

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

**МЕХАНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ
ХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ**

Конспект лекцій

для студентів спеціальності 161
«Хімічні технології та інженерія»
галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія»
денної форми навчання

У трьох частинах

Частина 1

Київ 2023

УДК 66.022.5

М55

Автори: І. І. Назаренко, д-р техн. наук, професор;
М. О. Клименко, канд. техн. наук, доцент;
О. С. Дьяченко, канд. техн. наук, асистент;
Є. О. Міщук, канд. техн. наук, доцент

Рецензент К. І. Почка, доктор техн. наук, професор

Затверджено на засіданні вченої ради факультету автоматизації і інформаційних технологій, протокол № 6 від 9 листопада 2022 року.

Механічне обладнання хімічних підприємств. У трьох частинах –
М55 Частина 1 : конспект лекцій / І. І. Назаренко та інші. – Київ : КНУБА, 2023. – 64 с.

Наведено види робочих середовищ, з якими працює механічне обладнання, і їх властивості. Містить класифікацію і конструкції обладнання для подрібнення, розглянуто процес подрібнення й параметри, за якими він характеризується, приведені принципи розрахунку технологічних параметрів і вибору обладнання для подрібнення.

Призначено для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія».

УДК 66.022.5

© І. І. Назаренко, М. О. Клименко,
О. С. Дьяченко, Є. О. Міщук, 2023
© КНУБА, 2023

ЗМІСТ

Вступ.....	5
Тема 1. Механічне обладнання хімічних підприємств і їх класифікація.....	5
Лекція № 1.....	5
1.1. Основні класифікаційні ознаки механічного обладнання.....	5
1.2. Структурна схема обладнання і його елементів.....	8
1.3. Критерії оцінки машин.....	9
Запитання для самоперевірки.....	10
Тема 2. Основні фізико-механічні властивості робочих середовищ...	11
Лекція № 2.....	11
2.1. Класифікація робочих середовищ механічного обладнання хімічних підприємств.....	11
2.2. Рідини.....	11
2.3. Емульсії.....	14
2.4. Газові емульсії та піни.....	15
2.5. Суспензії.....	16
Запитання для самоперевірки.....	17
Лекція № 3.....	18
3.1. Сипучі матеріали.....	18
3.2. Розчини.....	23
Запитання для самоперевірки.....	26
Тема 3. Обладнання для подрібнення матеріалів.....	27
Лекція № 4.....	27
4.1. Процес подрібнення і його характеристики.....	27
4.2. Класифікація обладнання для подрібнення.....	31
Запитання для самоперевірки.....	32
Лекція № 5.....	33
5.1. Принцип дії і параметри механічного режиму щоккових (щелепних) дробарок.....	33
5.2. Принцип дії і параметри механічного режиму конусних дробарок.....	36
5.3. Методика розрахунку параметрів для вибору щоккових і конусних дробарок.....	39
5.4. Принцип дії і параметри механічного режиму валкових дробарок.....	42

5.5. Принцип дії і параметри механічного режиму дробарок ударної дії.....	44
Запитання для самоперевірки.....	47
Лекція № 6.....	47
6.1. Принцип дії і параметри механічного режиму барабанного обладнання для подрібнення.....	47
6.2. Принцип дії і параметри механічного режиму обладнання для подрібнення роздавлювальної і стиральної дії.....	50
6.3. Конструкції ударних, вібраційних і струйних млинів.....	56
Запитання для самоперевірки.....	61
Список літератури.....	62

Вступ

Курс дисципліни «Механічне обладнання хімічних підприємств» присвячено вивченню механічного обладнання, яке використовується на хімічних підприємствах для виконання різних технологічних операцій, таких як подрібнення, сортування, дозування, змішування, перемішування, фільтрування робочих середовищ. У процесі проходження дисципліни здобувач отримує знання й відомості про види обладнання, їх конструкції і особливості використання. Вивчає основи роботи обладнання і принципи протікання процесів усередині цього обладнання. Отримує навички з розрахунку потрібних технічних параметрів і підбору обладнання згідно з параметрами протікання технологічного процесу.

Тема 1. МЕХАНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ І ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ

Лекція № 1

1.1. Основні класифікаційні ознаки механічного обладнання

Обладнання хімічних підприємств можна класифікувати за низкою ознак, основні з яких наведено на рис.1.1.

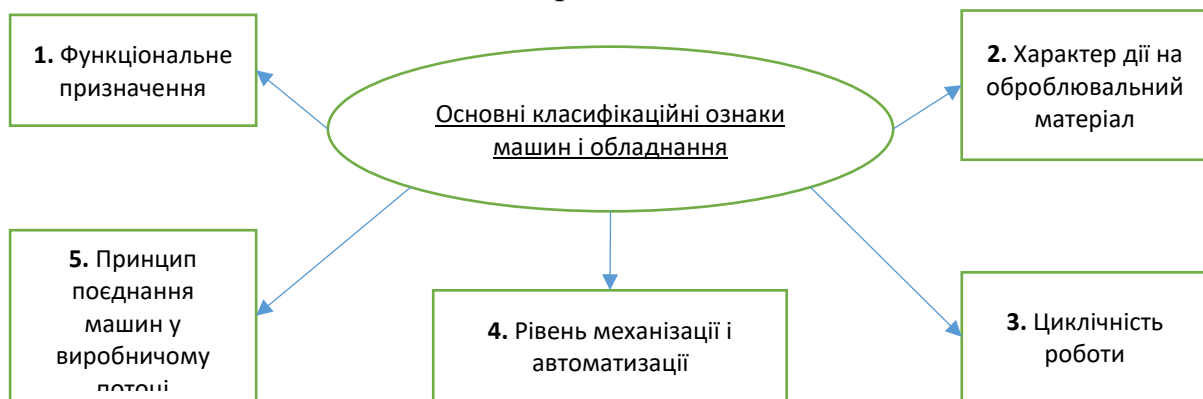


Рис.1.1. Класифікаційні ознаки обладнання

За функціональним призначенням хімічних підприємств механічне обладнання поділяють відповідно до операцій, які воно виконує в технологічному процесі, тобто за його функціями, а саме:

- подрібнення (рис. 1.2, а);
- сортування або класифікація (рис. 1.2, б);

- фільтрування (рис. 1.2, в);
- змішування (рис. 1.2, г);
- перемішування (рис. 1.2, і);
- центрифугування (рис. 1.2, д);
- живлення (рис. 1.2, е);
- дозування (рис. 1.2, є);
- сушіння (рис. 1.2, ж);
- випалювання (рис. 1.2, з);
- транспортування (рис. 1.2, и);
- очищення (рис. 1.2, і).

Наведений перелік механічного обладнання за функціональним його призначенням у технологічному процесі виготовлення оздоблювальних матеріалів не є кінцевим.

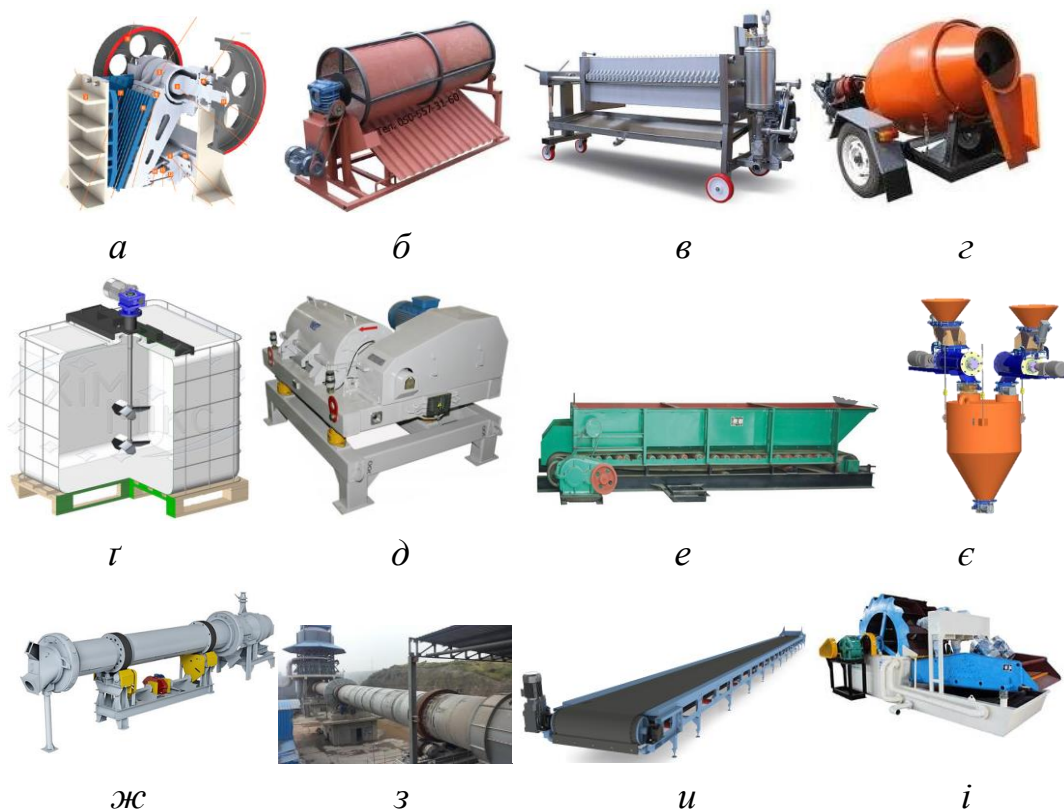


Рис.1.2. Обладнання відповідно до його функціонального призначення

За характером дії на оброблюваний матеріал обладнання класифікується таким чином:

- обладнання, у якому матеріал зазнає статичної або динамічної механічної дії і при цьому не змінює своїх властивостей, а може змінювати лише форму, розміри або інші подібні параметри;

– обладнання, у якому матеріал унаслідок фізико-механічних, біохімічних, теплових або електричних дій змінює свої фізичні, хімічні властивості або агрегатний стан;

– обладнання, яке комбінує дію як механічної, фізико-хімічної, теплової та інших видів дії на матеріал, унаслідок чого останній змінює як форму й розміри, так і хімічні властивості.

За циклічністю виконання технологічної операції обладнання поділяють на :

– обладнання періодичної дії, у якому оброблюваний матеріал зазнає впливу протягом певного часу дії, а готовий продукт виводиться з обладнання після закінчення цього періоду (виконання операції відбувається циклічно, тобто повторюються етапи виконання операції). До такого обладнання належать, наприклад, рамні фільтри, у яких операція фільтрування складається з таких етапів: зведення рамок, подача суспензії, стискання рамок для створення тиску фільтрування, власне сам процес фільтрування, промивання осаду, розведення рамок і вивантаження осаду, промивання фільтрувальних перетинок, після чого процес повторюється;

– обладнання безперервної дії – обладнання, у якому виконання операції відбувається безперервно. До такого обладнання належать, наприклад, вакуум-фільтри барабанні, у яких фільтрувальна стрічка за один оберт барабана послідовно виконує всі етапи операції фільтрування: фільтрування, промивання осаду, сушіння, знімання осаду, промивання стрічки.

За рівнем механізації і автоматизації операцій обладнання буває:

– неавтоматизоване – коли всі допоміжні операції (завантаження, вивантаження, переміщення, контроль) і деякі інші технологічні операції виконує робітник/оператор;

– напівавтоматизоване – коли основні технологічні операції виконуються в автоматичному режимі, а ручними залишаються деякі транспортні, контрольні й інші допоміжні операції;

– автоматизоване – коли всі основні технологічні й допоміжні операції виконуються автоматично без участі оператора.

За принципом поєднання обладнання у виробничому потоці розрізняють:

- окреме обладнання й агрегати;
- комплекси обладнання й агрегатів;
- комбіновані машини;

– автоматичні системи машин.

1.2. Структурна схема обладнання і його елементів

Обладнання, яке застосовується на хімічних підприємствах, складається з ряду елементів – пристроїв, призначених для виконання певних технологічних операцій і функцій (рис. 1.3).

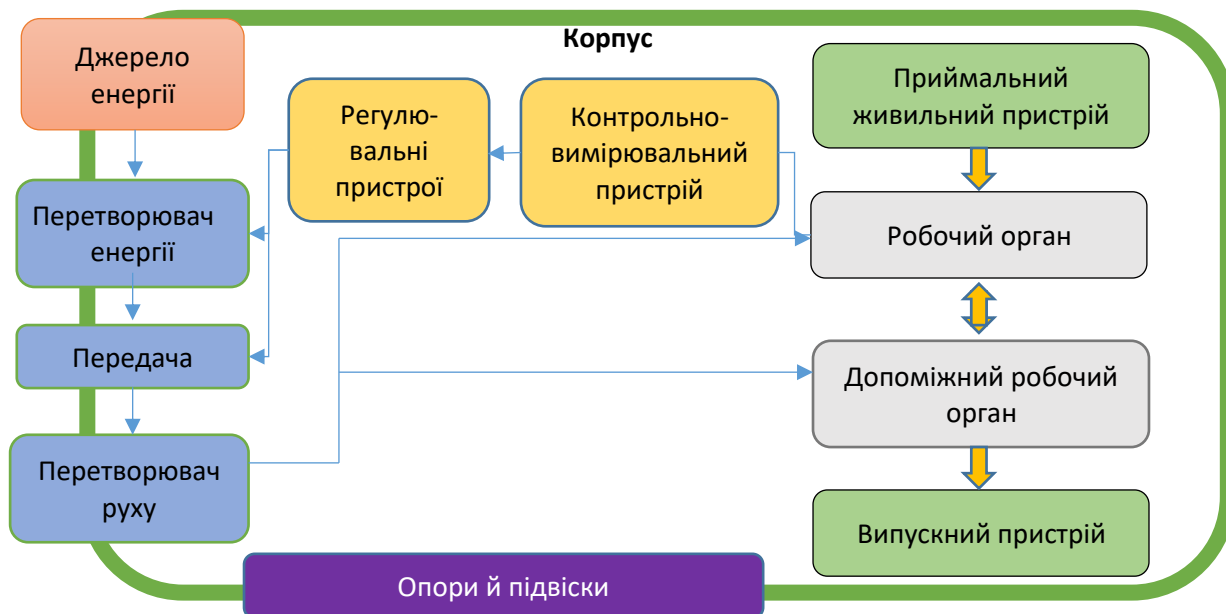


Рис. 1.3. Структурна схема обладнання і його основні елементи

Усі елементи структурної схеми обладнання мають певне призначення.

Корпус – елемент, який слугує безпосередньо для кріплення і з'єднання елементів обладнання, може бути виконаний у вигляді корпусу литої станини, металоконструкції або рами (зварної або розбірної).

Привод обладнання складається з перетворювача енергії, передачі й перетворювача руху.

Перетворювач енергії – це привод обладнання, що здійснює перетворення одного виду енергії в інший і подає її до робочого органу через передатні механізми й перетворювачі руху.

Передача або передатні механізми можна поділити на три види: ті, що не змінюють швидкості, і ті, які змінюють і регулюють швидкість. До першого типу належать різноманітні муфти. Для зміни швидкості застосовують ремінні, ланцюгові, зубчасті, фрикційні передачі й редуктори, а для регулювання – варіатори.

Перетворювач руху слугує для зміни виду руху, найчастіше обертальний рух перетворюється в інші види, наприклад зворотно-поступальний.

Робочий орган – елемент обладнання, що безпосередньо впливає на оброблюваний матеріал. Робочі органи, які виконують основну технологічну функцію, називають основними, а елементи, які виконують додаткові операції, – допоміжними робочими органами.

Приймально-живильний пристрій – елемент обладнання, який слугує для приймання й подавання матеріалу до робочого органу.

Випускний пристрій – елемент обладнання, який слугує для виведення матеріалу після його технологічної обробки.

Опори й підвіски – елементи, які слугують для з'єднання рухомих елементів обладнання з нерухомими за допомогою пружин та інших пружних елементів.

Більшість сучасного обладнання має у своєму складі регульовальні та контрольні-вимірювальні прилади й апаратуру.

1.3. Критерії оцінки машин

Критерії оцінки ефективності обладнання є важливим моментом для аналізу наявних машин і особливо для обґрунтування конструкцій нового обладнання, яке планується до розробки і створення. При цьому обов'язково виконують оцінку показників ефективності, з яких складається вибраний для оцінки критерій [1].

Загальними класифікаційними ознаками критеріїв, що визначають ефективність будь-якої системи, є такі:

- вид (натуральний, енергетичний, термодинамічний, економічний);
- рівень (глобальний, локальний, узагальнений);
- структура (абсолютний, питомий, відносний, згорнутий);
- призначення (до проектування, проектний, виробничий, експлуатаційний, комплексний);
- масштаб використання (промисловість, галузь, промислове обладнання);
- термін дії (оперативний, довгостроковий).

На стадії проектування здебільшого застосовують натуральні критерії, що базуються на використанні основних показників обладнання, якими є продуктивність, маса, потужність та інші [9].

