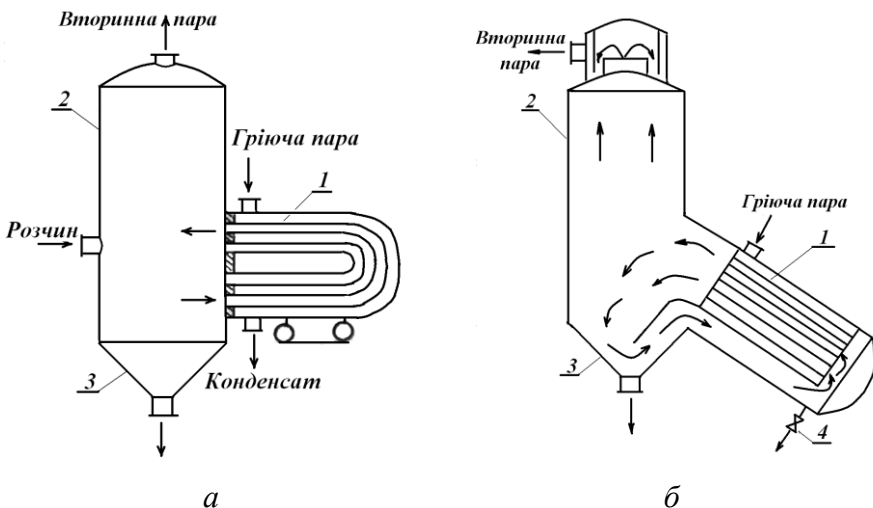


Рисунок 3.3 – Випарні апарати із горизонтальним (а) і похилим (б) розташуванням грійючих камер:

1 – грійюча камера; 2 – корпус; 3 – кінцічне днище

Для розчинів, що кристалізуються, застосовують і апарати з похилим виносним кип'ятильником (рис. 3.3 б). Він складається з грійючої камери 1, сепаратора 2, солевіддільника 3, продувального вентиля 4. Чищення і ремонт таких апаратів порівняно зручні.

3. Особливості конструкції випарного апарата у виробництві двоокису титану.

У вакуум-випарних установках підвищують концентрацію двоокису титану за рахунок інтенсивного випарювання води із розчинів титанілсульфату при їх підігріві до температури кипіння та дії вакууму. Для цього використовується випарний апарат з одним випарником-сепаратором та одним корпусом винесеної грійючої камери чи з двома випарниками-сепараторами, розміщеними по обидва боки корпусу грійючої камери. Вакуум-випарна установка, яка використовує останню конструкцію апарата, має вищу продуктивність за рахунок більшої площі поверхні киплячого розчину. Але монтаж апарата

потребує особливої точності щодо розміщення випарників на однаковому рівні, інакше якщо один із випарників буде розміщений нижче другого, то весь об'єм розчину буде переливатися у нього і установка буде працювати тільки однією стороною.

Висновок

Випарні апарати широко використовуються у хімічній промисловості для проведення теплових (випарювання) процесів і інтенсифікація процесу випарювання повинна полягати чи у модернізації гріючої камери апарата, чи створенні вакууму при випарюванні у тонкому шарі розчину (особливо при випарюванні термолабільних розчинів).

Питання для самоконтролю

1. Прокласифікуйте випарні апарати.
2. Будова та принцип дії випарних апаратів з природною циркуляцією.
3. Будова та принцип дії плівкових випарних апаратів.
4. Будова та принцип дії випарних апаратів із примусовою циркуляцією.
5. Будова та принцип дії випарних апаратів із винесеною поверхнею нагрівання.
6. Будова та принцип дії роторних випарних апаратів.
7. Будова та принцип дії випарних апаратів із заглибним пальником.
8. Будова та принцип дії випарних апаратів із горизонтальним та похилим положенням гріючих камер.

Тема 2. Печі

План

1. Загальні відомості.
2. Шахтні та обертові печі.
3. Печі киплячого шару.
4. Конструктивні особливості печей для випалу різних матеріалів.
5. Печі для випалу сірчаного колчедану та сірки.
6. Прожарювальна піч у виробництві двоокису титану.

Ключові терміни

режим випалу, шахтні печі, обертові печі, печі киплячого шару, газогенератори, поличні печі, барабанні печі.

1. Загальні відомості. Пічні установки служать для випалу різних сипких матеріалів, суспензій або виробів різноманітних форм і розмірів. Показником випалу є висока якість готового продукту, отриманого під впливом факторів, які називаються *режимом випалу*. Під режимом випалу розуміють сукупність температурних і аеродинамічних умов, тривалості випалу, а також характеру газового середовища, де відбувається випал. Розрізняють температурний і аеродинамічний режими випалу.

Температурний режим визначається швидкістю підймання температури до максимального, часом витримки матеріалу при максимальній температурі і швидкістю його охолодження. Наочне уявлення про температурний режим дає крива випалу.

Аеродинамічний режим печі характеризується статичним тиском у робочій порожнині. Нерівномірний розподіл тиску або розрідження приводить до різної швидкості руху газу навколо випалювального матеріалу і нерівномірного нагрівання виробів. Особливо негативно це позначається для великогабаритних виробів.

Склад газового середовища може бути окисним, якщо в газах наявний вільний кисень і відновлений за наявності водню H_2 , окису вуглецю CO , вуглецю C у вигляді сажі і нейтральним

за відсутності H_2 , CO , O_2 . Більшість кускових матеріалів – гіпс, вапно, цементний клінкер, глина, шамот обпікаються при різних режимах (високі швидкості підймання і зниження температури). Вирішальним фактором є тривалість витримки. Важлива також повільна швидкість підймання і зниження температури. При оптимальному режимі забезпечується одержання продукту високої якості.

До техніко-економічних показників роботи печі відносять:

а) продуктивність – кількість продукту, який виробляється за одиницю часу; б) витрату палива на одиницю продукції;

в) витрату електроенергії (кВт·год.) на випал одиниці продукції;

г) витрату праці на обслуговування печі – відношення людино-годин до кількості готової продукції;

д) капітальні витрати, пов'язані з вартістю матеріалів на спорудження печі.

2. Шахтні та обертові печі

Розвантажувальний пристрій (3.4 б) для вивантаження випаленого матеріалу складається з каретки – платформи 6, на рамі якої покладені колосники 8 клинчастої форми. Рама розміщена на опорних катках 4, а вони – на рейкових балках 5. Усі елементи пристрою змонтовані у камері 1. Стовп матеріалу спирається на центральний гребінь і колосники, які охолоджуються висхідним потоком повітря. Каретка за допомогою гідроприводу 3 і штанги 2 робить зворотно-поступальний рух, при цьому матеріал провалюється через колосники у бункер 7. У нижній частині бункера розміщений шлюзовий ущільнювальний пристрій.

Матеріали, що випалюються в шахтних печах, залежно від режиму випалювання поділяються на дві групи: низько - і високотемпературного випалу. До першої відносять: будівельний гіпс, низькопалений шамот $t = 500 - 900^\circ C$; до другої – вапно, високопалений шамот, цементний клінкер $t = 1200 - 1500^\circ C$. У печах низькотемпературного випалу встановлюють топки для спалювання газу і наступної його

подачі в зону випалу. У високотемпературних печах паливо спалюють у печі (пересипні печі). Паливо: кокс, вугілля, газ, мазут. Газоподібне паливо спалюють у пальниках, змонтованих у стінках шахти в зоні випалу. При спалюванні мазуту в поясі зони випалу є форкамери для газифікації мазуту.

При роботі печі у її верхній частині розміщується зона підігріву, за нею – зона випалу і потім – зона охолодження.

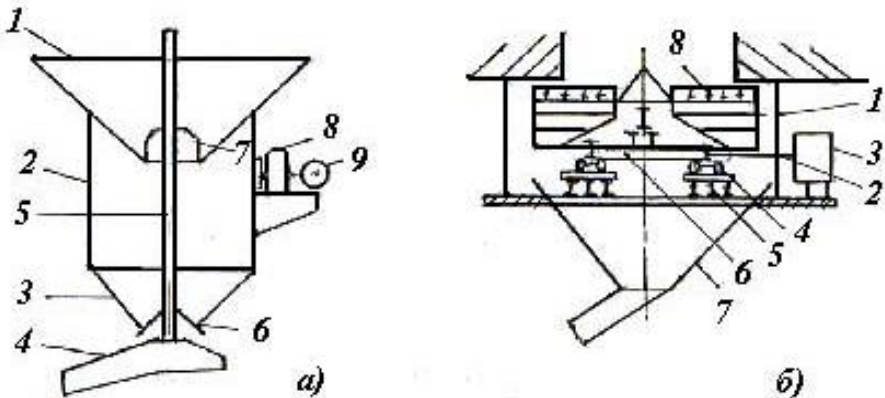


Рисунок 3.4 – Пристрої шахтної печі:

а) завантажувальний: 1 – верхній приймальний конус; 2 – циліндрична частина; 3 – конусна частина; 4 – відбійна пластина; 5 – шток; 6 – нижній клапан; 7 – верхній клапан; 8 – редуктор; 9 – електродвигу;

б) вивантажувальний: 1 – камера; 2 – штанга; 3 – гідропривід; 4 – опорні катки; 5 – рейкові балки; 6 – каретка; 7 – бункер; 8 – колосники

Аеродинамічний режим забезпечується тягодуттьовими пристроями. Зона підігріву поєднується з димососом, тому вона працює під розрідженням, яке зменшується до зони випалу. Нижня частина шахти – зона охолодження – знаходиться під тиском, оскільки в неї дуттьовим вентилятором нагнітають повітря.

Обертіві печі. Це печі безперервної дії. Являють собою сталевий обертовий барабан, установлений на опорах під кутом $3-4^{\circ}$ до горизонту. Барабан виконує функції транспортера і печі. Завдяки нахилу й обертанню сирий матеріал у вигляді шматків, порошку або суспензії рухається до протилежного кінця, поступово нагрівається, обпікається і вивантажується в холодильник для охолодження.

Корпус печі виконується з металевих обичайок – кілець, що з'єднуються зварюванням, та виготовлених із листової сталі товщиною $\delta = 30 - 50$ мм. У місцях встановлення опор на корпус наварюються литі сталеві кільця шириною $800 - 1300$ мм і $\delta = 350 - 400$ мм, які називаються *бандажами*. Бандажі спираються на опорні ролики.

Опори барабана – ролики. Осі роликів встановлені в підшипники, розміщені на рамі, що закріплюється на бетонному фундаменті. У комплект роликів, крім опорних, входять і упорні ролики, що обмежують поздовжнє пересування барабана. У печах довжиною $150-185$ м, діаметр опорних роликів $d_p=1400 - 1700$ мм, число опор – $7 - 8$.

Обертання барабана здійснюється за допомогою вінцевої шестірні, з'єднаної через редуктор з електродвигуном.

Верхнім кінцем барабана піч входить у курну камеру, нижнім – у відкотну головку. Ущільнення між корпусом печі і головкою являє собою лабіринтові затвори. Пилова камера – це висока цегельна шахта, через яку в піч подається матеріал по похилій точці. У нижній частині шахти є отвір для виходу газів через пилеосаджувач. Гази відсмоктуються димососом. Відкатна головка являє собою пустотілий циліндр, установлений на візку. По осі циліндра на торцевій кришці розміщується форсунка для подачі палива.

Холодильники служать для охолодження готового продукту. Поширені два типи холодильників: колосниковий і барабанний. У колосниковому перештовхувальному холодильнику у корпусі встановлюється кілька рядів рухомих і нерухомих решіток-колосників, що чергуються. Рухомі мають зворотно-поступальний рух. Гарячий клінкер із печі надходить на верхні

решітки, а потім, перештовхуючись колосниками уперед, сповзає на нижню. Простір під решітками розділено на дві частини глухою перегородкою. Повітря подається під колосники, проходить через шар клінкера і охолоджує його. Внутрішньобарабанні холодильники являють собою завіси із ланцюгів.

Футерівка печі служить для захисту корпусу від руйнування. Вона піддається впливові високих температур, а розплав шихти і продукти горіння здійснюють на неї хімічний вплив. Матеріал футерівки повинен бути високовогнетривким, термічно і хімічно стійким, механічно міцним. Для захисту футерівки використовують обмазку з випалювального матеріалу. В обмазку додаються солі Ca, Mg, Na. У зонах із високою температурою встановлюють внутрішні теплообмінні пристрої. Вони складаються зі зміщених один відносно одного на 8° металевих полиць, що створює гвинтоподібний рух матеріалу.

Підготовчі процеси, що передують випалові, можуть бути винесені за межі барабана у спеціальні установки: конвеєрні решітки і групи циклонів – теплообмінників. У них відбуваються підігрів, підсушування і часткова декарбонізація. Решітки складаються із шарнірно з'єднаних сталевих ланок, що утворюють нескінченну стрічку шириною 3 – 4 мм і довжиною 15 – 25 м.

3. Печі киплячого шару

У таких печах матеріал випалюється в потоці гарячих газів, при цьому частини матеріалу витають у потоці, утворюючи «киплячий» чи інакше «псевдозріджений» шар. Температура теплоносія наближається до теоретичної температури випалювання. Установки можуть працювати періодично і безперервно, вони можуть бути одно- і багатоканальними. Основний елемент установки – робочі камери, де матеріал випалюється. Теплота до матеріалу підводиться двома способами: при безпосередньому спалюванні палива в шарі матеріалу або підведенні за рахунок потоку гарячих газів, отриманих при спалюванні палива в топці. Перший застосовують при високотемпературному випалі.

Піч для випалу киплячого шару – двокамерна (рис. 3.5 а), складається з камер 6 і 7, циліндричної форми із зовнішнім перехідником 9 для перетікання матеріалу з верхньої камери в нижню через шлюзовий затвор 2. Вихідний матеріал (наприклад, глина) подається у верхню камеру через живильник 3. У верхній камері 7 глина сушиться, у нижній 6 – дегідратується при випалюванні. Зона охолодження винесена у спеціальний холодильник 4 також киплячого шару. Нагріте повітря з холодильника використовують у камері для підсушування випалюваного матеріалу. Гарячі гази, що утворюються у топці 1, йдуть під решітки 8. Продуктивність становить 3 т/год. Швидкість теплоносія у зонах дегідратації 0,66 м/с, підсушування – 0,9 м/с; у холодильнику – 0,95 м/с. Температура під решітками $t = 1150$ °С, у зоні дегідратації $t = 650$ °С, зоні підсушування $t = 190$ °С, у холодильнику $t = 450$ °С. Витрата палива становить 48 кг/год.