Показники, за якими зазвичай визначають ефективність механічного обладнання технологічних процесів, поділяються на три основні групи [1]:

- технічні й експлуатаційні;
- економічні;
- конкурентоздатності.

До технічних й експлуатаційних показників належать: класифікаційні, призначення, надійності (безвідмовність, довговічність, ремонтно-придатність обладнання й ін.), технологічні, стандартизації та уніфікації, патентно-правові, безпеки, екологічні, ергономічні, технічної естетики.

До економічних показників зазвичай відносять такі: витрати на придбання обладнання (ціна ринкова; витрати, пов'язані з транспортуванням, монтажем, налагоджуванням, навчанням персоналу тощо), витрати на експлуатацію (обслуговування, паливно-мастильні матеріали, енергію, основні та допоміжні запасні частини тощо).

До показників конкурентоздатності обладнання належать: умови їх продажу (товарообмін, оплата у валюті, продаж у кредит, негайна оплата або оплата з відстрочкою), умови сервісного обслуговування (довготривалість гарантійного обслуговування, забезпечення запасними частинами, технічна документація, навчання персоналу, терміни поставки).

Запитання для самоперевірки

1. Які існують основні класифікаційні ознаки машин і обладнання?
2. Що таке функціональне призначення машин?
3. Як класифікуються машини за характером дії на оброблюваний матеріал?
4. Як класифікуються машини за принципом поєднання їх у виробничому потоці?
5. Що таке структурна схема машин? Наведіть приклад.

Тема 2. ОСНОВНІ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РОБОЧИХ СЕРЕДОВИЩ

Лекція № 2

2.1. Класифікація робочих середовищ механічного обладнання хімічних підприємств

Важливою інформацією для підбору або налагоджування роботи обладнання є знання основних фізико-механічних властивостей робочих середовищ, з якими це обладнання працює, оскільки конструкція машини, її принцип дії, конструкційні матеріали, потужність, яка витрачається на технологічну операцію і, як наслідок, потужність привода здебільшого визначаються саме фізико-механічними властивостями робочих середовищ.

Робочим середовищем можуть виступати як окремі середовища, так і їх суміші.

Окремі середовища, з якими працює механічне обладнання, поділяються на рідкі, газоподібні і тверді (сипучі).

Суміші цих трьох середовищ складають вже такі робочі середовища, як рідини, емульсії, газові емульсії та піни, суспензії, розчини, сипучі матеріали.

2.2. Рідини

До основних фізико-механічних властивостей рідин належать в'язкість μ (Па·с), щільність ρ (кг/м³) і поверхневий натяг σ (Н/м).

Щільність і поверхневий натяг рідин, з якими працює обладнання в хімічних виробництвах, змінюються у відносно вузьких межах (у 2–3 рази) і великого впливу на гідродинаміку потоків не чинять.

Від значення в'язкості залежить деформаційна поведінка рідин під дією зовнішніх навантажень, а отже, і конструкція робочого органу обладнання.

В'язкість рідин μ – це результат взаємодії внутрішньомолекулярних силових полів, що перешкоджають відносному рухові двох шарів рідини (рис. 2.1). Для переміщення шару один відносно одного треба подолати їх взаємне притягання, причому чим воно більше, тим більша потрібна сила зсуву.

За характером залежності в'язкості від напруження простого зсуву всі рідини поділяють на дві групи: ньютонівські і неньютонівські.

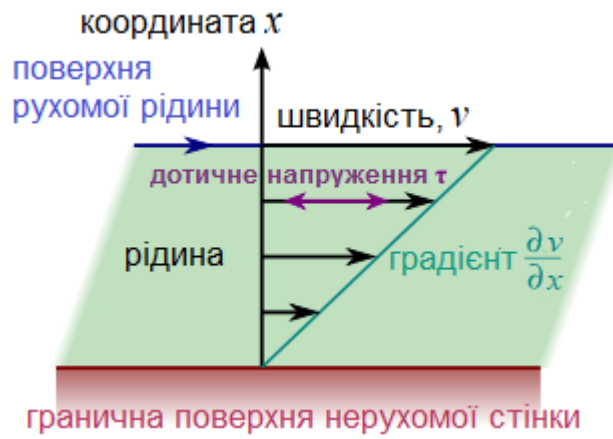


Рис. 2.1. Розподіл швидкості ньютонівської рідини між двома пластинами в умовах ламінарної течії

Ньютонівськими рідинами є такі, в'язкість яких не залежить від дотичного напруження зсуву шарів рідини τ (Па). До таких рідин належить вода.

У ламінарному режимі течії такі рідини підпорядковуються реологічному закону, який запропоновано Ньютоном (див. рис. 2.2, лінія 1):

$$\tau = \mu \cdot dv / dx, \quad (2.1)$$

де dv / dx – градієнт швидкості, який характеризує зміну швидкості на одиниці відстані, 1/с; μ – динамічна в'язкість, Па·с.

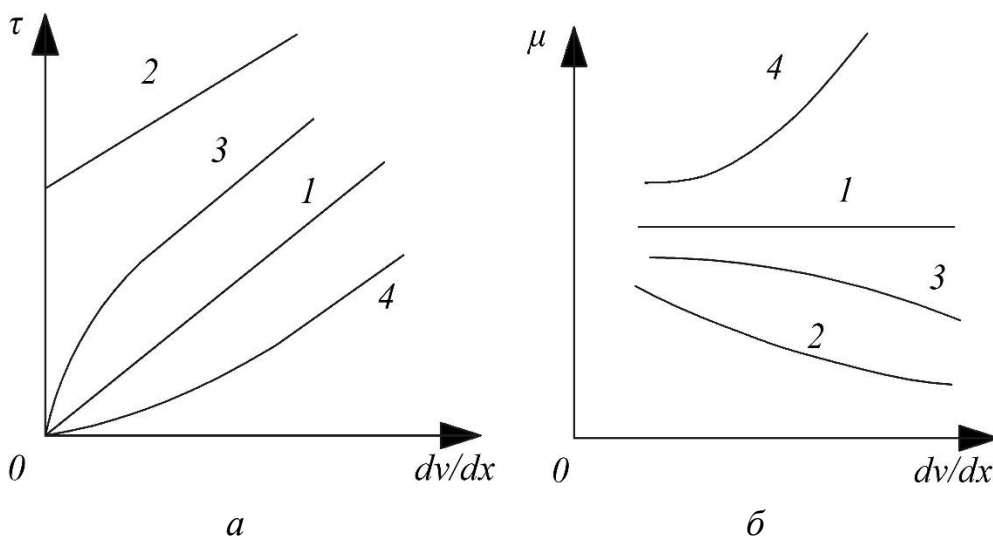


Рис. 2.2. Реологічні криві:
а – текучості; б – в'язкості

Неньютонівськими рідинами називають такі, в'язкість яких залежить від дотичного напруження зсуву шарів рідини, тобто ці рідини не підпорядковуються закону Ньютона у формі, наведеній у рівнянні (2.1).

Неньютонівські рідини поділяються на такі підгрупи: бінгамовські пластичні, псевдопластичні, дилатантні, реопектичні, тиксотропні і в'язкопружні.

До бінгамовських пластичних рідин належать рідини, які мають початкову межу текучості τ_0 , нижче якої вони не є рідкими і проявляють себе як тверді тіла (див. рис. 2.2, лінія 2). Такими рідинами є шлами, масляні фарби, лаки.

Зміна в'язкості таких рідин підпадає під закон Ньютона, якщо $\tau > \tau_0$:

$$\tau = \tau_0 + \mu_{\text{п}} \cdot dv / dx, \quad (2.2)$$

де $\mu_{\text{п}}$ – пластична в'язкість, Па·с.

До псевдопластичних рідин відносять такі, у яких зі збільшеннями швидкості зсуву ефективна в'язкість зменшується (див. рис. 2.2, лінія 3). До таких рідин належать полімерні матеріали, латекси й деякі емульсії.

Зміна в'язкості підпадає під степеневий закон Оствальда:

$$\tau = K(dv / dx)^{m-1}(dv / dx),$$

де K і m – коефіцієнт консистенції і індекс текучості, які є реологічними константами й визначаються експериментально.

Ефективна в'язкість визначається за формулою $\mu_{\text{еф}} = K(dv / dx)^{m-1}$. Оскільки для псевдопластичних рідин зі збільшенням швидкості зсуву $\mu_{\text{еф}}$ зменшується, для них $m < 1$.

Дилатантні рідини є такими, у яких ефективна в'язкість збільшується зі збільшенням швидкості зсуву (див. рис. 2.2, лінія 4). До таких рідин належать суспензії крохмалю, кварцового піску.

Дилатантні рідини також підпорядковуються степеневому закону Оствальда, однак для них $m > 1$.

Реологічні властивості розглянутих вище рідин не залежать від часу. Але є група таких рідин, властивості яких змінні залежно від часу прикладання зусилля. До таких належать реопектичні й тиксотропні рідини.

Ефективна в'язкість реопектичних рідин з плином часу прикладання зусилля збільшується, а для тиксотропних рідин навпаки – ефективна в'язкість зменшується за умови постійності швидкості зсуву.

Подібні властивості таких рідин пов'язані передусім з руйнуванням їх структури і її відновленням. Реологічні криві реопектичних і тиксотропних рідин у початкові моменти зсуву визначаються на спеціальних приладах, а

в інші періоди реологічні властивості описуються законами для бінгамовських пластичних рідин.

Їх потрібно враховувати під час розрахунків пускових характеристик обладнання.

В'язкопружні рідини виявляють і пружні властивості, притаманні твердим тілам, і властивості незворотньої текучості, характерні для рідин. Реологічне рівняння має два параметри: один описує в'язку текучість, а інший – пружні властивості:

$$\tau_{\text{еф}} = \mu_{\text{еф}} \dot{\gamma}_y - (\mu_{\text{еф}} / G) \tau_y,$$

де $\tau_{\text{еф}}$ – напруження в'язкої текучості, Па; G – модуль зсуву, Па; τ_y – напруження пружної деформації, Па; $\dot{\gamma}_y$ – швидкість пружної деформації, м/с.

В'язкість суміші взаєморозчинних ньютонівських рідин визначається за рівнянням:

$$\mu_c = \mu_1(1 - a_2) + \mu_2 a_2,$$

де μ_1 і μ_2 – в'язкість відповідно першої і другої рідини, Па·с; a_2 – вміст другої рідини в частинах від загального об'єму суміші.

Для сумішей із неньютонівських рідин рівняння, наведене вище, не застосовується і їх в'язкість визначається експериментально з використанням візкозиметра.

2.3. Емульсії

Під емульсіями розуміють дисперсну систему, яка складається з двох і більше нерозчинних одна в одній рідин. Одна рідина є суцільною фазою (дисперсійною), а інша, яка перебуває в ній у вигляді крапель, – дисперсною фазою.

Емульсії класифікуються на:

– прямі (типу масло у воді), із краплями неполярної рідини, які розподілені в суцільному полярному середовищі;

– зворотні (типу вода в маслі), з краплями полярної рідини, які розподілені в суцільному неполярному середовищі.

Також бувають емульсії:

– ліофільні – такі, що утворюються мимоволі, це термодинамічно стійкі системи. Високодисперсні системи з розміром крапель $< 10^{-4}$ мм;

– ліофобні – такі, що утворюються під механічною, акустичною або електричною дією середовища, яке змішується. Це термодинамічно нестійкі

системи, які не можуть довго існувати без механічної дії на них або емульгаторів у них. Грубодисперсні системи з розмірами крапель від 10^{-4} до 10^{-1} мм схильні до сегрегування.

За реологічними властивостями залежно від рідин, які входять до їх складу, можуть бути як ньютонівськими, так і неньютонівськими.

Щільність емульсії, якщо щільності її компонентів відрізняються менше ніж на 30 %, приймають рівною щільності суцільної фази. В інших випадках визначають за такою формулою:

$$\rho_e = \rho_d a_d + \rho_c (1 - a_d), \quad (2.3)$$

де ρ_c і ρ_d – щільність суцільної і дисперсної фаз, кг/м^3 ; a_d – об'ємна доля дисперсної фази в емульсії.

В'язкість емульсії з умістом дисперсної фази в долях об'єму $a_d \leq 0,3$ вважають рівною в'язкості суцільної фази.

В інших випадках ($a_d > 0,3$) в'язкість емульсії розраховують за такими формулами:

– якщо в'язкість μ_d дисперсної фази більша за в'язкість μ_c суцільної фази:

$$\mu_e = \frac{\mu_c}{1 - a_d} \left(1 + \frac{6a_d \mu_d}{\mu_c + \mu_d} \right);$$

– якщо в'язкість μ_d дисперсної фази менша за в'язкість μ_c суцільної фази:

$$\mu_e = \frac{\mu_c}{1 - a_d} \left(1 - \frac{1,5a_d \mu_d}{\mu_c + \mu_d} \right).$$

2.4. Газові емульсії та піни

Газові емульсії – це дисперсні системи, які складаються з газових бульбашок (дисперсна фаза) і рідини (дисперсійної фази). Уміст дисперсної фази коливається в межах кількох відсотків (1–9 %), зрідка досягає десятків відсотків.

Газовим емульсіям властиві процеси седиментації і перерозподілення бульбашок газу за розмірами, що обумовлено великою різницею щільностей її фаз.

Найбільшого впливу на властивості такого роду емульсій чинять: температура, тиск і поверхневі властивості рідин на межі з дисперсною фазою.

Основні показники, за якими характеризують дисперсну фазу газових емульсій: уміст газу, дисперсний і хімічний склад газової фази.

Уміст газу в об'ємних долях:

$$\Gamma = V_d / (V_d + V_p),$$

де V_d і V_p – об'єм відповідно дисперсної (газової) і рідкої фаз за однакових температур й тиску, м³.

Щільність газової емульсії:

$$\rho_e = (1 - \Gamma) \cdot \rho_p,$$

де ρ_p – щільність рідкої фази, кг/м³.

У випадках, коли дисперсійним (суцільним) середовищем газової емульсії є неньютонівська рідина, в'язкість газових емульсій вважають рівною в'язкості чистої рідини.

Піни – висококонцентровані дисперсні системи, що складаються з газових комірок, які розділені тонкими плівками рідини. Плівки рідини утворюють жорсткий каркас, унаслідок чого піна має стійкість.

Характеристикою стійкості піни є час, потрібний для повного руйнування всього стовпа піни або його частини (залежно від випробувань).

2.5. Суспензії

Суспензії – дисперсні системи, що складаються з частинок твердої речовини (дисперсна фаза), які, зі свого боку, рівномірно розподілені в рідкому суцільному середовищі (дисперсійній фазі).

Суспензії є грубодисперсними системами. Середній розмір частинок у них зазвичай не менший за 10⁻³ мм. Через це суспензії седиментаційно нестійкі і під дією сил тяжіння або відцентрових сил осідають. Із цієї причини обладнання для перемішування суспензій проектується з урахуванням підтримування відповідної швидкості руху частинки.

Концентрація дисперсної фази в суспензіях зазвичай коливається в межах від 1 до 10 % залежно від розміру, форми й хімічної природи часток і рідини. Саме з такою концентрацією в суспензіях спостерігається явище фіксації просторового розміщення частинок (структурування дисперсних систем) через виникнення контактних зв'язків між ними.

Структурованим суспензіям властиві реологічні властивості неньютонівських рідин, а саме бінгамовських пластичних рідин.

У разі перемішування структурована суспензія може перетворитися в неструктуровану. Зворотнє ізотермічне руйнування і відновлення зв'язків між частинками у структурованому дисперсному середовищі отримало назву тиксотропії, а дисперсні системи з такими властивостями мають назву тиксотропні.

Рівняння реологічних властивостей суспензій аналогічне рівнянню (2.2), з тією лише відмінністю, що пластична в'язкість μ_n замінена на ефективну в'язкість μ_e :

$$\tau = \tau_c + \mu_e \cdot dv / dx,$$

де τ_c – межа напруження зсуву, яке приводить до руйнування структурованої системи, Па.

Якщо $\tau \leq \tau_c$, то структурована суспензія повільно тече, що можна прирівняти до явища повзучості рідини.

Якщо $\tau > \tau_c$, то структура починає руйнуватися, причому руйнування пришвидшується з ростом dv / dx . При цьому в'язкість μ_e постійна до такого значення dv / dx , за якого структура повністю зруйнується і $\tau_c = 0$.

Щільність суспензії розраховується за рівнянням (2.3).