Випалювальна піч трьохзонна схематично зображена на рис.3.5 б. Внутрішній діаметр камери: у зоні випалювання становить 2,75 м, термопідготовки – 3,05 м. Зони розділені шамотними газорозподільними решітками з отворами $d_0=60$ мм. Вапняк надходить із частинами розміром 3 – 10 мм, підсушений і підігрітий. Перетікальмини пристроями 1 він переходить із зони в зону.

Перша зона термопідготовки $t_1 = 600 - 650$ °С; друга зона $t_2 = 700 - 750$ °С. Газ із повітрям надходить у пальники 8 і горіння факела відбувається в киплячому шарі випалюваного матеріалу. Обпалений матеріал надходить у холодильник 2. Для проміжного очищення газів використовується циклон 9. Продуктивність 300 т/добу, питома витрата палива 0,23 т/т випалюваного продукту.

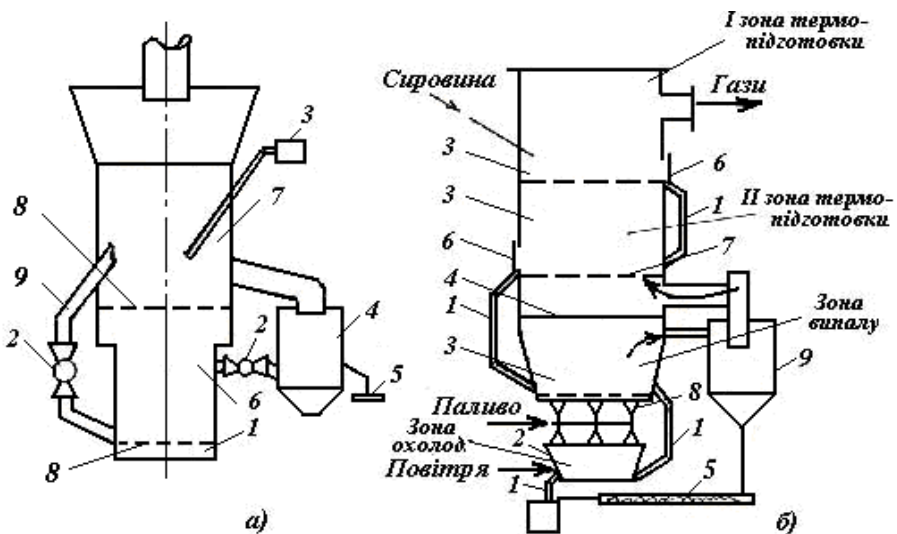


Рисунок 3.5 – Печі для випалу в киплячому шарі:

а) двокамерна для одержання дегідратованої глини: 1 – топка; 2 – шлюзовий затвор; 3 – живильник; 4 – холодильник; 5 – транспортер; 6 – нижня камера; 7 – верхня камера; 8 – решітки; 9 – перехідник;

б) трizonна вапняновипалювальна: 1 – перевантажувальні пристрої; 2 – холодильник; 3 – камери; 4 – суцільна перегородка; 5 – транспортер; 6 – люк; 7 – газорозподільні решітки; 8 – палик; 9 – циклон

4. Конструктивні особливості печей для випалу різних матеріалів

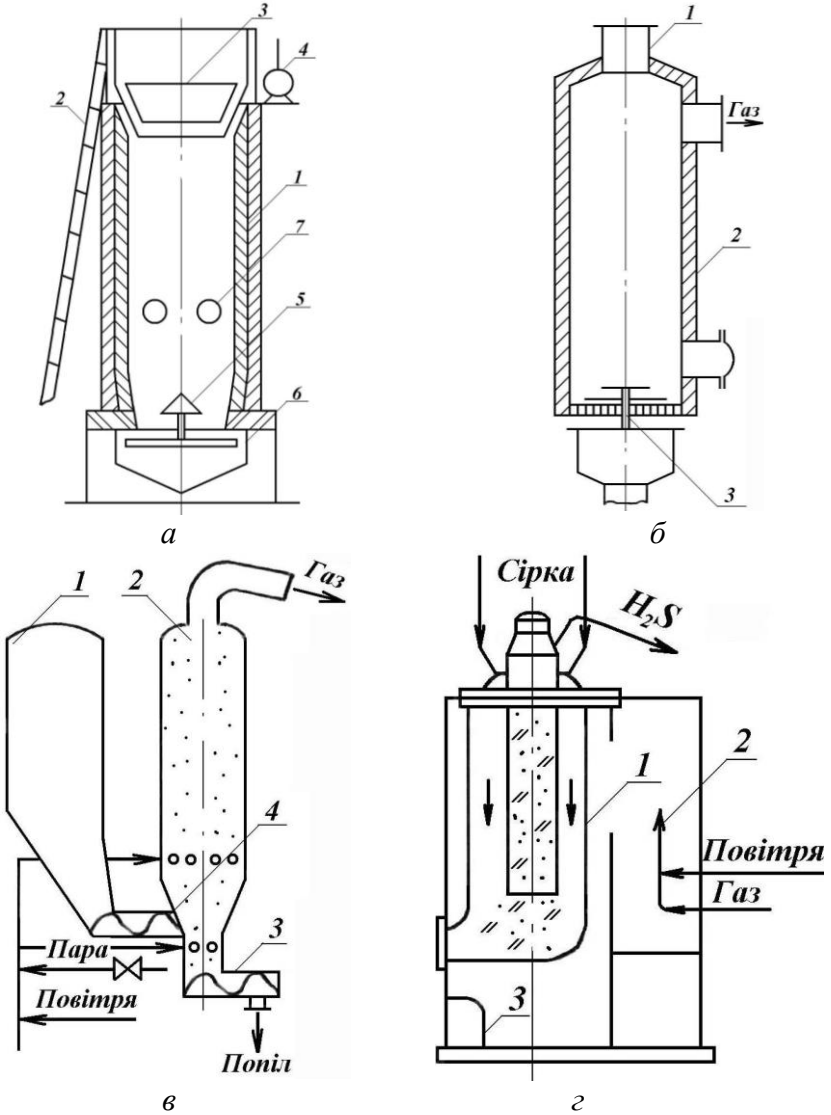
Апарати цієї групи призначені для проведення процесів випалу вапняку, гіпсу, соди, піриту, газифікації твердих палив. Ці процеси, як правило, проводяться при високій температурі й потребують підведення або відведення великої кількості теплоти. У зв'язку з цим такі апарати називають печами. Газ може бути реагентом, паливом і теплоносієм.

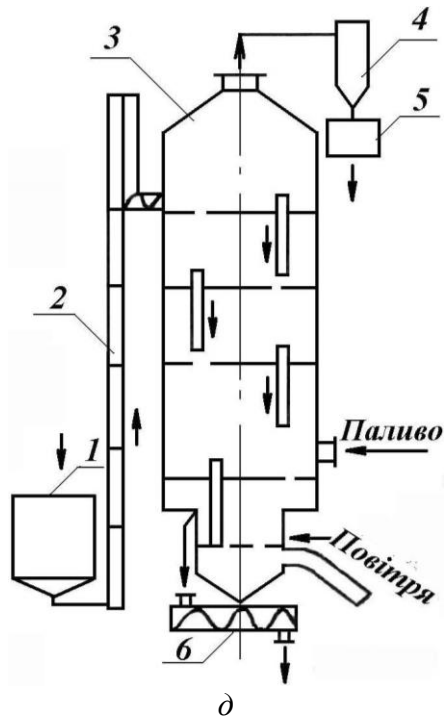
Основні типи пічних апаратів: вертикальні циліндричні печі (шахтні печі й газогенератори), поличні обпалювальні печі; барабанні печі, що обертаються; печі із псевдозрідженим шаром. Рідше використовують періодично діючі апарати із зовнішнім обігрівом (ретортні печі) і з горизонтальним механічним переміщенням шару на ланцюгових колосникових решітках.

Шахтні печі. До апаратів цього типу належать: доменна піч, піч випалення магнезиту, доломіту та ін. матеріалів. Шахтна піч для випалення вапняку складається з вертикального циліндричного корпусу 1 зі стінками з вогнетривкого матеріалу (рис. 3.6 а). Шихта (шматки сировини із твердим паливом) скіповим підйомником 2 (бункер, що підіймається й опускається тросом по рейках) подається у завантажувальний пристрій печі 3, а з нього шихта поступово заповнює весь об'єм печі. Тепло для випалення виділяється при спалюванні рідкого або газоподібного палива в пальниках 7 або твердого палива, перемішаного з вапняком. Тягу забезпечує газодувка 4 (димосос). Зовнішня оболонка печі виготовлена з листової сталі. Робочі зони печі розміщені зверху вниз: зона сушіння і нагрівання матеріалу розміщена під завантажувальним пристроєм. Матеріал нагрівається до 400-500 °С. Під зоною підігріву розміщена зона випалення, де температура становить 600-1200 °С, у ній відбувається виділення CO_2 з вапняку. Під зоною випалення розміщується зона охолодження CaO і нагрівання повітря до 500 °С. Температура сталеві оболонки не перевищує 100 °С.

Газогенератори. Призначення – газифікація вуглецевмісних твердих палив для отримання горючого газу, що складається в основному з елементів C , H і продуктів сухої перегонки. Газифікації піддають кам'яне і буре вугілля, горючі сланці, торф, деревину і відходи сільського господарства. Горючий газ використовують як паливо в металургії для виплавлення сталі в мартенівських печах, у виробництві скла, у двигунах внутрішнього згорання і як сировина в хімічній промисловості.

Газогенератор (рис. 3.6 б) має вертикальний циліндричний сталевий кожух 2, футерований зсередини вогнетривкою і звичною цеглою. Паливо завантажують зверху через отвір 1 із герметичним затвором. Зола (шлак) із газогенератора видаляється колосниковою решіткою 3, що обертається.





- Рисунки 3.6 – Апарати для реакцій між газом і твердою речовиною:
- а) шахтна вапняно-випалювальна піч: 1 – корпус; 2 – підйомник; 3 – завантажувальний пристрій; 4 – газодувка; 5, 7 – пальники; 6 – бункер для вапна;
 - б) газогенератор для отримання водяного газу: 1 – отвір із герметичним затвором; 2 – кожух; 3 – колосникова решітка;
 - в) газогенератор Вінклера: 1 – бункер; 2 – газогенератор; 4 – шнек;
 - г) піч-реактор для виробництва сірковуглецю: 1 – реторта; 2 – газовий пальник; 3 – димар;
 - д) піч для випалювання вапняку: 1 – бункер; 2 – елеватор; 3 – реактор; 4 – циклон; 5 – пилосбірник

Аналогічно сконструйований газогенератор Лургі, в якому газифікують паливо під тиском 1,5 – 3 МПа. Корпус апарата має подвійні стінки, які утворюють водяну оболонку. Тиск води в оболонці більший, ніж у газогенераторі. Зсередини шахта

апарата викладена вогнетривкою цеглою. Паливо подається зверху через шлюзовий пристрій, де підігрівається за допомогою пароводяної оболонки. Парокиснева суміш надходить знизу, частина пари надходить з оболонки. Зола викидається колосниковою решіткою, що обертається, через спеціальний штуцер і шлюз.

У газогенераторі Вінклера використовується псевдозріджений шар (рис. 3.6 в). Він дозволяє проводити реакції в інтенсивному режимі з гарним виходом цільового продукту. Дрібнозернистість шару забезпечує розвинену поверхню контакту між газом і твердою речовиною. Реакція проходить при сталій температурі і концентраціях речовин. Разом із тим у таких апаратах спостерігається велике віднесення пилу, що спричиняє стирання стінок апарата і вимагає установки пилоочисного устаткування. У газогенераторі 2 подрібнене паливо з бункера 1 шнеком 4 подається в нижню частину апарата, де проходить газифікація. Витання частинок відбувається в пароповітряному потоці. Зола вивантажується шнеком 3, розміщеним внизу установки, а газ – із верхньої частини апарата. Апарат працює при тиску, близькому до атмосферного. За продуктивністю він удвічі перевершує газогенератор Лургі. В область над шаром подається вторинний кисень, що підвищує температуру і сприяє розкладанню метану. Недоліки – споживання великої кількості кисню і значне винесення пилу.

Піч для випалення вапняку зображена на рис. 3.6 г. Випалення проводиться у псевдозрідженому шарі. Реактор 3 має сталевий корпус, футерований зсередини вогнетривким матеріалом, і розділений горизонтальними перегородками на кілька секцій. У перегородках є отвори для проходження газу і зливні щілини, через які рухається вапняк. Паливо насосом подається у другу секцію і спалюється, створюючи температуру 870 – 950 °С, достатню для випалення. Продукт охолоджується повітрям, що подається вентилятором у першу секцію, і шнековим конвеєром 6 видаляється з печі. Вапняк у роздробленому вигляді (розмір шматків 0,25 – 3,5 мм) з бункера 1 піднімається елеватором 2 і

вводиться в реактор зверху. Дрібні частинки з потоку газу вловлюються у циклоні 4 і надходять у пилозбірник 5.

Реактори-печі з ретортами (рис. 3.6 д) обігріваються ззовні. У реакторі для отримання сірковуглецю пари сірки при $t = 900 - 1000$ °С реагують із деревним вугіллям. Реторта 1 еліптичного перерізу захищена від корозійної дії пари сірки вогнетривкою кладкою і нагрівається зовні топковими газами від газового пальника 2 до температури 850 °С. Відпрацьовані газы надходять у димар 3. Розплавлену сірку вводять через трубопровід в реторту, де сірка випаровується при контакті з нагрітими стінками. Підіймаючись через шар вугілля, пари сірки реагують із ним. Сірковуглець відводиться з верхньої частини реактора. Завантаження реактора вугіллям ведеться періодично.

5. Печі для випалу сірчаного колчедану та сірки

Полічні (подові) печі (рис. 3.7) використовуються у виробництві сірчаної кислоти для випалення піриту (сірчаного колчедану).