Запитання для самоперевірки

1. З якими робочими середовищами працює механічне обладнання? Як вони класифікуються?
2. Які основні фізико-механічні властивості рідин?
3. На які групи поділяються рідини? Наведіть визначення.
4. Наведіть визначення ньютонівської рідини.
5. Наведіть визначення емульсій. Класифікуйте їх.
6. Якими формулами визначають щільність і в'язкість емульсій?
7. Що таке бінгамовська рідина?
8. Що таке газові емульсії? Яка відмінність газових емульсій від пін?
9. Класифікуйте неньютонівські рідини. Чим вони відрізняються від ньютонівських?
10. Якими формулами визначають газовий склад і щільність газових емульсій?
11. Які рідини і їх реологічні властивості залежать від часу прикладення дії на них?
12. Наведіть визначення суспензій. Класифікуйте їх.

Лекція № 3

3.1. Сипучі матеріали

Під сипучими матеріалами прийнято розуміти таку дисперсну систему, яка складається з твердих часток довільної форми (зазвичай), які перебувають у контакті між собою. Простір між твердими частками заповнено газом, а іноді частково й рідиною.

Основними параметрами, за якими характеризують сипучий матеріал, є його гранулометричний склад і фізичні, а також механічні властивості.

Гранулометричний склад.

Залежно від розмірів діаметрів частинок d сипучий матеріал може бути в таких станах:

- $d < 0,05$ мм (50 мкм) – пиловидний;
- $0,05$ мм $< d < 0,5$ мм (50– 500 мкм) – порошкоподібний;
- $0,5$ мм $< d < 2$ мм – дрібнозернистий;
- 2 мм $< d < 10$ мм – крупнозернистий;
- $d > 10$ мм – кусковий.

Сипкий матеріал не часто складається з частинок однакового розміру. Більша частина технічних сипучих матеріалів є полідисперсними системами, які складаються з різних частинок як за формами, так і за розмірами.

Частинки неправильної форми характеризують еквівалентним діаметром:

$$d_e = 6 / S_y,$$

де S_y – питома поверхня частинки, яка є відношенням площі поверхні частинки S до її об'єму V , мм⁻¹.

Параметр S_y також використовують для характеристики властивостей сипучого матеріалу у випадках, коли вони залежать від площі поверхні частинок (наприклад, теплопровідність, звукопроникність, розчинність, хімічна активність тощо).

Для оцінки ступеня дисперсності сипучих матеріалів, крім власне питомої поверхні частинки S_y , використовують різні характеристики, а саме:

- найбільший d_{\max} і найменший d_{\min} розмір частинок;
- розмах варіювання R , який є відношенням найбільшого розміру частинок до найменшого;
- середній розмір частинок d ;

- гранулометричний склад;
- середньомасовий діаметр.

Середньомасовий діаметр (статистичний середньомасовий діаметр) розраховують за рівнянням:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^k (d_{ei} G_i)}{\sum_{i=1}^k G_i},$$

де d_{ei} – середнє значення еквівалентного діаметра часток i -го класу, мм; G_i – маса часток i -го класу, г; k – число класів (фракцій), на які розбито всю шкалу значень d_e .

Гранулометричний або дисперсний склад сипучого матеріалу – характеристика, що показує, яку долю або відсоток за масою, об'ємом, поверхнею або числом частинок складають частинки визначеного розміру у всій масі проби, яка підлягає аналізу.

Для визначення розподілу частинок за розмірами потрібно використовувати методи, що дають змогу зібрати дані про розміри великої кількості частинок (зазвичай не менше ніж 200 частинок) або масу фракцій, а потім опрацювати ці дані згідно із законами статистики. Такими методами є: оптична й електронна мікроскопія, седиментація у гравітаційному та відцентровому полі, ситовий аналіз і деякі інші.

Результати дисперсійних аналізів можуть бути зображені графічно у вигляді інтегральних і диференціальних кривих розподілу частинок за розмірами. На гранулометричному графіку осі абсцис відкладається лінійний розмір (d) вимірюваних частинок. У разі інтегрального графіка розподілу (рис. 3.1) розмірів частинок по осі ординат відкладаються об'ємні частки (Q) частинок, розмір яких менший за поточний. Таким чином, інтегральна крива розподілу є функцією $Q = f(d)$.

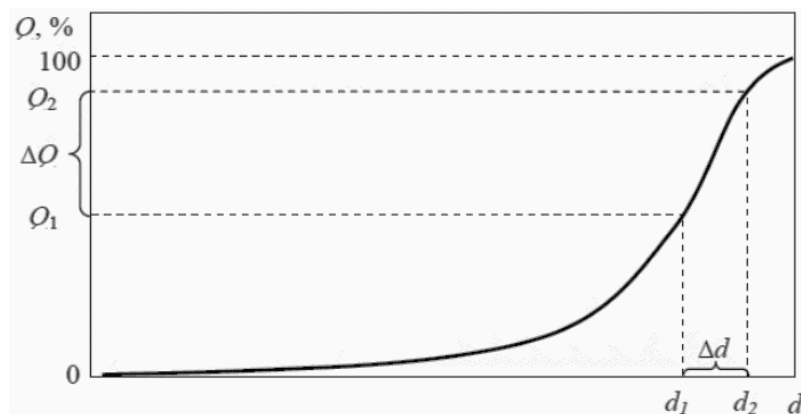


Рис. 3.1. Графік дискретних розподілів в інтегральній формі

Наприклад, якщо нас цікавить об'ємна частка частинок порошку, розмір яких менше за d_1 , то для цього потрібно знайти на нижній шкалі розмір d_1 , провести вертикальну пряму з цієї точки до перетину з інтегральною кривою розподілу. Ордината отриманої точки перетину і покаже ту об'ємну частку, яку займають частинки порошку, розмір яких менший за d_1 , у нашому випадку це Q_1 . Інтервалу розмірів частинок від d_1 до d_2 відповідає інтервал об'ємних часток від Q_1 до Q_2 .

Якщо розбити інтегральну криву на інтервали по осі абсцис, відклавши відповідні ординати точок перетину вертикальних ліній з інтегральною кривою, то для кожного інтервалу Δd_i ми отримаємо ряд інтервалів ΔQ_i , причому:

$$\sum_{i=1}^k \Delta Q_i = 100 \%,$$

де k – кількість виділених інтервалів (фракцій) розмірів частинок.

Інтервали об'ємних часток можна подати у вигляді стовпчиків з висотою $F_i = \Delta Q_i$, у такому разі ми отримаємо диференціальну гістограму розподілу частинок за розмірами (рис. 3.2).

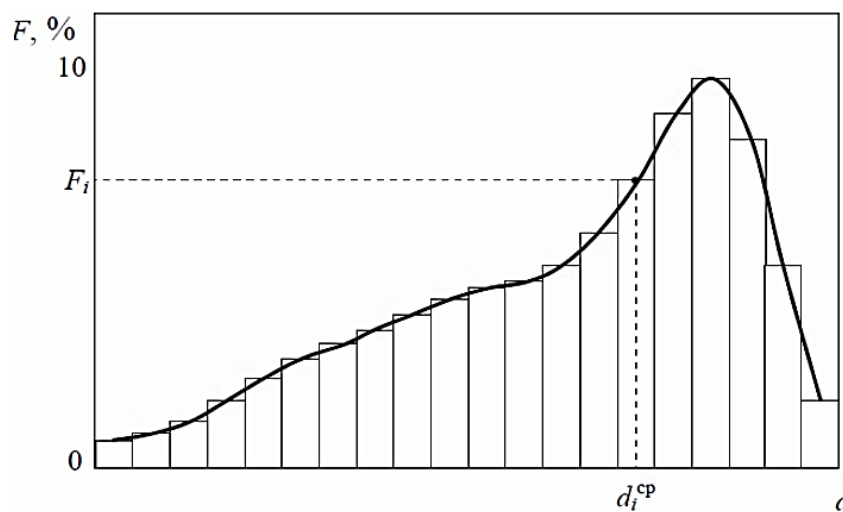


Рис. 3.2. Гістограма дискретних розподілів у диференціальній формі

Поєднавши середини верхніх основ стовпчиків диференціальної гістограми розподілу, ми отримаємо плавну диференціальну криву. Вона означає, що частинки із середніми розмірами, укладеними між правим і лівим краєм одного стовпчика (d_{icp}), займають F_i , % за об'ємом вимірюваного матеріалу.

Фізичні властивості

Гігроскопічність сипучого матеріалу – це його властивість сорбувати пароподібну воду з повітря, %:

$$W_{\Pi} = [(m_{\text{в}} - m_{\text{с}}) / (m_{\text{с}} - m_{\text{б}})]100,$$

де $m_{\text{в}}$, $m_{\text{б}}$, $m_{\text{с}}$ – маса проби сипучого матеріалу з бюксою, бюкси і бюкси з висушеною пробою сипучого матеріалу, г.

Щільність (абсолютна) ρ_a сипучого матеріалу – маса одиниці об'єму матеріалу, з якого складаються частинки.

Насипна щільність ρ_n сипучого матеріалу – маса одиниці об'єму, який займає матеріал у разі вільного засипання його у вимірювальну склянку.

Пористість шару сипучого матеріалу є відношенням вільного об'єму V_1 простору між частинками в шарі сипучого матеріалу до об'єму V_0 :

$$\varepsilon = V_1 / V_0.$$

Або з врахуванням насипної і абсолютної щільності матеріалу пористість визначається:

$$\varepsilon = 1 - \rho_a / \rho_n.$$

Коефіцієнт ущільнення характеризує зміну структури шару під дією стискального навантаження:

$$K_y = \rho_{\text{пр}} / \rho_n,$$

де $\rho_{\text{пр}}$ – насипна щільність сипучого матеріалу після пресування, кг/м³.

Також до фізичних властивостей сипучого матеріалу належать такі: температура плавлення і спалахування, вибухо- і пожежонебезпечність.

Механічні властивості

Між частинками сипучого матеріалу існують сили взаємодії різної природи. Ці сили називають аутогезією. Цей термін охоплює такі поняття: адгезія, когезія, агломерація, агрегація, злежуваність.

Адгезія – взаємодія частинок і твердої поверхні стінок і робочих органів обладнання.

Когезія – зв'язок між молекулами, який приводить до утворення єдиного твердого тіла.

Агломерація – процес укрупнення частинок унаслідок спікання.

Агрегація – самовільне укрупнення частинок.

Злежуваність – поява сил взаємодії між частинками внаслідок появи кристалізаційних містків між частинками або капілярних сил. Ця властивість у сипучих матеріалів проявляється в разі довготермінового їх зберігання, при цьому вони з часом втрачають свою текучість. Визначають методикою визначення злежуваності за опором P руйнуванню спресованого брикету з проби сипучого матеріалу. За цією методикою сипучі матеріали за злежуваністю поділяються на такі категорії:

- не проявляють властивостей злежування ($P < 0,1$ МПа);
- низький ступінь злежуваності ($P = 0,1 \dots 0,2$ МПа);
- середній ступінь злежуваності ($P = 0,2 \dots 0,7$ МПа);
- високий ступінь злежуваності ($P = 0,7 \dots 1,5$ МПа);
- дуже високий ступінь злежуваності ($P > 1,5$ МПа).

Кутом природного укусу α називається кут нахилу твірної конуса, отриманого в разі висипання з воронки без динамічної дії визначеної порції сипучого матеріалу на горизонтальну поверхню. Значення кута α залежить від аутогезійних сил між частинками. Зазвичай для сипучих матеріалів кут α становить від 22 до 44 градусів.

Здатність сипучого матеріалу (у цьому випадку металічних порошків) витікати з отворів у стінках обладнання оцінюють коефіцієнтом текучості K_T :

$$K_T = tr^{2,58} / G,$$

де r – радіус воронки в циліндричній частині, мм, G – маса сипучого матеріалу, який засипають у воронку, г, t – час витікання порошку з каліброваної воронки, с.

Міцність – властивість гірської породи чинити опір руйнуванню в разі виникнення внутрішніх напружень, які з'являються внаслідок навантаження. Міцність матеріалів характеризується межею міцності на стиск σ_{cm} .

Матеріали за межею міцності на стиск σ_{cm} діляться на такі категорії:

- особливо міцні – > 250 МПа;
- міцні – $150\text{--}250$ МПа;
- середньої міцності – $80\text{--}150$ МПа;
- малої міцності – < 80 МПа.

Абразивність – здатність матеріалу, який переробляється, зношувати робочі органи машин. Абразивність гірських порід важливо знати для визначення сфери використання обладнання, періодів зміни зношених частин машин і розрахунку економічних затрат на обслуговування. Абразивність вимірюється у грамах зносу еталонних бил до 1 тонни переробленого матеріалу. Класифікацію гірських порід залежно від їх абразивності наведено в табл. 3.1.

Шкала для оцінки абразивності гірських порід

Клас абразивності	Категорія абразивності	Показник абразивності, г/т	Матеріал
Неабразивні	0	1	Тальк, аргіліт, чисте кам'яне вугілля
Мало-абразивні	I	1–2	Вапняк, мрамур, алевроліт, аргіліт, кам'яне вугілля, дрібнозернистий піщаник
	II	2–4	
	III	4–8	
Середньо-абразивні	IV	8–16	Вапняк середньої абразивності, піщаник, сидерит
	V	16–32	
	VI	32–65	
Високо-абразивні	VII	6–130	Граніт, базальт, кварцит, гравій із вивержених порід, вапняк високої абразивності
	VIII	130–250	
	IX	250–500	
Дуже високо-абразивні	X	> 500	Роговик, залізні руди, шлак із печей

3.2. Розчини

У складі розчинів можуть бути одночасно такі фази: рідка, газоподібна і тверда. Унаслідок взаємодії цих компонентів під впливом робочих параметрів обладнання утворюються бетонні суміші й розчини, бетон, цегла, керамічні камені та багато інших. Якщо бетонні суміші й розчини є вихідними робочими середовищами, то бетон, керамічні вироби – це кінцевий продукт технологічних процесів створення будівельних і оздоблювальних матеріалів і конструкцій [10].

Розчини розглянемо на прикладі бетонних сумішей, які являють собою раціонально підібрані і змішані між собою компоненти: в'язучі, наповнювачі, вода й хімічні добавки. Унаслідок взаємодії цих компонентів між собою і після видалення з розчину зайвої кількості води й залишків повітря через деякий час утворюється будівельний матеріал – бетон.

В'язучі речовини для різного роду розчинів бувають неорганічні (цемент, вапно, гіпс) і органічні (бітуми, дьогті).

Зі свого боку неорганічні в'язучі поділяються на повітряні і гідравлічні. Повітряні – це такі, які тверднуть і зберігають свою міцність

тільки на повітрі (повітряне вапно, гіпс тощо). Гідравлічні спроможні тверднути, довго зберігати й підвищувати міцність не тільки на повітрі, а й у воді (різні види цементів, гідравлічне вапно тощо).

Основними фізико-механічними властивостями розчинів є такі: середня щільність, пористість, рухомість і жорсткість.

Середня щільність ρ_{cp} – це маса одиниці об'єму матеріалу з порами й мікротріщинами. За показниками середньої щільності бетонні розчини поділяються на:

- важкі $\rho_{cp} = 2200 \dots 2400 \text{ кг/м}^3$;
- середні $\rho_{cp} = 1200 \dots 2200 \text{ кг/м}^3$;
- легкі $\rho_{cp} = 800 \dots 1200 \text{ кг/м}^3$.

Рухомість і жорсткість розчинів і сумішей – характеристики, які визначають зручність укладання розчину у форму чи опалубку, де здійснюється процес їх ущільнення.

Рухомість оцінюють за допомогою конуса (рис. 3.3, а), у який трьома шарами укладають бетонну суміш. Потім конус знімають і за різницею висот у сантиметрах (рис. 3.3, б) визначають показник рухомості.

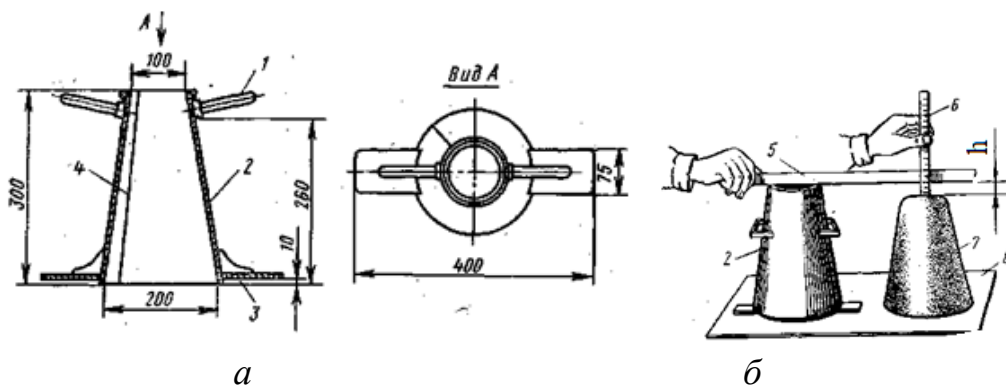


Рис. 3.3. Оцінка рухомості бетонної суміші спрощеним методом:
а – розміри конуса; б – конус і суміш

Якщо суміш не осідає, то її зручність укладання оцінюють за допомогою спеціального віскозиметра.