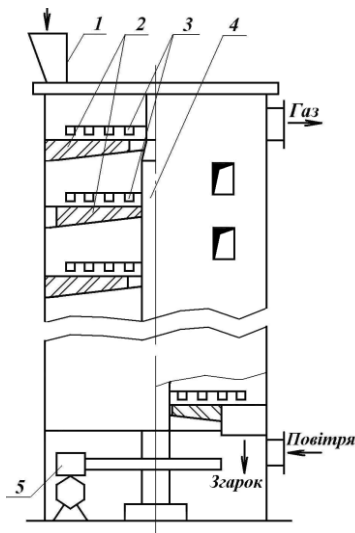


Рисунок 3.7 – Полічна піч для випалювання сірчаного колчедану:
1 – бункер для матеріалу; 2 – полиці; 3 – гребки; 4 – порожній вал; 5 – зубчаста передача

Піч складається з вертикального циліндричного корпусу з рядом горизонтальних полиць 2, футерованих цеглою. Полиці мають вікна, через які матеріал пересипається з полиці на полицю. Робочих подів вісім, на семи подах проводиться випалення колчедану, а на одному, сушильному, підсушування продукту. На верхню полицю матеріал подається з бункера 1, по ній він переміщається гребками 3 із похилими лопатками, які приводяться в обертання порожнім валом 4. Вал обертається від зубчастої передачі 5. Під нижнім подом розміщені повітряні клапани для подачі гарячого повітря з температурою згорання частинок сірчаного колчедану, що дозується так, щоб вміст кисню у суміші із сірчистим газом був достатній для реакції. Протитечією до матеріалу надходять випалювальні гази із температурою на гарячих подах 800 – 900 °С. Поличні печі були замінені на печі із псевдозрідженим шаром.

Піч псевдозрідженого (киплячого) шару для випалення піриту зображена на рис. 3.8. Випалення сірчаного колчедану (піриту) проводиться у псевдозрідженому шарі.

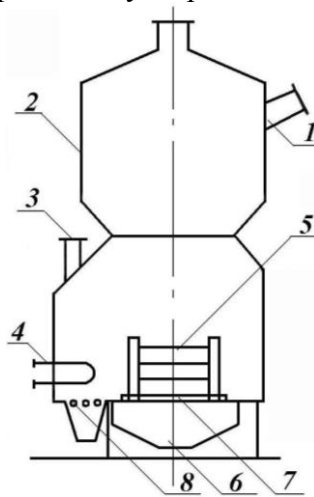


Рисунок 3.8 – Піч псевдозрідженого (киплячого) шару для випалювання піриту:

1,3 – штуцери; 2 – корпус; 4,5 – змійовики; 6 – камера; 7 – решітка
8 – колосникова решітка

Сталевий корпус 2 футерований зсередини шамотною цеглою або жаротривким бетоном. Матеріал через штуцер 3 завантажується у форкамеру (нижня частина печі), яка захищає подову решітку 7 від забивання великими шматками колчедану і недогарка, що спікся. Під печі складається з безпровальної решітки 7, що частково заходить у форкамеру, і колосникової решітки 8, під якою розміщений бункер для недогарка. Повітря для псевдозрідження подається в камеру 6. У перетискній частині печі розміщений колектор для подачі вторинного повітря над киплячим шаром, а також газові форсунки для здійснення процесу випалювання. Випалювальний газ із температурою близько 700 – 800 °С відводиться через штуцер 1. Відведення теплоти проводиться через змійовики 4 і 5. Гарячий газ після печі подається на утилізатор, а після нього – на пилоочисники і на електрофільтри.

Окрім розглянутих конструкцій печей для випалення пилоподібного сірчаного колчедану, використовується *порожниста (камерна) піч*, яка являє собою вертикальний циліндричний корпус, футерований зсередини вогнетривкою цеглою. Діаметр корпусу досягає 4 м, висота 10 м. Пилоподібний колчедан подається через пневматичну форсунку у робочий простір печі, куди також подається гаряче (при температурі згорання частинок) повітря. Частинки сірчаного колчедану згорають та утворюють випалювальні гази із температурою 900 – 950 °С. Особливістю таких печей є відсутність обертових частин та газорозподільної решітки та невеликий час процесу випалення.

Також для випалення пилоподібного сірчаного колчедану використовується *циклонна піч*, яка збільшує швидкість випалення частинок колчедану за рахунок підвищення температури згорання частинок до 100-1200 °С.

Для згорання рідкої сірки використовуються *форсункові та циклонні форкамерні печі*. Перша являє собою горизонтальний циліндричний корпус, футерований зсередини вогнетривкою цеглою. Діаметр корпусу досягає 3,4 м, довжина 10,5 м. Піч має газові форсунки для здійснення процесу випалювання ,

форсунки для подачі розплавленої сірки та вторинного повітря. Друга піч також являє собою горизонтальний циліндричний корпус, футерований зсередини вогнетривкою цеглою. Діаметр корпусу досягає 1,5 м. Форсунки для подачі газу згорання, розплавленої сірки та вторинного повітря розміщені по дотичній до поверхні корпусу, що обумовлює тангенціальне введення потоків і, таким чином, високу інтенсивність процесу згорання сірки.

6. Прожарювальна піч у виробництві двоокису титану

Основною частиною таких печей є довгий барабан із листової сталі, що обертається. Він розміщений із нахилом 1° до горизонталі, забезпечений бандажами і привідним зубчастим колесом, спирається на роликову опорно-упорну станцію. Частота обертання барабана 0,1 – 0,2 об/хв. Довжина барабана становить до 40 м, діаметр – до 2,8 м. Коефіцієнт заповнення об'єму печі матеріалом становить 8 – 9 % для пасти вологістю близько 60 %. Час прожарювання пасти у печі становить 12-14 годин.

Паста гідратованого двоокису титану завантажується через живильник у верхній кінець барабана і переміщається до нижнього кінця, з якого вивантажується. Топковий газ із температурою 1000 – 1100 $^{\circ}\text{C}$ рухається протитечією до матеріалу. По обох кінцях є пристрої для ущільнення. Барабан зсередини футерують вогнетривкою цеглою. Після печі газ очищається у пилоочисниках. Барабан виготовляють із жароміцної сталі.

Недоліки – тривалість встановлення робочого режиму, висока вартість ремонту, громіздкість.

Висновок

Печі широко використовуються у хімічній промисловості для проведення теплових процесів випалювання твердої сировини та спалювання твердого палива, і інтенсифікація технологічного процесу у печах повинна полягати чи у модернізації конструктивних узлів печі, чи створення активного

аеродинамічного режиму, у результаті чого значно знижується час технологічної обробки .

Питання для самоконтролю

1. Що називається режимом випалу?
2. Що визначає температурний режим печі?
3. Що визначає аеродинамічний режим печі?
4. Якими показниками характеризується піч?
5. Будова та принцип дії шахтної печі.
6. Будова та принцип дії обертової печі.
7. Будова та принцип дії печі киплячого шару.
8. Будова та принцип дії газогенераторів.
9. Будова та принцип дії поличної (подової) печі.
10. Будова та принцип дії барабанної печі.
11. Будова та принцип дії реактора – печі.

Розділ 4. Обладнання для масообмінних процесів

Тема 1. Сушильні установки

План

1. Призначення і класифікація апаратів.
2. Типові конструкції сушарок.
3. Особливості використання барабанної сушарки у виробництві фосфорних мінеральних добрив.
4. Особливості використання сушарок у виробництві двоокису титану.

Ключові терміни

тунельні сушарки, стрічкові сушарки, вальцестрічкова сушарка, петльові сушарки, сушарки із киплячим шаром, вихрові сушарки, барабанні сушарки, розпилювальні сушарки, аерофонтанні сушарки, труба-сушарка, барабанна роторна вакуумна сушарка, одновальцева сушарка.

1. Призначення і класифікація апаратів

Сушарки хімічної промисловості класифікують за способом підведення теплоти до матеріалу:

- **конвективні** (для сушіння сипких матеріалів), їхній обсяг становить близько 40 %; сюди ж належать сушарки, які працюють у режимі псевдозрідженого і фонтануючого шарів ($\approx 25\%$), і такі, де сушіння ведеться в режимі пневмотранспорту, і розпилювальні сушарки ($\approx 10\%$) для сушіння сипких і пастоподібних матеріалів ($\approx 7\%$);

- **кондуктивні (контактні)** – до них належать поличні, барабанні, обертові, вальцеві. Застосовуються для сушіння матеріалів, для яких недопустимий контакт із теплоносієм (поличні вакуумно–сушильні шафи, вакуумні для сушіння термочутливих матеріалів), видалення органічних розчинів, токсичних і легкозаймистих речовин, коли необхідна герметизація процесу; вальцеві використовують для сушіння пастоподібних продуктів із великою початковою вогкістю;

- **спеціальні: терморадіаційні** використовують для сушіння тонколистового матеріалу і лакофарбових покриттів, вони потребують великої витрати енергії; **високочастотні**

використовують для сушіння матеріалів у товстих шарах; *сублімаційні* використовують для сушіння матеріалів при низьких температурах.

Конвективні апарати для сушіння в шарі поділяються на апарати безперервної дії – тунельні, стрічкові, петлеві, шахтні, барабанні, киплячого шару і періодичної дії – камерні, поличні.

2. Типові конструкції сушарок

2.1. Конвективні сушарки

Тунельні сушарки. У таких сушарках (рис. 4.1 а) матеріал у вагонетках і візках 1 переміщається по тунелю (сушильній камері). Довжина тунелю 25–60 м, висота 2–2,5 м. Паралельно осі тунелю або перпендикулярно до неї циркулює сушильний агент (повітря, топкові гази, пара). Вентилятор 3, що працює від привода 4, подає повітря через калорифер 2 у тунель. Тепле повітря насичується вологою, матеріал висушується. Відпрацьоване повітря видаляється з тунелю вентилятором 5. Вагонетки зачочуються в камеру штовхачем через двері 6. З метою запобігання розшаруванню повітря по висоті і нерівномірності сушіння тунель розбивають на зони. На перекриттях камери встановлюють опалювально-вентиляційні агрегати. Вони створюють вертикальну циркуляцію повітря. Швидкість теплоносія 2–3 м/с, час сушіння – до 200 год. Розміри сушарки визначаються тривалістю сушіння і розмірами вагонеток.

Стрічкові сушарки. Призначені для сушіння штучних виробів, напівфабрикатів і сипких матеріалів, окрім тонкодисперсних. У прямокутній камері один над одним розмішуються кілька стрічкових конвеєрів, несучим полотном у яких є металева сітка, перфоровані пластини, прогумована стрічка і т. ін. Матеріал, що висушується, насипаний на полотно. У сушарках із суцільною стрічкою теплоносій рухається над матеріалом у напрямку, протилежному руху стрічки.

Вальцестрічкова сушарка (рис. 4.1 б) застосовується для сушіння пастоподібних матеріалів. Паста надходить із бункера 2 і прес-валом 1 упресовується в кільцеві канали трапецеїдального

профілю, що розміщені на сушильному валику 3. Валик і пресвал обігріваються парою. За один оберт валика паста підсушується і ножем 4 у формі гребінки знімається на конвеєр 5, а потім на – конвеєр стрічкової сушарки 6.

Одноярусна стрічкова сушарка (рис. 4.1 в). У багатосекційній (на рис. 4.1 – п'ятисекційній) сушарці матеріал транспортується конвеєром 1. Повітря нагрівається в паровому калорифері 4 і відцентровим вентилятором 5 подається в розподільний канал 7 (в), проходить через шар матеріалу 3 зверху вниз і через вікна повертається на рециркуляцію в камеру 8. Частина відпрацьованого повітря відводиться вентилятором 6, а свіже повітря підсмоктується через вікна (б). Для вирівнювання вологості матеріалу по висоті встановлені перегрівачі 2 (валики з пальцями).

Петльові сушарки. Застосовуються при сушінні тонких гнучких матеріалів (плівки, папір, тканини), а також для сушіння паст хімічно осадженої крейди, барвників та ін. (рис. 4.1 з). Усередині прямокутної сушильної камери проходить сталева нескінченна стрічка 4 з металевої сітки із глибиною комірок 10 – 15 мм. Паста з бункера живильника 1 потрапляє на валики 2, які обігріваються парою і вдавлюють матеріал у комірки стрічки. Пройшовши напрямний барабан 3, стрічка надходить у камеру і утворює петлі завдяки закріпленню на ній поперечним планкам, що спираються на розміщений у верхній частині ланцюговий конвеєр 5. Далі роликом 6 стрічка підводиться до ударного пристрою 7, і сухий продукт із комірок струшується в бункер, звідки шнеком 8 виводиться із сушарки. Сушильний агент рухається перпендикулярно до стрічки, процес досить інтенсивний, оскільки матеріал сушиться з двох боків у шарі невеликої товщини.

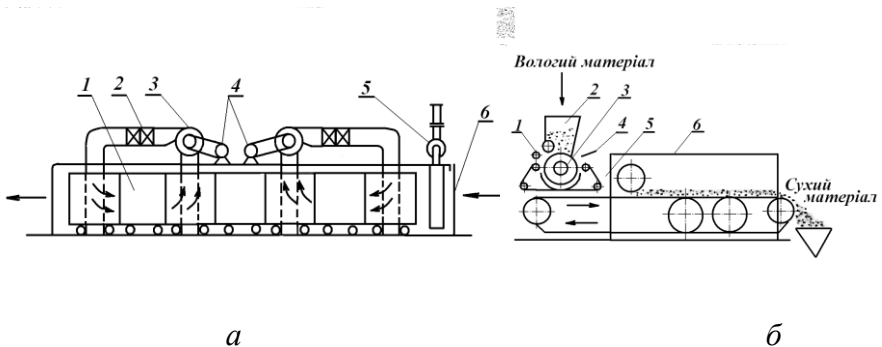
Загальними недоліками стрічкових, вальцестрічкових і петльових сушарок є громіздкість, складність обслуговування, перекося стрічки.

Сушарки з киплячим шаром. Призначені для сушіння зерноподібних продуктів із розмірами зерен від 0,1 до 5 мм (сульфіт амонію, хлористий калій, вініфлекс та ін.) (рис. 4.1 д).