Жорсткість суміші визначається за допомогою вібромайданчика із закріпленою на ньому формою 200 x 200 x 200 мм для бетонної суміші. У форму встановлюють конус і заповнюють його бетонною сумішшю. Після заповнення сумішшю конус обережно прибирають і одночасно з цим умикають вібромайданчик із секундоміром. Той час у секундах, протягом якого суміш займе кути форми, а її поверхня стане горизонтальною, і є жорсткість бетонної суміші.

Класифікацію бетонних сумішей за рухомістю і жорсткістю наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Класифікація бетонних сумішей

Позначення		Умовна назва	Жорсткість, с	Рухомість, см
українське	міжнародне			
Ж4	V ₃	Особливо жорстка	≥ 31	-
Ж3	V ₂	Підвищено жорстка	30...21	-
Ж2	V ₁	Жорстка	20...11	-
Ж1	V ₀	Малорухома	10...5	-
П1	S ₁	Рухома	-	1...4
П2	S ₂	Пластична	-	5...9
П3	S ₃	Дуже пластична	-	10...15
П4	S ₄	Лита	-	≥ 16

В інший спосіб визначення рухомості розчину використовується спеціальний пристрій у вигляді перевернутого конуса вагою 300 г висотою 150 мм і кутом з вершиною 30° (рис. 3.4). Пристрій занурюють під дією власної ваги в розчин. Глибина занурення й характеризує рухомість розчину.

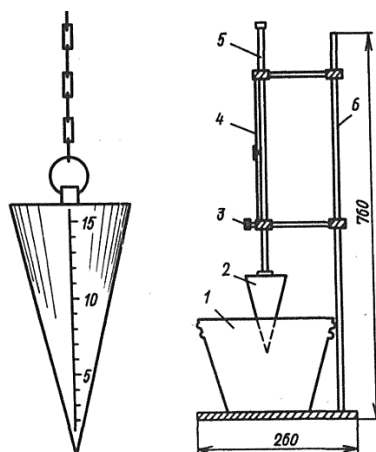


Рис. 3.4. Конус для визначення рухомості розчину спрощеним методом

Розчини також характеризуються маркою, яка визначає міцність будівельних матеріалів, виготовлених із цього розчину. Міцність – це

здатність матеріалу чинити опір деформації та руйнуванню від дії сил, що виникають під впливом робочих органів машин. Найбільш поширеною та універсальною оцінкою механічних властивостей матеріалів є межа міцності на стиск, Па:

$$\sigma_{\text{ст}} = F/S,$$

де F – зусилля, Н; S – початкова площа поперечного перерізу, м².

Для визначення марки розчину з нього виготовляють зразки-куби розміром 70,7 x 70,7 x 70,7 мм. Зразки тверднуть на повітрі протягом 28 діб за температури (20 ± 5) °С. Щоб наблизити умови твердіння зразків до реальних умов твердіння розчинів кладки, використовують форми без дна і встановлюють їх на пористу основу (цеглу).

За міцністю на стиск, виражений у МПа, будівельні розчини поділяють на марки. Марка розчину 4 має міцність зразка-куба на стиск 0,4 МПа, а для марки розчину 200 – 20 МПа.

Характер і величина деформації матеріалу під дією зовнішніх сил залежать від пружності матеріалу, що деформується. Коефіцієнт пропорційності між межею міцності на стиск і деформацією називається модулем пружності, Па:

$$E = \sigma_{\text{ст}}/\varepsilon,$$

де ε – значення відносної деформації.

Це відношення дійсне в межах дії закону Гука. Значення відносної деформації визначається як відношення модуля зміни довжини внаслідок деформації Δl до початкової довжини зразка l .

Запитання для самоперевірки

1. Що таке розчини і якими параметрами вони характеризуються?
2. Як визначають рухомість розчинів?
3. Як визначають жорсткість розчинів?
4. Наведіть визначення сипучих матеріалів.
5. Дайте визначення поняття «гранулометричний склад сипучого матеріалу».
6. Що таке гігроскопічність сипучого матеріалу і як вона визначається?
7. Наведіть визначення поняття «деформація матеріалу». Від чого залежать величина і характер деформації матеріалу?

Тема 3. ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Лекція № 4

4.1. Процес подрібнення і його характеристики, класифікація

Подрібнення – процес зменшення розмірів кусків твердого матеріалу під механічною дією. Набув широкого розповсюдження в різних технологічних процесах, зокрема і в хімічній промисловості. Подрібнення потрібне для того, щоб створити велику питому поверхню матеріалу, тоді хімічні реакції перебігають інтенсивніше.

Якщо внаслідок подрібнення одержують готову продукцію, процес називають остаточним, а якщо подрібнений матеріал і надалі перероблятимуть – процес підготовчий.

Одним з основних показників процесу подрібнення, що характеризує роботу як окремого обладнання, так і всієї системи для подрібнення матеріалу, є ступінь дроблення i . Під ступенем дроблення мається на увазі співвідношення середньозваженого розміру кусків вихідного матеріалу D_{cp} і середньозваженого розміру кусків кінцевого продукту d_{cp} після проходження через обладнання або їх комплект [6]:

$$i = D_{cp} / d_{cp}.$$

Ступінь подрібнення варіюється в межах від 2 до 1000, що визначає класифікацію процесу подрібнення й обладнання, яке при цьому використовують, а також його кількість.

Залежно від розмірів кусків або кінцевого продукту подрібнення поділяють на грубе (дроблення) і тонке (помел):

– грубе (дроблення) – ступінь подрібнення варіюється в межах від 2 до 50;

– тонке (помел) – ступінь подрібнення варіюється в межах від 5 до 1000.

Більш детальну інформацію про види подрібнення залежно від розмірів кусків вихідного і кінцевого продукту та ступеня подрібнення наведено в табл. 4.1 [2].

Основними фізико-механічними властивостями подрібнюваного матеріалу є міцність, абразивність і щільність. Ці властивості впливають на вибір типу циклу подрібнення і кількості стадій подрібнення в технологічній схемі, способу механічного подрібнення, виду обладнання, а також матеріалу робочих органів обладнання.

Види подрібнення залежно від розмірів кусків вихідного і кінцевого продукту та ступеня подрібнення

Види подрібнення	Розмір кусків, мм		Ступінь подрібнення
	до подрібнення	після подрібнення	
Дроблення			
Крупне	1500–350	350–100	2–5
Середнє	350–100	100–40	5–10
Дрібне	100–40	40–5	10–50
Помел			
Грубий	40–20	5–0,1	5–100
Тонкий	до 5	0,1–0,005	≈ 100
Дуже тонкий (надтонкий)	до 5	0,005–0,001	> 100

Ступінь подрібнення за один підхід зазвичай не перевищує наведених значень у таблиці 4.1. Для досягнення більшого ступеня процес подрібнення проектується багатостадійним із послідовних переходом від крупного дроблення до дрібного й до помелу з розділенням матеріалу за класами.

Число стадій подрібнення призначають з огляду на загальний ступінь подрібнення. Наприклад, із загальним ступенем подрібнення $i_{заг} = 36$ потрібно застосувати декілька стадій подрібнення з такими ступенями: $i_1 = 4$, $i_2 = 9$, тоді $i_{заг} = i_1 \cdot i_2 = 36$.

Подрібнення може відбуватися за двома основними видами циклів: відкритим (рис. 4.1, а) і закритим (рис. 4.1, б) [11].

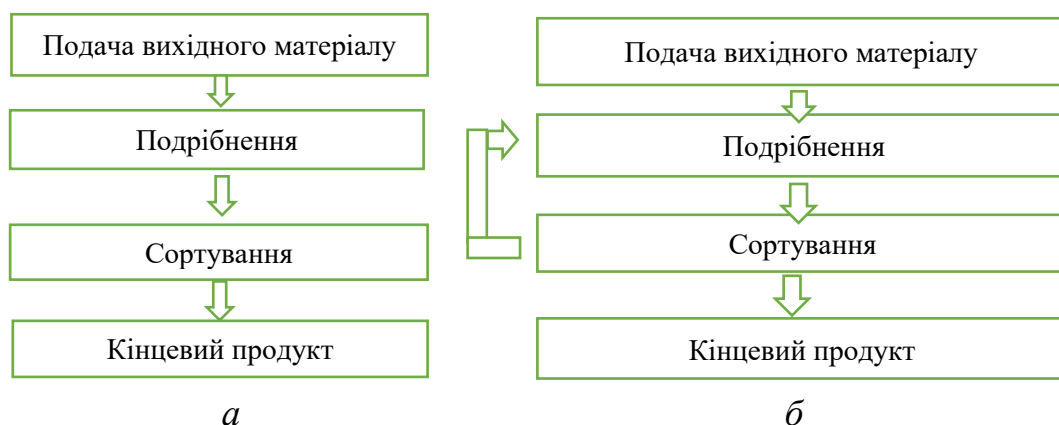


Рис. 4.1. Схеми циклів подрібнення

У разі потреби в попередньому (контрольному) сортуванні: відкритий цикл із попереднім сортуванням (рис. 4.2, а) і закритий зі спільним попереднім і фінальним сортуванням (рис. 4.2, б).