Матеріал через бункер 4 подається на похилу решітку 1, яка може коливатися від вібратора 5. Повітря через отвори решітки піднімає зерна, вони витають у потоці і висушуються. Відпрацьоване повітря через щілини надходить у патрубок 3 і виводиться із сушарки. Матеріал виходить через патрубок 2 і частково через патрубок 6. У промисловості використовуються сушарки з кількома камерами. Різновидом таких сушарок є *вихрові сушарки*. За рахунок збільшення поверхні контакту між теплоносієм і матеріалом та відведення вологи процес сушіння інтенсифікується. Можна проводити сушіння і випалення, сушіння і грануляцію. Сушарки можуть бути одно- і багатосекційними.

При малій швидкості сушильного агента (гарячого повітря) матеріал на решітках лежить щільним шаром. Із збільшенням подачі повітря спостерігається вузька область швидкостей, у межах якої шар розбухає, але залишається нерухомим, а потім, після переходу через критичну швидкість, псевдозрідження переходить у стан кипіння.

Псевдозрідження характеризується другою критичною швидкістю, після якої настає режим пневмотранспорту.



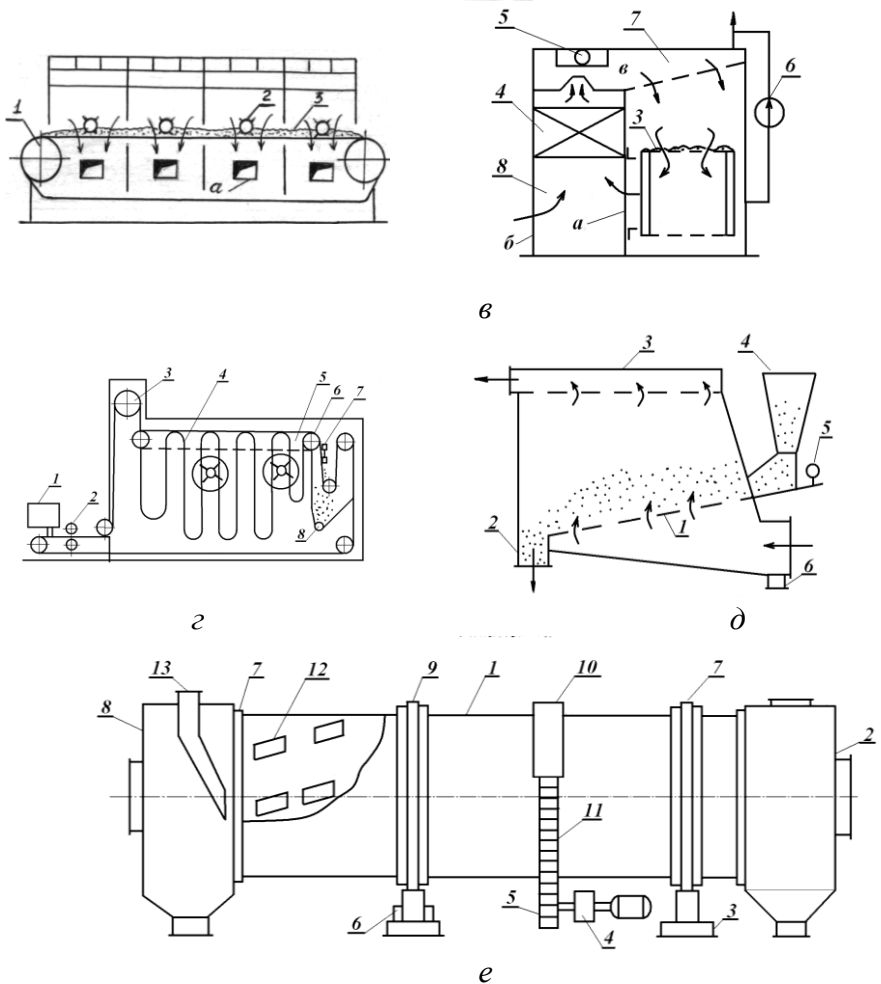


Рисунок 4.1 – Конвективні сушарки:

- а) тунельна: 1 – візок; 2 – калорифер; 3, 5 – вентилятори; 4 – привод; 6 – двері;
- б) вальцестрічкова: 1 – прес-вал; 2 – бункер; 3 – сушильний валик; 4 – ніж; 5 – конвеєр; 6 – конвеєр стрічкової сушарки;
- в) одноступенчата стрічкова: 1 – конвеєр; 2 – перегрівач; 3 – шар матеріалу; 4 – паровий калорифер; 5, 6 – вентилятори; 7 – розподільний канал; 8 – рециркуляційна камера;
- г) петльова: 1 – живильник; 2 – валики; 3 – напрямний барабан;

4 – сталева стрічка; 5 – ланцюговий конвеєр; 6 – ролик; 7 – ударний пристрій;

д) із киплячим (псевдозрідженим) шаром: 1 – похила решітка; 2, 3, 6 – патрубки; 4 – бункер; 5 – вібратор;

е) барабанна: 1 – барабан; 2 – вивантажувальна камера; 3, 6 – опорні і опорно-упорні ролики; 4 – редуктор; 5 – зубчастий вінець; 9 – бандажі; 10 – щиток; 11 – зубчасте колесо; 12 – приймально-гвинтова насадка; 13 – живильник

Газорозподільні решітки рівномірно розподіляють газовий потік і підтримують шар матеріалу при зупиненні сушарки. Використовують провальні і безпровальні решітки (рис. 4.2). Провальні решітки – перфоровані плити, найчастіше з діаметром отвору 2 – 3 мм, але бувають і до 5 мм. Вільний переріз становить 3 – 10 %.

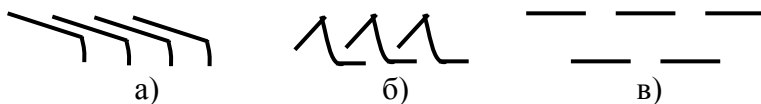


Рисунок 4.2 – Схема безпровальних решіток:
а) плоска; б) жолобчаста; в) щілинна

Плоскі решітки рекомендуються для матеріалів, здатних утворювати грудки, жолобчасті – для волокнистих, при цьому газ для кращого перемішування у решітку подається тангенціально. При температурах вище 400 °С решітка виготовляється у вигляді окремих колосників для компенсації температурних подовжень.

Для вивантаження матеріалу використовують затвори: лопатеві, шнекові і затвори-мигалки (рис.4.3), іноді по 2 – 3 мигалки на вертикальній ділянці.

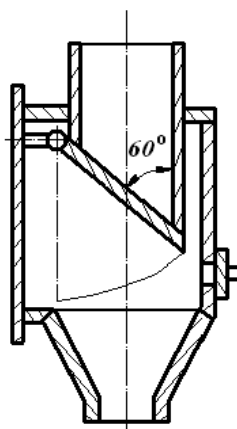


Рисунок 4.3 – Затвор-мигалка

До недоліків сушарок із киплячим шаром належать: підвищена витрата енергії та можливе вибухонебезпечне пилоутворення матеріалу.

Барабанні сушарки. Застосовуються для сушіння соди, солей, добрив, отрутохімікатів, палива, паст. Сушильний агент – повітря або димові гази, що рухаються прямо- або протитечійно з матеріалом. Сушарка (рис. 4.1 е) складається з барабана 1, до якого кріпляться бандажі 9, що спираються на опорні 3 і опорно-упорні 6 ролики. Обертання барабана передається від електродвигуна через редуктор 4, зубчастий вінець 5 і зубчасте колесо 11, яке закривається щитком 10. Потужність електродвигуна $N_{ed} = 1 - 40$ кВт, частота обертання барабана 1–8 об/хв. Розміри нормалізовані: діаметр від 1 до 2,8 м, довжина барабана 4, 6, 8 – 22 м. Матеріал, що висушується, через живильник 13 подається у приймальну камеру 8, а з неї – на приймально-гвинтову насадку 12. Лопаті насадки піднімаються і при обертанні барабана скидають матеріал. Барабан встановлений під кутом до 6° до горизонту. Між барабаном, що обертається, і нерухомою вивантажувальною камерою 2 встановлений ущільнювач 7. Для великих шматків і матеріалів, здатних до налипання, використовується лопатева насадка, для сипких – розподільна, для пилоутворювальних матеріалів – перевалочна із закритими комірками. Коефіцієнт заповнення барабана, як відношення площі поперечного перерізу, заповненого матеріалом, до площі перерізу барабана, становить 0,05 – 0,235. Нахил барабана і лопаті сприяють переміщенню матеріалу уздовж осі. Для виключення винесення газів та дрібних частинок матеріалу швидкість газового потоку повинна бути в межах 2–5 м/с. Відпрацьовані гази проходять систему пилоочищення і видаляються в атмосферу. Для запобігання сплюсненню барабана в місці опор він постачається кільцевими накладками під бандажами, товщина яких в 1,5–3 рази перевищує товщину барабана. Бандажі відливають із чавуну СЧ 18 або СЧ 21, вони служать для передачі тиску від барабана на ролики. Їх закріплюють на барабані за допомогою башмаків, приварених до кільцевих накладок. Виступи сусідніх башмаків

повернуті в різні боки, що запобігає осьовому зсуву барабана. Опорно-упорна станція включає і плити, встановлені під барабаном. На ній розміщені підшипники.

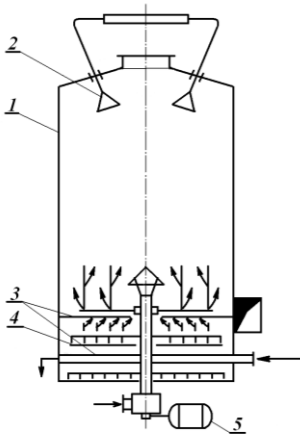
Укріплені чотири підшипникові вузли для опорних роликів. Упорні ролики розміщені під кутом до вертикалі. Бандаж упирається в упорні ролики торцевими поверхнями. Сушарки працюють під низьким вакуумом 50–250 Па, що виключає вихід у цех димових газів. Для герметизації використовують сальникові, стрічкові і секторні ущільнення. В апаратах діаметром до 2,8 м і з температурою стінки барабана до 90 °С рекомендується використовувати стрічкові ущільнення, в апаратах великого діаметра – секторні.

Розпилювальні сушарки. Застосовуються для сушіння концентрованих розчинів речовин, суспензій, емульсій, паст. Готовий продукт одержують у вигляді порошку або гранул. У залізобетонному корпусі 1 (рис. 4.4 а) розміщені форсунки 2, через які матеріал розпилюється. Розпил збільшує площу поверхні контакту матеріалу, що інтенсифікує процес сушіння, тривалість якого становить 15–20 с. У сушильну камеру гаряче повітря подається за прямо- або протитечійною схемою і відводиться з камери через пиловловлювальний пристрій. Висушений матеріал падає вниз на прожарювальні тарілки 3, що обігріваються димовими газами. Гребками 4 матеріал переміщається з тарілки на тарілку і після проходження охолоджувальної тарілки виводиться із сушарки. Гребки кріпляться на валу і приводяться в обертання від електродвигуна 5.

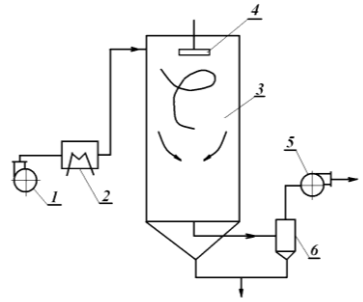
Схема установки з розпилювальною сушаркою наведена на (рис. 4.4 б). Повітря вентилятором 1 через калорифер 2 подається в розпилювальну сушарку 3, у верхній частині якої розміщений розпилювальний пристрій 4. Сушильний агент із апарата проходить пилоочисний пристрій 6 (циклон, рукавний фільтр) і вентилятором 5 викидається в атмосферу.

За способом розпилювання апарати класифікують на відцентрово-розпилювальні (ВР) і форсунково-розпилювальні (ФР). У відцентрових продукт розпилюється диском, закріпленим на вертикальному валу, який обертається

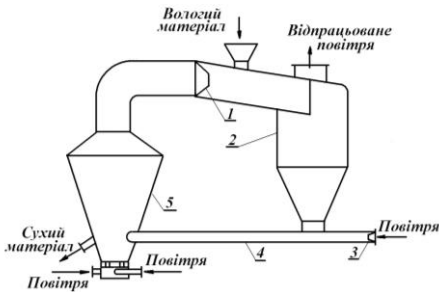
електродвигуном через підвищувальний редуктор. Форсунково-розпилювальні сушарки забезпечуються пневматичними або механічними форсунками.



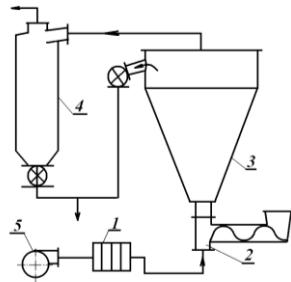
a



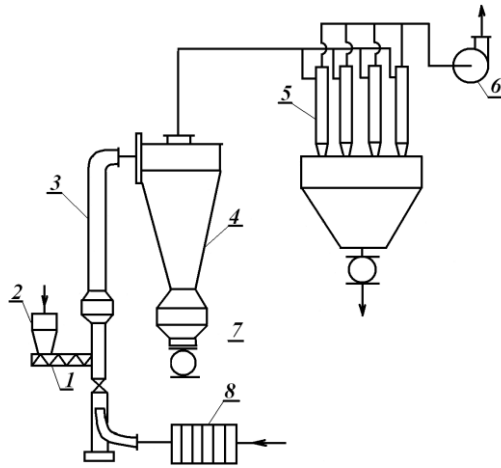
б



в



г



д

Рисунок 4.4 – Конвективні сушарки:

а) розпилювальна: 1 – корпус; 2 – форсунки; 3 – прожарювальна тарілка; 4 – гребки; 5 – електродвигун;

б) схема установки з розпилювальною сушаркою: 1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3 – сушарка; 4 – розпилювальний пристрій; 5 – вентилятор; 6 – пилоочисний пристрій;

в) комбінована: 1 – пневможивильник; 2 – циклон; 3 – живильник; 4 – пневмотруба; 5 – сушарка;

г) схема установки з аерофонтанною сушаркою: 1 – калорифер; 2 – живильник; 3 – аерофонтанна сушарка; 4 – циклон; 5 – вентилятор;

д) схема установки для сушіння в режимі пневмотранспорту: 1 – живильник; 2 – бункер; 3 – труба; 4 – циклон; 5 – груповий циклон; 6 – вентилятор; 7 – затвор

Комбіновані сушарки. Одним із типів комбінованої сушарки є сушарка «циклон – киплячий шар» (рис. 4.4 в). Вологий матеріал подається відпрацьованим сушильним агентом через пневможивильник 1 у циклон 2, де він підсушується і змішується з частинками сухого матеріалу, що виноситься з сушарки киплячого шару 5. Це перешкоджає злипанню і грудкуванню матеріалу в циклоні. Матеріал, що став сипким, підхоплюється в живильнику 3 свіжим сушильним агентом і надходить у пневмотрубу 4, де видаляється незв'язана волога, а

потім – у сушарку 5. Задана кінцева вологість досягається створенням киплячого шару відповідної висоти.

Аерофонтанні сушарки. Застосовуються для видалення слабкозв'язаної вологи з дисперсних матеріалів неоднорідного гранулометричного складу в умовах, коли швидкість витання частинок значно змінюється. Аерофонтанна сушарка є апаратом циліндричної форми з конічним днищем (рис. 4.4 з), у якому частинки матеріалу циркулюють до того часу, поки їхня швидкість витання не стане меншою за швидкість газового потоку. Повітря вентилятором 5 через калорифер 1 подається в аерофонтанну сушарку 3. Гаряче повітря підхоплює вологий матеріал, що надходить із живильника 2, вносячи його в конічну частину сушарки 3. У верхній частині конуса швидкість зменшується, і матеріал уздовж стінок переміщається у зворотному напрямі, що створює інтенсивну циркуляцію. Для очищення повітря служить циклон 4. Вивантаження висушеного матеріалу проводиться з циліндричної частини апарата, в цей самий канал надходять частинки, вловлені у циклоні. Сушарки виконуються з газорозподільною решіткою і без неї. В останньому випадку швидкість газу у вузькій частині апарата $\omega_n = (1 \div 2)\omega_в$, де $\omega_в$ – швидкість витання. У широкій частині апарата швидкість потоку близька до швидкості псевдозрідження.

Сушіння матеріалів у режимі пневмотранспорту. Труба-сушарка (рис. 4.4 д) застосовується для сушіння сипких матеріалів для видалення вільної або слабкозв'язаної вологи. Не застосовується для сушіння частинок розмірами 8 – 10 мм і видалення зв'язаної вологи. Такий спосіб сушіння реалізується в пневмотрубах і вихрових або циклонних сушарках. Діаметр труб до 1 м, довжина до 25 м. Швидкість теплоносія 10 – 40 м/с, тому процес сушіння триває кілька секунд. Матеріал із бункера 2 двошнековим живильником 1 подається в трубу 3, в яку з калорифера 8 надходить гаряче повітря. Матеріал підхоплюється теплоносієм і транспортується в циклон 4. У трубі 3 відбувається інтенсивне сушіння матеріалу. З циклону висушений матеріал вивантажується через затвор 7, а повітря

проходить систему тонкого пилоочищення 5 і вентилятором 6 викидається в атмосферу. Процес сушіння інтенсивний на нестаціонарній ділянці труби, де видаляється до 55 % вологи. Для створення нестаціонарних умов руху газової суспензії труби постачають розширювачами, гвинтовими вставками та ін.

2.2. Кондуктивні сушарки

Барабанна роторна вакуумна сушарка. Серійно випускають барабанні вакуумні сушарки із плаваючим барабаном і роторні (рис. 4.5). Роторна сушарка (рис. 4.5 а) є горизонтальним циліндричним барабаном 1 з оболонкою 2. Усередині барабана встановлений ротор 3 (перемішувальний пристрій) із гребками 6, які зігнуті на одній половині барабана в один бік, а на другій – в інший. Реверсивне обертання ротора автоматичне, напрям обертання змінюється через 5–8 хв. Матеріал завантажується через люк 5 і гребками переміщається до периферії барабана; при обертанні ротора в інший бік матеріал переміщається до вивантажувального люка 4. Пара для обігріву підводиться в оболонку через патрубок 7, а випарена волога з барабана виходить через патрубок 8. Обертання здійснюється від електродвигуна через редуктор 9.

Конденсат відводиться через сифонну трубку 1. Вологий матеріал подається в лоток 6, де перемішується мішалкою 7. При обертанні валика на його зовнішній поверхні утворюється тонка плівка матеріалу, яка калібрується скребком. Сушіння матеріалу відбувається короткочасно в тонкому шарі на поверхні барабана. Висушений матеріал зрізається ножом і по фартуху зсипається в ящик. Вологе повітря видаляється через патрубок 4. У вакуумних сушарках робочі елементи розміщуються у кожусі, з'єднаному з вакуумною системою. Частота обертання валика вибирається залежно від тривалості сушіння.

Одновальцьова сушарка. Вальцьові апарати призначені для сушіння в'язких і пастоподібних продуктів при атмосферному тиску або вакуумі. Це апарати безперервної дії. Сушарка (рис. 4.5 б) являє собою порожній чавунний валик 5, який обертається від електродвигуна 8 через редуктор 9 і шестерні 10. Пара

усередину валика надходить через патрубок 2 і цапфу 3. Конденсат відводиться через сифонну трубку 1. Вологий матеріал подається в лоток 6, де перемішується мішалкою 7. При обертанні валика на його зовнішній поверхні утворюється тонка плівка матеріалу, яка калібрується шкребком. Сушіння матеріалу відбувається швидко у тонкому шарі на поверхні барабана. Висушений матеріал зрізається ножом і по фартуху зсипається у ящик. Вологе повітря видаляється через патрубок 4. У вакуумних сушарках робочі елементи знаходять у кожусі, з'єднаному з вакуумною системою. Частота обертання валика вибирається залежно від тривалості сушіння.

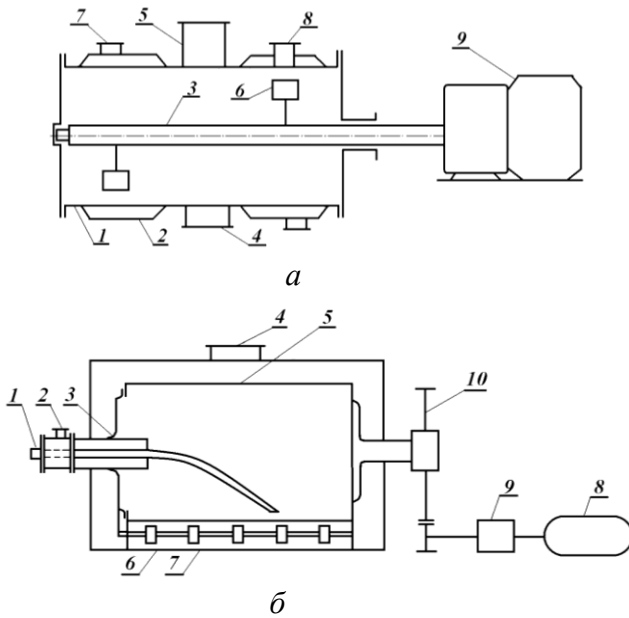


Рисунок 4.5 – Кондуктивні сушарки:

- а) барабанна роторна вакуумна: 1 – барабан; 2 – оболонка; 3 – ротор;
 4 – вивантажувальний люк; 5 – завантажувальний люк; 6 – гребки;
 7, 8 – патрубки; 9 – редуктор;
 б) одновальцева: сифонна трубка; 2, 4 – патрубки; 3 – цапфа; 5 – валик;
 6 – лоток; 7 – мішалка; 8 – електродвигун; 9 – редуктор; 10 – шестерні

3. Особливості використання барабанної сушарки у виробництві фосфорних мінеральних добрив

Сушіння вологих гранул у виробництві фосфорних мінеральних добрив має важливе технологічне значення. За рахунок видалення вологи завершуються та стабілізуються модифікаційні переходи всередині гранули, і вона отримує міцність. Тому після процесу грануляції здійснюється сушіння готових гранул до кінцевої вологості 1 – 3 % мас. Раніше у виробництві використовувались окремі барабанні гранулятори та сушарки, потім почали використовувати барабанні гранулятори-сушарки (БГС) для одночасного здійснення процесів грануляції плаву та сушіння отриманих гранул.

БГС являє собою барабан, який має ухил у бік вивантаження готового продукту, опирається бандажми на дві опорні станції (одна з них опорно-упорна) та обертається із частотою 3 – 5 об/хв. Барабан має привод, завантажувальну та вивантажувальну камери, для герметизації яких передбачаються стрічкове чи секторне ущільнення. Апарат працює під розріженням 10 -50 Па на вході, що дозволяє уникнути пилоутворення та досягти стійкого режиму роботи топки.

На відміну від звичайної барабанної сушарки БГС має додаткові конструктивні елементи: завантажувальна камера має патрубки для підведення зовнішнього рециклу та установки пневматичних форсунок для розпилювання плаву, барабан усередині має зворотний шнек, а в кінці барабана розміщений внутрішній класифікатор готових гранул. Класифікатор є продовженням барабана та являє собою конус довжиною 2 – 5 м (може бути шнек чи циліндричний грохот), в якому дрібна фракція (частинки розміром менше 1 мм) відділяється та зворотним шнеком при обертанні барабану повертається у головну частину БГС, а товарна фракція (частинки розміром 1 – 4 мм) вивантажуються із барабана. Зворотний шнек уявляє собою відкритий чи закритий короб, який розміщений по гвинтовій лінії (1,5 – 2 витки) по внутрішній стінці барабана. Більш ефективними є закриті шнеки із кількома

завантажувальними воронками. Використання зворотного шнека дозволяє значно зменшити кількість зовнішнього рециркулу, втрати тепла та налипання матеріалу на стінки апарата.

4. Особливості використання сушарок у виробництві двоокису титану

Після контрольної фільтрації суспензію гідратованого двоокису титану (ГДТ) у вигляді пасти піддають сушінню на стрічкових сушарках, у розпилювальних сушарках чи сушарках псевдозрідженого шару.

Пасту ГДТ за допомогою прес-машин видавлюють у вигляді тонких циліндрів на перфоровану стрічку, яка безперервно рухається. Під стрічку вентиляторами нагнітається гаряче повітря у суміші із продуктами згорання природного газу (температура 300 – 350 °С). Продукт на виході із сушарки повинен мати температуру не більше 350 °С, оскільки інакше виникають небажані структурні перетворення частинок продукту. Довготривалість сушіння досягає 30 – 40 хвилин, кінцева вологість продукту повинна бути 0,6 %.

Стрічкові сушарки із паровим обігрівом працюють при більш низьких температурах.

Для сушіння пігментного двоокису титану почали використовувати більш ефективні розпилювальні сушарки, оскільки при сушінні в таких апаратах температура нагріву частинок матеріалу не перевищує 110 °С, що позитивно впливає на якість готового продукту. Для сушіння суспензії ГДТ використовують сушарки із відцентровим розпилюванням. Диски відцентрового розпилювача обертаються зі швидкістю 100 – 160 м/с (5000 – 10000 об/хв).

У сушарках киплячого шару використовують розпилювання суспензії ГДТ на завислий шар інертних тіл (фарфорові чи скляні шарики). Такий спосіб сушіння використовують при отриманні продукту у дрібнодисперсному стані, розмір частинок яких становить менше 50 мкм. Але порівняно зі звичайними розпилювальними сушарками апарати киплячого шару мають підвищений гідравлічний тиск і у зв'язку з цим потребують більш потужних вентиляторів для подачі сушильного агента.

Висновок

Сушарки широко використовуються у хімічній промисловості для проведення тепломасообмінних процесів і інтенсифікації процесу сушіння повинна полягати чи у створенні активних аеродинамічних режимів для конвективних сушарок, чи у створенні вакууму у сушильному просторі при зменшенні шару продукту для кондуктивних сушарок.

Питання для самоконтролю

1. Дайте класифікацію сушарок.
2. Будова та принцип дії тунельних сушарок.
3. Будова та принцип дії стрічкових сушарок.
4. Будова та принцип дії вальцьострічкових сушарок.
5. Будова та принцип дії петльових сушарок.
6. Будова та принцип дії сушарок з киплячим шаром.
7. Будова та принцип дії барабанних сушарок.
8. Будова та принцип дії ропилювальних сушарок.
9. Будова та принцип дії аерофонтанних сушарок.
10. Будова та принцип дії барабанних роторних вакуумних сушарок.
11. Будова та принцип дії вальцових сушарок.

Розділ 5. Обладнання для реакційних процесів

Тема 1. Реакційні апарати

План

1. Апарати для рідинних реакцій.
2. Апарати для гетерогенних реакцій.

Ключові терміни:

кубовий реактор, реактор типу багатосекційної колони, трубчастий реактор, газорідинні реактори, реактор – турбоабсорбер, реактор із дисками, реактори колонного типу, тарілчаста колона-реактор, реактори барботажного типу, барботажний кожухотрубчастий реактор, пінний реактор.

1. Апарати для рідинних реакцій

Загальні положення

Хімічними реакторами називають пристрої для проведення хімічних реакцій. На конструкцію реактора впливає характер реакції, що проводиться. Якщо реакція проходить при високих тиску і температурі, то реактор необхідно виконувати циліндричним із товстими стінками і забезпеченими пристроями для стиснення й нагрівання газової реакційної суміші. Якщо реакція проходить на каталізаторі, то реакційну суміш необхідно очищати від речовин, що отруюють каталізатор. Якщо реакція зворотна, то з реакційної суміші необхідно виділяти продукт, а речовини, що не прореагували, повертати в реактор.

Використовують два типи реакторів безперервної дії: кубовий (реактор змішування) і трубчастий (реактор витіснення). Кубовий реактор є вертикальною циліндричною посудиною, постаченою мішалкою і штуцерами підведення реагентів і відведення продуктів реакції. Умови проведення реакції характеризуються постійністю концентрацій речовин і температури по усьому об'єму реактора. Трубчасті реактори не мають перемішувальних пристроїв. Середовище в них рухається зі сталою швидкістю подібно до поршня. Концентрація речовин реакції плавно змінюється по довжині апарата, початкові речовини не розводяться продуктами реакції. Швидкість реакції більша, а час менший, ніж у реакторах змішування. Разом із тим

модель ідеального витіснення не враховує молекулярну і конвективну дифузію у напрямку потоку.

Реакції в рідкому середовищі можуть проходити як в однофазному, так і у двофазному середовищі, тобто в емульсії. В емульсійних процесах початкові речовини розчинені в двох рідинах, що не змішуються між собою, і для перебігу реакції необхідний контакт фаз, який досягається перемішуванням. При проведенні емульсійних реакцій можливі кінетична і дифузійна області їх проходження. Для дифузійної області необхідно забезпечити велику поверхню контакту фаз, а для кінетичної області важливий час проходження реакції, тобто об'єм реактора.

Теплообмінні пристрої реакторів

Для підтримки оптимального температурного режиму в реакторах використовуються різні теплообмінні пристрої. Вибір пристрою залежить від теплового ефекту реакції, температурних умов процесу, гідродинамічного режиму і властивостей теплоносія.

Теплообмінні пристрої поділяються на вбудовані й винесені. Вбудовані в апарат також поділяються на внутрішні й зовнішні.

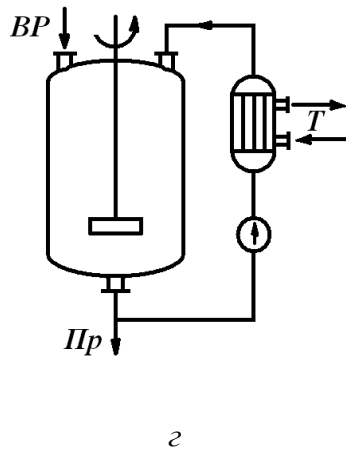
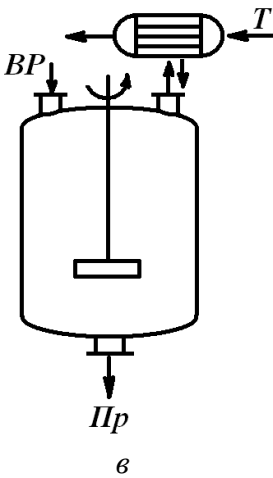
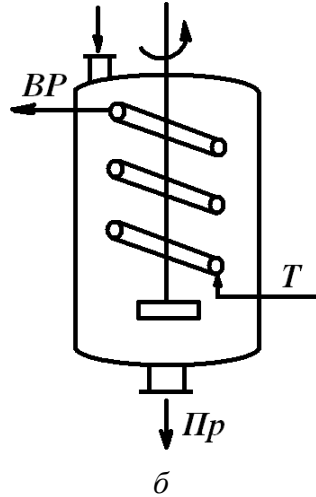
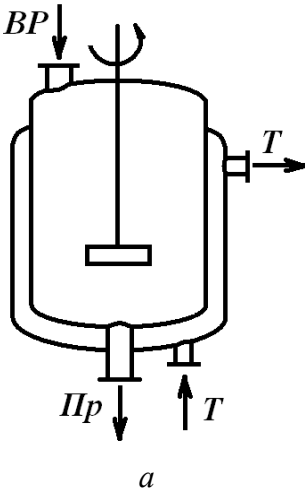
З погляду контролю стану реактора і теплообмінного пристрою, м'якшого і рівномірного нагрівання реакційної маси необхідно віддати перевагу зовнішнім теплообмінним пристроям.

Гладка оболонка (рис. 5.1 а) ефективна, коли швидкість руху теплоносія мало впливає на теплопередачу (обігрівання паром). При використанні рідких теплоносіїв для їх турбулізації до оболонки приварюють спіраль. Для отримання високих швидкостей теплоносія до зовнішньої поверхні реактора приварюють змійовики, виконані з труби, напівтруби або профільного прокату. Недолік – велика довжина зварних швів.

Якщо поверхня зовнішніх теплообмінних пристроїв недостатня, то додатково встановлюють *змійовики* (рис. 5.1 б). У разі неможливого розміщення теплообмінного пристрою усередині реактора теплообмінники виносять назовні (рис.5.1 в,г).

Як теплообмінні елементи замість змійовиків можуть використовуватися *внутрішні теплообмінники* (рис. 5.1 е) або *циліндричні стакани* (рис. 5.1 д).

Внутрішні пристрої ускладнюють реактор і утруднюють їх очищення.



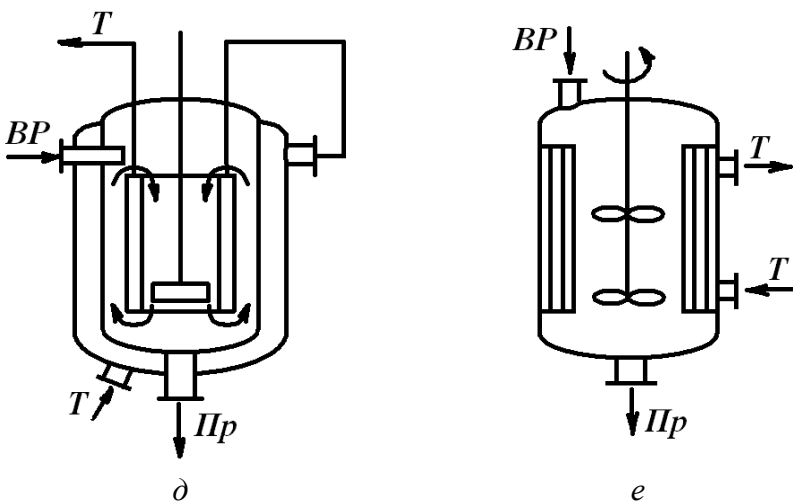


Рисунок 5.1 – Схеми теплообмінних пристроїв реакторів:
 а) оболонка; б) внутрішній змійовик; в) виносний конденсатор; г) виносний теплообмінник; д) з циліндричним стаканом; е) внутрішній теплообмінник. *BP* – вихідні речовини; *Pr* – продукти реакції; *T* – теплоносі.

Конструкції реакторів

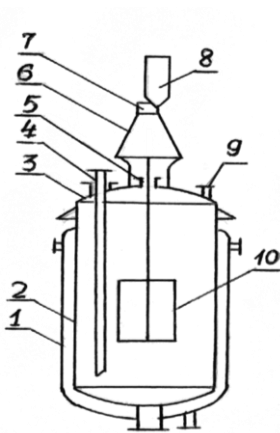
Кубовим реактором (рис. 5.2 а) може служити реактор для полімеризації дивінілу зі стиролом при $t = 50$ °С. Він являє собою циліндричний апарат 2 із зовнішньою оболонкою 1 для охолодження. Апарат закривається кришкою 3, на якій встановлена опора 6 для редуктора 7 і електродвигуна 8, які приводять в обертання рамну мішалку 10. Вал мішалки проходить через сальникове ущільнення 5. Продукт в апарат надходить по трубі 4 і виходить через штуцер 9. Як холодоагент застосовують воду. Кілька разів на рік апарат очищають від відкладень на стінках.

Реактор типу багатосекційної колони (рис. 5.2 б) для полімеризації або поліконденсації застосовують у процесах отримання полістиролу або фенолоформальдегідних смол.

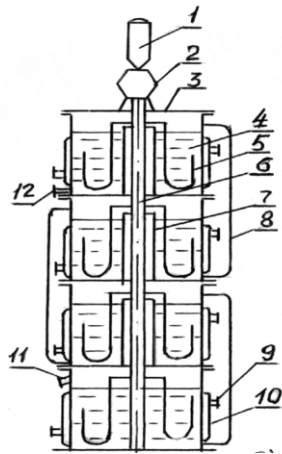
Реактор складається з кількох послідовно з'єднаних між собою секцій 4, кожна з яких має оболонку 10 зі штуцерами підведення і відведення теплоносія 9. На кришці 3 верхньої секції укріплені електродвигун 1 і редуктор 2, які передають рух валу 6 мішалок 5. Для запобігання витоку реагуючих речовин через отвори для валу в днищі секцій встановлені труби 7, верхній рівень яких вищий за рівень рідкої суміші в секції. Переливання рідини із секції в секцію відбувається по трубах 8. Вихідні речовини в апарат надходять через штуцер 12, переміщуються по трубі 8, переходять у наступну секцію і т.д. Вивантаження відбувається через штуцер 11.

Теплообмінні пристрої у вигляді оболонок дозволяють підтримувати температурний режим у кожній секції.

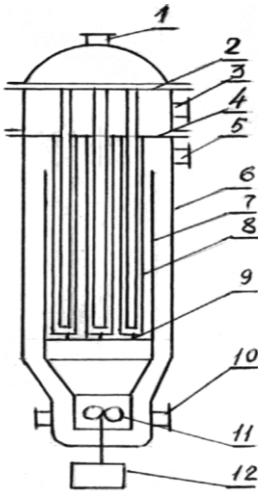
Для проведення реакцій, які супроводжуються виділенням великої кількості теплоти, використовується *трубчастий реактор* з пучком подвійних теплообмінних труб, наприклад, реактор для алкілування вуглеводнів (рис. 5.2 в). Він являє собою вертикальний циліндричний корпус б, в якому створюють тиск $P=1$ МПа та усередині якого для відведення теплоти реакції розміщений пучок подвійних теплообмінних труб 8, оточених кожухом 7. У нижній частині кожуха поміщене колесо осьового насоса 11, який забезпечує циркуляцію, перемішування і обтікання поверхні теплообміну реагуючими речовинами. Внутрішні труби закріплені в трубних решітках 2, а зовнішні – в решітках 4. Холодоагент (рідкий аміак або пропан) через штуцер 1 надходить у камеру, а з неї – у середину внутрішніх труб і по них доходить до нижнього заглушеного торця зовнішніх труб, повертає і по кільцевому каналу виходить у камеру, а потім через штуцер 3 залишає апарат. Вихідні речовини надходять у апарат через штуцер 10, по кільцевому каналу між корпусом б і кожухом 7 проходять у міжтрубний простір і через штуцер 5 залишають апарат.



а



б



в

Рисунок 5.2 – Апарати для рідинних реакцій:

а) кубовий: 1 – зовнішня оболонка; 2 – апарат; 3 – кришка; 4 – труба; 5 – сальникове ущільнення; 6 – опора; 7 – редуктор; 8 – електродвигун; 9 – итуцер; 10 – рамна мішалка; б) багатосекційний: 1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – кришка; 4 – секція; 5 – мішалка; 6 – вал; 7, 8 – труби; 9 – итуцери для підведення та відведення теплоносія; 10 – оболонка; 11 – итуцер для вивантаження речовин; в) трубчастий: 1 – итуцер для холодоагенту; 2 – трубна решітка для внутрішніх труб; 3, 5, 10 – итуцери; 4 – трубна решітка для зовнішніх труб; 6 – корпус; 7 – кожух; 8 – подвійні теплообмінні труби; 9 – переливні труби; 11 – осьовий насос; 12 – електродвигун

2. Апарати для гетерогенних реакцій

Загальні положення

До апаратів для гетерогенних реакцій належать газорідинні реактори і апарати для реакцій між газом і твердою речовиною.

Для газорідинної реакції необхідний контакт між газом і рідиною. У більшості випадків газ вводиться в рідину, і такі реакції супроводжуються масообміном. У деяких випадках одні стадії процесу проходять у рідкій фазі, інші – у газовій. Оскільки реакції супроводжуються міжфазовим перенесенням, газорідинні реактори конструктивно подібні до абсорберів, проте у зв'язку зі значним тепловим ефектом реактори забезпечують пристроям підведення або відведення теплоти. Крім того, при малій швидкості реакції об'єм рідини в апараті повинен бути більшим, ніж для абсорбції, при якій важлива площа міжфазової поверхні.

Методи інтенсифікації повільних і швидких реакцій різні. При проведенні швидких реакцій, перебіг яких лімітує стадія масообміну, продуктивність апарата забезпечується збільшенням міжфазової поверхні. При проведенні повільних реакцій, що лімітуються реакційною здатністю речовин, досить створення помірних умов масопередачі. Процес можна прискорити підвищенням концентрацій речовин, температури, застосуванням активного каталізатора.

Реакції між газом і твердою речовиною також супроводжуються масоперенесенням, що відбувається в газовій фазі. Газ підводиться до твердої речовини, а від нього відводяться продукти реакції. На швидкість процесу впливає площа поверхні контакту фаз. Для її збільшення проводять подрібнення твердої речовини.

Особливості процесу визначають конструкцію реактора і його розміри.

Газорідинні реактори

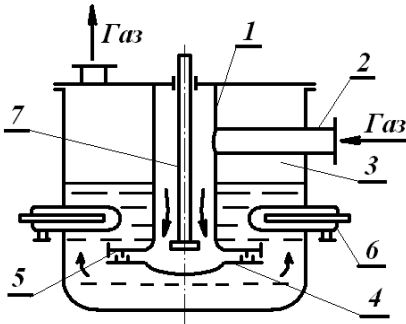
Можливі два варіанти газорідинних реакторів: або газ реагує з рідиною, або реагуючі речовини перебувають у газовій фазі, а рідина є каталізатором. Реакція проходить або в об'ємі каталізатора, або на його поверхні. Головні вимоги до

газорідинних реакторів – створення умов міжфазового контакту і оптимального теплового режиму.

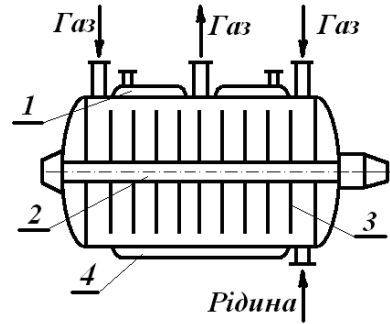
Реактор – турбоабсорбер (рис. 5.3 а) належить до реакторів із механічною мішалкою і використовується в основному для процесів отримання аерозолів або абсорбції газів, що відходять. Газ надходить через вхідний патрубок 2 у трубу 1, яка має у нижній частині нерухомий диск 5 із концентричними кільцями. На валу 7 встановлений диск, що обертається 4, також з кільцями, при цьому утворюється лабіринтовий канал. При обертанні диска 4 під дією відцентрових сил виникає радіальний потік газорідинної суміші, спрямований до бічних стінок апарата. У відстійній зоні 3 потік розшаровується. Газ, що прореагував, віддаляється з верхньої частини апарата, а рідина постійно циркулює усередині нього. Теплообмін забезпечують вбудовані теплообмінні елементи б.

Реактор із дисками, що обертаються (рис. 5.3 б).

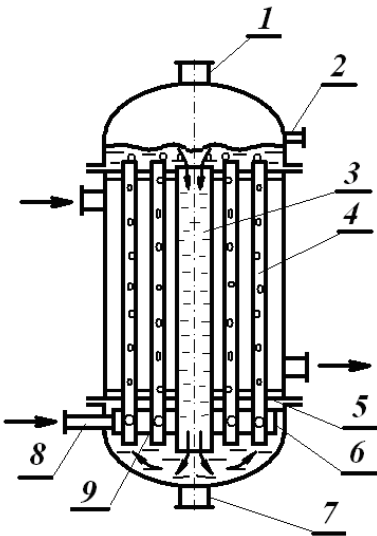
Розвинену поверхню контакту між газом і рідиною одержують розпилюванням рідини розпилювачами, форсунками, дисками, що обертаються. Реактор складається з горизонтального циліндричного корпусу 1, по осі якого встановлений ротор, що складається з вала 2 і дисків 3. Апарат на одну третину заповнений рідиною, яка при швидкому обертанні дисків подрібнюється на найдрібніші краплі, які утворюють густий туман, що заповнює вільний об'єм реактора. Через цей туман проходить газ. Розвинена міжфазова поверхня сприяє інтенсивному масообміну. В апараті створюються хороші умови для проходження швидких реакцій у дифузійній області. Температурний режим підтримується за допомогою грючої оболонки 4. Теплоу можна підводити або відводити. Найчастіше такі реактори – періодично діючі. Недоліки – наявність сальників і рухомих частин.



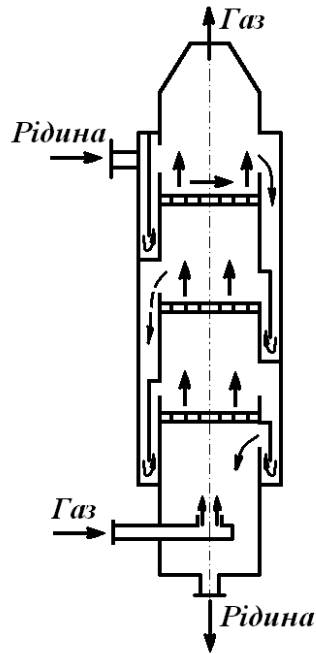
а



б



в



г

Рисунок 5.3. – Газорідинні реактори:

а) реактор-турбоабсорбер: 1 – труба; 2 – вхідний патрубок; 3 – відстійна зона; 4 – диск, що обертається; 5 – нерухомий диск; 6 – теплообмінні елементи; 7 – вал;

б) реактор із дисками, що обертаються: 1 – корпус; 2 – вал; 3 – диск; 4 – оболонка;

в) *барботажний кожухотрубчастий реактор*: 1 – штуцер для видалення газу; 2 – штуцер для зливання рідини; 3 – циркуляційна центральна труба; 4 – труби; 5 – трубна плита; 6 – кільцевий канал; 7 – штуцер для подачі рідини; 8 – штуцер для подачі газу; 9 – бічні отвори;

г) *пінний реактор*

Реактори колонного типу

Як газорідинні реактори застосовують насадкові або тарілчасті колони. Якщо рідина є каталізатором, то вона циркулює по замкненому контуру, тоді як в абсорбері рідина виводиться з апарата. В *насадкових* реакторах рідина плівкою стікає по насадці, а протитечійно їй підіймається газ. Насадка забезпечує велику поверхню контакту фаз. Колони виготовляють зі сталі із додатковим покриттям корозійностійким матеріалом. Як матеріал для колон використовують чавун, кераміку, футерування графітом або кислототривкою цеглиною. Насадкові колони малопридатні для реакцій, які проходять у кінетичній області, оскільки використовується не весь об'єм рідкого реагенту.

Тарілчаста колона-реактор використовується для проходження повільних реакцій і відрізняється від колонного абсорбера тим, що шар рідини на тарілці значно більший. Для відведення теплоти реакції між тарілками в рідину занурені U-подібні трубки. Рідина зверху вниз рухається з тарілки на тарілку, а газ підіймається вгору. Рідина видаляється з нижньої, а газ – із верхньої частини апарата.

Реактори барботажного типу

У таких апаратах газ бульбашками проходить крізь шар рідини. Найчастіше він являє собою вертикальну циліндричну посудину, заповнену рідиною. У нижній частині посудини розміщений барботер, виготовлений з труби, зігнутої в кільце. Кільцева труба має отвори, з яких виходить газ. Верхня частина посудини виконується розширеною для відділення бризок і крапель. Іноді встановлюють другу відстійну камеру. Посудину

забезпечують теплообмінними елементами для підтримки температурного режиму.

У таких апаратах проводять повільні реакції, що проходять у кінетичній області. Недоліки – великий гідравлічний опір і необхідність нагрівання великих мас рідини при пуску.

Барботажний кожухотрубчастий реактор (рис.5.3 в) є теплообмінником із циркуляційною центральною трубою 3. Подовжені нижні кінці труб 4, що знаходяться під трубою плитою 5, мають бічні отвори 9. Всередині трубний простір заповнений рідиною до рівня зливного штуцера 2. Рідина подається через штуцер 7, а газ – через штуцер 8 і по кільцевому каналу 6 розподіляється по периметру апарата. З каналу газ надходить у трубки через отвори і бульбашками рухається по трубах, вступаючи в реакцію. Видаляється газ з апарата через штуцер 1, а рідина повертається по циркуляційній трубці. Частина рідини поступово зливається через штуцер 2. У міжтрубний простір може подаватися теплоносій або холодоагент.

Пінний реактор (рис. 5.3 з).

На відміну від реакторів барботажного типу в пінних апаратах бульбашки газу надходять у рідину з великою швидкістю. Маса інтенсивно перемішується, і утворюється піна, яка характеризується малим дифузійним опором. Тому пінні реактори ефективні для проведення швидких реакцій. При зменшенні швидкості газу нижче певного значення піна миттєво руйнується. Діапазон робочих швидкостей 0,8 – 4 м/с.

Пінний апарат складається з корпусу 1 прямокутного або круглого перерізу, усередині якого на рівних відстанях розміщеним перфоровані тарілки-решітки 4, постачені зливними порогами 2.

З тарілки на тарілку рідина перетікає через переливні пристрої 3, які повинні мати достатню площу перерізу, щоб газ не створював пробок і не перешкоджав переливанню. Газ надходить знизу і послідовно проходить через усі решітки, а назустріч йому переміщається рідина. Висота шару рідини на тарілці залежить від висоти порогів 2.

Для проведення реакцій, що відбуваються в дифузійній області, наприклад, для хлорування етилену, використовують реактори типу газліфта. Прикладом може бути реактор із циркуляційним контуром. Він має декілька підйомних труб, розміщених навколо центральної циркуляційної. У підйомні труби через барботер подається газ, який забезпечує циркуляцію. Наверху апарата в сепараторі газ відділяється і залишає апарат, а рідина по циркуляційній трубі повертається вниз до підйомних труб.

Висновок

Хімічні реактори широко використовуються у хімічній промисловості для проведення хімічних перетворень. Більш ефективними реакторами необхідно вважати реактори, що працюють у режимі ідеального витіснення, оскільки у таких реакторах швидкість реакції буде вищою, час перебування реагентів меншим, габарити зменшені порівняно із реакторами, які працюють у режимі ідеального змішування.

Питання для самоконтролю

1. Дайте класифікацію хімічних реакторів.
2. Будова та принцип дії кубового реактора.
3. Будова та принцип дії реактора типу багатосекційної колони.
4. Будова та принцип дії трубчастого реактора.
5. Будова та принцип дії реактора-турбоабсорбера.
6. Будова та принцип дії реактора з дисками.
7. Будова та принцип дії реактора колонного типу.
8. Будова та принцип дії реактора тарілчастого колонного типу.
9. Будова та принцип дії реактора барботажного типу.
10. Будова та принцип дії кожухотрубчастого реактора.
11. Будова та принцип дії пінного реактора.

Тема 2. Апарати для проведення реакцій на твердому каталізаторі

План

1. Реактори низького тиску.
2. Реактори високого тиску.
3. Перспективна реакційна техніка.

Ключові терміни:

конвертер метану, радіальний конвертер, контактний реактор, колона синтезу аміаку, колона синтезу аміаку полицна, реактор із псевдозрідженим каталізатором, контактний трубчастий апарат.

Загальні положення

Газові реакції на твердому каталізаторі застосовуються під час виробництва азотних, фосфорних добрив, при проведенні каталітичного крекінгу і риформінгу нафтопродуктів, синтезу метанолу, спиртів і вуглеводнів. Реактори для таких процесів називають контактними апаратами, або колонами синтезу.

У більшості випадків використовують кілька нерухомих шарів каталізатора у вигляді гранул або пігулок, розміщених на решітках. Застосовують реактори з рухомих зернистим каталізатором, який пересипається зверху вниз апарата або створює киплячий шар. Окиснення аміаку проводять на дротяній сітці із платини з додаванням іридію, родію. Для підтримки температурного режиму в реакторі здійснюється відведення теплоти подачею холодного газу або розпиленої води в потік реагенту, або за допомогою теплообмінних пристроїв. Найбільш рівномірний температурний режим досягається тоді, коли теплообмінні елементи поміщені в шар каталізатора. Використовуються прями, U-подібні трубки, трубки Фільда.

Конструкції корпусу залежать від тиску, при якому проходить реакція. Реактори низького тиску (контактні апарати, конвертери) мають тонкостінний зварний циліндричний корпус, до якого кріпляться каталізаторні решітки, а із зовнішнього боку розміщені штуцери підведення і відведення реагентів. У реакторах високого тиску застосовують суцільноковані, ковано-

зварні, багатошарові зварні циліндричні товстостінні посудини, закриті масивними плоскими кришками. Реагенти підводять через кришки, бічні штуцери застосовують рідко. Для герметизації корпусу використовують двоконусний затвор, що самоущільнюється.

1. Реактори низького тиску

Конвертер метану (рис. 5.4 а) – високотемпературний реактор, що працює при тиску, близькому до атмосферного (0,17 МПа). При $t = 850 - 1000$ °С проходить реакція метану з киснем і водяною парою для отримання водню і монооксиду вуглецю. Циліндроконічний тонкостінний корпус реактора двошаровий: сталь 3 і корозійностійка сталь. Ізсередины корпус футерований (2): шамотна цегла, легковагий шамот, діатомітова цегла і діатомітова крихта; товщина футерування становить 500 мм. Шар каталізатора 3 з підшаром б із подрібненої шамотної цегли спирається на склепінняподібну цегляну кладку із щілинами для проходження газу, яка виконує роль опорної решітки. Температура контролюється термopарами 5 і 4. Парогазова суміш підводиться зверху, конвертований газ відводиться знизу.

Радіальний конвертер (рис. 5.4 б) призначений для проведення конверсії монооксиду вуглецю з водяною парою в реакторі з радіальним потоком газу при тиску 0,13 МПа. Процес проходить у два ступеня в коробках 2 і 4 із каталізатором, виготовленим у вигляді коаксіальних перфорованих циліндрів з жароміцної сталі, обтягнутих сіткою і розміщених із зазором між циліндрами і корпусом 1. У зону реакції газ надходить із внутрішнього решітчастого циліндра в кільцевий простір, заповнений каталізатором, він рухається в радіальному напрямі і відводиться по зазору між зовнішнім циліндром і корпусом. Між ступенями конверсії теплота відводиться за рахунок випаровування конденсату, що подається форсунками у випарник 3 із шару кілець Рашига, поміщених на решітку. Корпус конвертера забезпечений термopарами 5 і зовнішньою теплоізоляцією товщиною 160 – 250 мм. Радіальні реактори мають менший гідравлічний опір, ніж осьові.

Контактний реактор (рис. 5.4 в). П'ятиполичний контактний апарат застосовується для окиснення сірчистого ангідриду в сірчаній. У центрі сталевого циліндричного корпусу 2 розміщена опорна стійка 3, зібрана з чавунних труб із фланцями. Діаметр апарата 8,5 м, висота 19,6 м. П'ять шарів каталізатора 7 поміщені на решітки 1, що спираються на корпус і трубу. Між шарами каталізатора розміщені трубчасті теплообмінні елементи 4, 5, 6 із прямих горизонтальних труб, призначені для охолодження газу. Охолодження проводиться холодним сірчистим газом SO₂. Газ вводиться в опорну трубу і через отвори в ній виходить до шару каталізатора, потім через щілини між опорною стійкою і шаром каталізатора прямує вниз до подальших шарів і у вигляді SO₃ виходить знизу апарата.

Окиснення аміаку в монооксид азоту проводиться в реакторі з каталізатором із кількох шарів платинової сітки. Корпус апарата складається з двох усічених конусів, з'єднаних фланцями. У розширеній частині встановлений пакет із платинової сітки. Підведення і відведення реагуючих газів здійснюється через штуцери малих основ конуса. Реактор працює при тиску 0,8 МПа і температурі 850-900 °С.

2. Реактори високого тиску

Колона синтезу аміаку з подвійними протитечійними трубками (рис. 5.4 з).

Реактори високого тиску мають товстостінний циліндровий корпус, закритий плоскими кришками.

Через отвори в кришках проводиться підведення й відведення газу. Газ надходить зверху і проходить кільцевий зазор між корпусом колони 3 і кожухом насадки 4, яка складається з теплообмінника і каталізаторної коробки 2, потім – міжтрубний простір теплообмінника 5, де нагрівається газом, що прореагував. Нагрітий газ через трубу 8 надходить у верхню порожнину каталізаторної коробки і по трубах 1 виходить у порожнину 7, проходить шар каталізатора і по внутрішньому простору труб 5 прямує в нижню частину апарата і виходить із нього. Для пуску колони в центральній трубі 8 встановлений

електропідігрівач. Температуру регулюють подачею холодного (байпасного) газу знизу по трубі 6 у верхню частину теплообмінника, де він змішується із нагрітим газом.

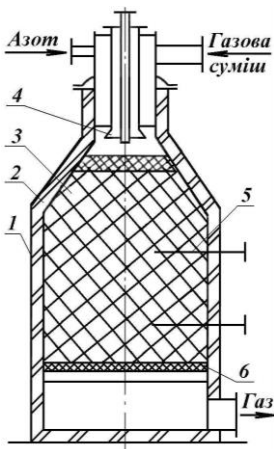
Переваги – оптимальний температурний режим, надійність конструкції, зручність монтажу насадки. Недоліки – високий гідравлічний опір і потреба у заміні відпрацьованого каталізатора.

Колона синтезу аміаку полична (рис. 5.4 д).

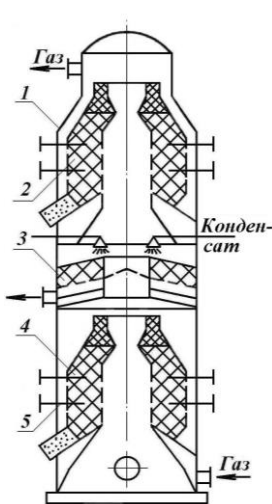
Основний потік газу надходить знизу через штуцер 2, проходить по кільцевому зазору між корпусом 9 і кожухом насадки 4, надходить у міжтрубний простір теплообмінника 8. Тут синтез-газ нагрівається до температури 400-430 °С теплотою газу, що виходить із каталізаторної коробки, послідовно проходить полиці каталізатора 10, між якими по трубах 5 подається холодний байпасний газ. Проїшовши останній шар, продукти реакції з температурою 500-520 °С підіймаються по центральній трубі 3 до труб теплообмінника 8, де охолоджуються до 320-350 °С і виходять із колони. Свіжий каталізатор завантажують через люк 7 і люк із трубою 6, а відпрацьований каталізатор вивантажують через люк 1. Колона має такі параметри: діаметр 2,4 м, висота 32 м, товщина шару каталізатора 250 мм, тиск 31,5 МПа. Недоліки – недосконалий температурний режим і розбавлення реагуючої суміші холодним газом, високий гідравлічний опір.

Реактор з псевдозрідженим каталізатором (рис. 5.4 е).

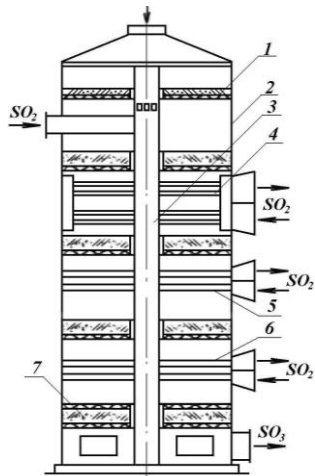
Реакції, в яких каталізатор швидко втрачає активність і потребує регенерації, практично неможливо здійснити в реакторах із нерухомим шаром, тому такі реакції проводять у псевдозрідженому шарі. Такі реактори застосовуються в нафтопереробній промисловості для процесів каталітичного крекінгу і риформінгу вуглеводнів. На поверхні каталізатора відкладається кокс, тому його спрямовують у регенератор, де кокс згорає, а гарячий відновлений каталізатор повертається в реактор.



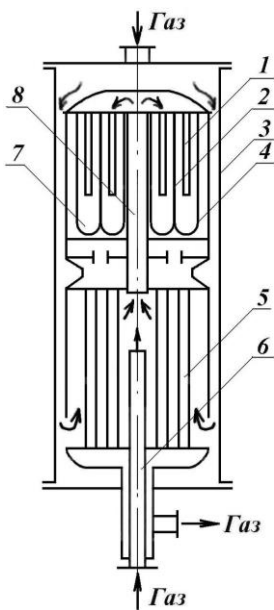
а



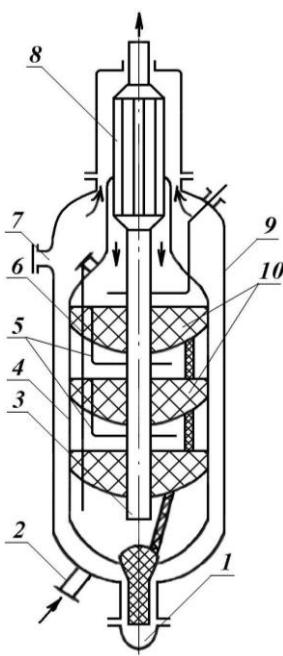
б



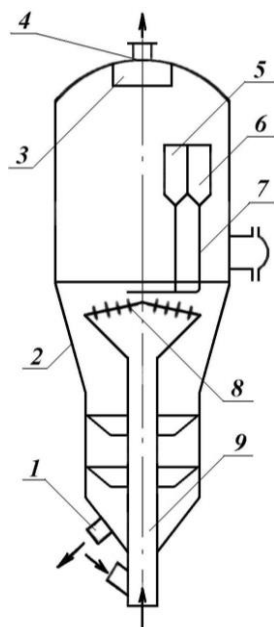
в



г



д



е

Рисунок 5.4 – Апарати для проведення реакцій на твердому каталізаторі:

- а) конвертер метану: 1 – корпус; 2 – футерування; 3 – каталізатор; 4, 5 – термонари;
- б) радіальний конвертер монооксиду вуглецю: 1 – корпус; 2, 4 – коробки з каталізатором; 3 – випарник; 5 – термонара;
- в) контактний для отримання сірчаного ангідриду: 1 – решітка; 2 – корпус; 3 – опорна стійка; 4,5,6 – трубчасті теплообмінні елементи; 7 – каталізатор;
- г) колона синтезу аміаку з подвійними протитечійними трубками: 1 – труби; 2 – каталізаторна коробка; 3 – корпус колони; 4 – кожух насадки; 5 – теплообмінник; 6 – труба для подачі байпасного газу; 7 – порожнина; 8 – центральна труба;
- д) колона синтезу аміаку полицна: 1 – люк для відпрацьованого каталізатора; 2 – штуцер; 3 – центральна труба; 4 – кожух насадки; 5 – труби для подачі холодного газу; 6,7 – завантажувальні люки; 8 – теплообмінник; 9 – корпус; 10 – полиці з каталізатором;
- е) реактор крекінгу з пилоподібним каталізатором: 1 – штуцер для подачі каталізатора; 2 – корпус; 3 – камера; 4 – штуцер для виведення парів вуглеводню; 5,6 – батарейні циклони; 7 – труби для каталізатора

Реактор каталітичного крекінгу має форму ступінчастого циліндра з конічними переходами. Суміш пари сировини з пилоподібним каталізатором через розподільну решітку 8 подається в робочу зону апарата. В зоні над решіткою, зайнятою киплячим шаром, реакція проходить при температурі 500 °С. Продукти реакції з частинками каталізатора надходять у батарейні циклони 5 і 6, де пари вуглеводнів відділяються від каталізатора, збираються в циліндричній камері 3 і через штуцер 4 виводяться з апарата. Уловлений пилоподібний каталізатор по трубах 7 повертається в киплячий шар. Відпрацьований каталізатор переміщується вниз у звужену циліндричну частину реактора, де з нього виділяються вуглеводні, а каталізатор через штуцер 1 подається в регенератор. Корпус виготовляється з вуглецевої сталі, внутрішні пристрої – з легованої сталі. Корпус – теплоізольований.

3. Перспективна реакційна техніка

Контактний трубчастий апарат (рис. 5.5 а)

Газ подається в нижній бункер апарата через газорозподільну решітку 4 і створює псевдозріджений шар сипкого матеріалу 3. Пройшовши шар, через отвори пневмотранспортних труб 6 газ із матеріалом надходить у верхній бункер 1, де відбувається його сепарація. Газ видаляється з апарата, а матеріал по центральній трубі 2 зсипається у нижній бункер. Для забезпечення необхідної температури в корпус апарата через каналні газові пальники 5 подаються димові гази. Апарат використовується для піролізу етану.

Плазмохімічна технологія передбачає проведення хімічних реакцій, які відбуваються у низькотемпературній плазмі ($t \approx 10^4 \text{ K}$) (високотемпературна плазма має $t > 10^5 \text{ K}$). У стані плазми можуть бути і речовини при $t < 830 \text{ }^\circ\text{C}$, якщо їх помістити в сильні електричні або магнітні поля. Плазму одержують у генераторах при тисках від декількох Па до десятків МПа, температура коливається від близьких до абсолютного нуля до десятків тисяч градусів.

Генератор плазми (рис. 5.5 б) містить електроди 1, розрядну камеру 3 і вузол подачі газу. Газ проходить через дугу в, що горить між катодом і анодом, і виходить у вигляді плазмового струменя через отвір в аноді-соплі. По обидва боки каналу газу встановлюються електромагніти 2.

У плазмохімічному реакторі потоки сировини і плазми вводяться окремо. Тому спочатку змішують сировину і плазму для їх контакту на молекулярному рівні, а потім реалізується сама реакція. Тому є два елементи: змішувач і реактор.

У *реакторах з попутно-вихровою (рис. 5.5 в) і зустрічно-вихровою подачею (рис. 5.5 г)* сировина подається тангенціально до плазмового струменя. Внутрішня частина реактора може бути конічної форми, що покращує процес змішування. Гетерофазні плазмохімічні процеси проводять в реакторах із псевдозрідженим плазмою шаром.

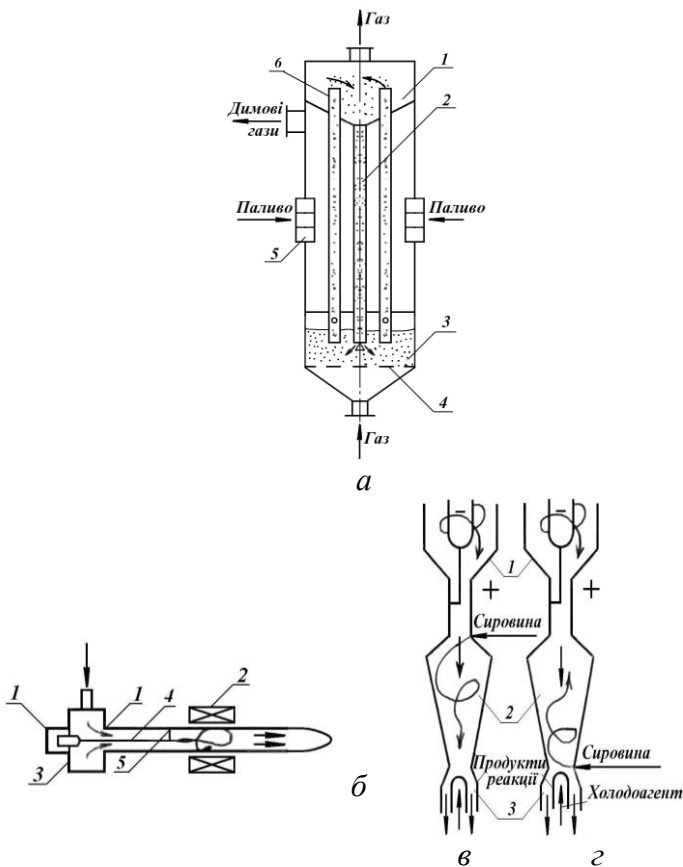


Рисунок 10.2 – Перспективна реакційна техніка:

а) трубчастий реактор з пневмотранспортною циркуляцією:

1 – верхній бункер; 2 – центральна труба; 3 – псевдозріджений шар сипкого матеріалу; 4 – опорна решітка; 5 – каналні газові пальники;

б) схема електродугового плазматрона: 1 – електроди; 2 – котушки електромагнітів; 3 – розрядна камера; 4 – дуга; 5 – канал шунтувального пробоя;

в) плазмохімічний реактор попутно-вихровий;

г) плазмохімічний реактор зустрічно-вихровий:

1 – плазматрон; 2 – реакційна камера; 3 – гартівна камера

Висновок

Хімічні твердофазні реактори широко використовуються у хімічній промисловості для проведення хімічних перетворень. Розроблення більш ефективних реакторів необхідно спрямувати на інтенсифікацію контакту фаз між середовищем, що реагує, і шаром твердого каталізатора.

Питання для самоконтролю

1. Назвіть галузі промисловості, де використовуються твердофазні хімічні реактори.
2. Будова та принцип дії реакторів низького тиску.
3. Будова та принцип дії реакторів високого тиску.
4. Будова та принцип дії конвертера метану.
5. Будова та принцип дії радіального конвертера.
6. Будова та принцип дії колони синтезу аміаку.
7. Будова та принцип дії реактора з псевдозрідженим каталізатором.
8. Будова та принцип дії контактного трубчастого апарата.
9. Будова та принцип дії генератора плазми.
10. Будова та принцип дії реакторів з попутно-вихровою і зустрічно-вихровою подачею.

Список рекомендованой литературы

1. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / под ред. В. Н. Соколова. – Л.: Машиностроение, 1982. – 385 с.
([ftp://lib.localnet/ebooks/Pohnv Knigi/Mashunu/pdf](ftp://lib.localnet/ebooks/Pohnv%20Knigi/Mashunu/pdf))
2. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 784 с.
3. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сидоренко. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
4. Классен П. В. Основные процессы технологии минеральных удобрений / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – М.: Химия, 1990. – 304 с.
5. Вакал С. В. Процессы и оборудование производства пигментного диоксида титана сульфатным способом / С. В. Вакал, В. Н. Скомороха, И. М. Астрелин, А. Е. Золотарев, Н. П. Юхименко. – Сумы : Университетская книга, 2008. – 204 с.
6. Машины и аппараты химических производств / под ред. И. И. Чернобыльского. – М.: Машиностроение, 1975. – 456 с.
7. Юхименко Н. П. Аппараты взвешенного слоя / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал, Н. П. Кононенко, А. П. Филонов – Сумы: Сбор, 2003. – 304 с.
8. Амелин А. Г. Производство серной кислоты / А. Г. Амелин. – 3-е изд., испр. – М.: Химия, 1967. – 422 с.
9. Кутепов А. М. Общая химическая технология: учебник для техн. вузов / А. М. Кутепов, Т. И. Бондарева, М. Г. Беренгартен. – М.: Высшая школа, 1990. – 520 с.
([ftp://lib.localnet/ebooks/BNB 23/183.djvu](ftp://lib.localnet/ebooks/BNB%2023/183.djvu))
10. Расчеты химико-технологических процессов / под общей ред. проф. И. П. Мухленова – Л.: Химия, 1976. – 304 с.
11. Плановский А. Н. Процессы и аппараты химической технологии / А. Н. Плановский, В. М. Рамм, С. З. Каган. – М.: Химия, 1968. – 84 с.