Рис. 4.2. Схеми циклів подрібнення з попереднім (контрольним) сортуванням

Схеми основних способів механічного подрібнення залежно від характеру дії сил на матеріал наведено на рис. 4.3.

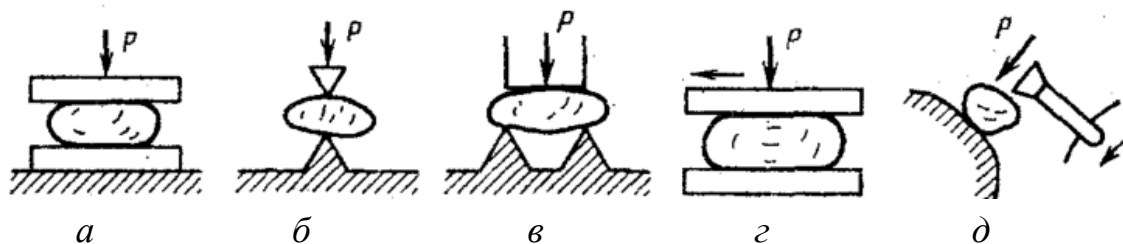


Рис. 4.3. Схеми основних способів механічного подрібнення:
а – раздавлювання; б – розколювання; в – злам; г – стирання; д –ударом

Ці види силової дії у процесі подрібнення проявляються одночасно, однак залежно від конструкції машини й виду подрібнення зазвичай переважає той чи інший характер дії сил.

Міцні і крихкі матеріали доцільно дробити раздавлюванням і зломом, міцні і в'язкі – раздавлюванням і стиранням. Крупне дроблення м'яких і крихких матеріалів доцільно виконувати розколюванням, середнє і дрібне – ударом.

Помел матеріалів виконують зазвичай ударом і стиранням.

Основні фактори, від яких залежить витрата енергії на одиницю подрібненої продукції, – твердість матеріалу, його вологість і в'язкість, стан поверхні, розмір і форма шматків, розміщення їх між робочими органами

обладнання й ін. [13]. Через таку велику кількість факторів процес подрібнення важко піддається обліку й математичному опису, тому єдиної універсальної теорії подрібнення немає. Науковцями Л. Б. Левінсоном, В. Л. Кірпічовим, П. Риттінгером, Ф. Кіком, Г. Г. Єгоровим, З. В. Канторовичем та іншими було зроблено кілька основоположних істотних внесків у вирішення цієї проблеми.

Найчастіше для визначення кількості енергії, потрібної для подрібнення матеріалу, використовують два теоретичні підходи: поверхнева теорія подрібнення, запропонована П. Риттінгером у 1867 р., і об'ємна теорія, запропонована В. Л. Кірпічовим у 1874 р. і Ф. Кіком у 1885 р.

Поверхнева теорія. В основу теорії покладено гіпотезу: робота, затрачувана на подрібнювання тіла, прямо пропорційна площі новоутворених поверхонь ΔF :

$$A = K_1 \Delta F,$$

де K_1 – коефіцієнт пропорційності, Дж/м².

Величину ΔF можна виразити через початкові $d_{\text{п}}$ і кінцеві $d_{\text{к}}$ розміри кусків подрібнюваного матеріалу. Якщо припустити, що куски мають форму куба з розміром ребер $d_{\text{п}}$ до і $d_{\text{к}} = d_{\text{п}}/i$ після подрібнення, площа початкової поверхні куба (куска матеріалу) $F_{\text{п}} = 6d_{\text{п}}^2$, кінцевої – $F_{\text{к}} = 6(d_{\text{п}}/i)^2$, то можна визначити:

$$\Delta F = F_{\text{к}} - F_{\text{п}} = 6d_{\text{п}}^2(i - 1).$$

Якщо йдеться про подрібнення $Q(\text{м}^3)$ матеріалу із середнім розміром кусків $d_{\text{п}}$, загальна кількість подрібнених частинок дорівнює $Q/d_{\text{п}}^3$, а робота подрібнення:

$$A = 6K_1 Q(i - 1) / d_{\text{п}}.$$

Теорія Риттінгера не враховує зміни форми тіл під час подрібнення, через що вона не придатна для опису процесів дроблення у випадках, коли готовий продукт має малу питому поверхню.

Об'ємна теорія. Об'ємна теорія оснований на тому, що на подрібнюваний шматок матеріалу діють зовнішні сили, які зумовлюють у матеріалі напруження, що дорівнює межі міцності на стиск. Отже, робота витрачається на деформацію матеріалу. З теорії пружності відомо, що робота деформації під час стискання [5]:

$$A = \sigma^2 V / 2E,$$

де σ – межа міцності на стиск, МПа; V – об'єм подрібнюваного матеріалу, мм³; E – модуль пружності, МПа.

Прийнявши за елемент, який підлягає деформуванню, куб із розміром $d_{\text{п}}$, отримаємо $V = d_{\text{п}}^3$ і звідси $A = K_2 d_{\text{п}}^3$, де K_2 – коефіцієнт пропорційності. Якщо йдеться про подрібнення Q (м^3) матеріалу із середнім розміром кусків $d_{\text{п}}$, загальна кількість подрібнюваних частинок дорівнює $Q/d_{\text{п}}^3$, а робота подрібнення:

$$A = K_2 \cdot Q.$$

Об'ємну теорію варто застосовувати для опису процесів подрібнення, у яких енергія витрачається на деформацію, а поверхневу теорію — для опису процесів помелу, у яких переважає стирання з інтенсивним утворенням нової поверхні.

Академік П. Ребіндер запропонував узагальнену формулу опису процесу подрібнювання:

$$A = K \Delta V + \sigma \Delta F,$$

де K і σ – коефіцієнти пропорційності; ΔV і ΔF – деформований об'єм і новоутворена поверхня.

Узагальнена теорія, з інженерного погляду, непридатна для вирішення конкретних завдань, тому що вимагає точного визначення коефіцієнтів для кожного матеріалу.

4.2. Класифікація обладнання для подрібнення

Оскільки процес подрібнення залежно від крупності продукту на вході і після подрібнення, а також результуючого ступеня подрібнення поділяється на дроблення і помел, то й обладнання, зі свого боку, поділяється на дробарки і млини (подрібнювачі).

За конструктивними ознаками дробарки (рис. 4.4) бувають: щоківні (щелепні), конусні, валкові, ударної дії (роторні, молоткові).

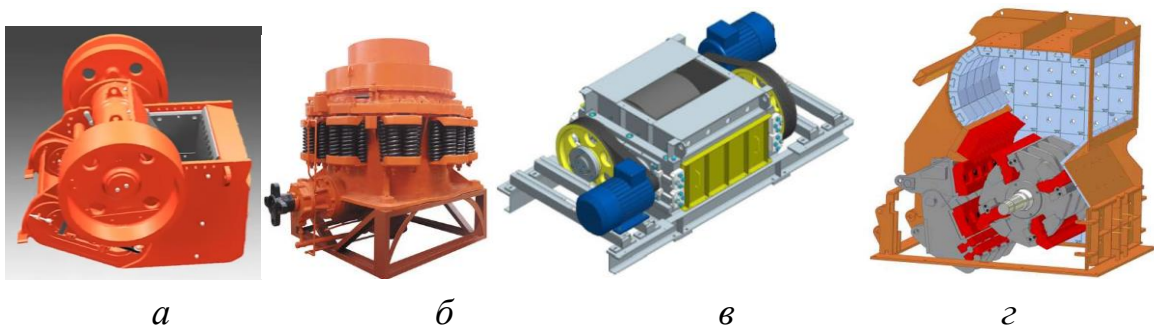


Рис. 4.4. Обладнання для дроблення:
 а – щоківна (щелепна) дробарка; б – конусна дробарка;
 в – валкова дробарка; г – дробарка ударної дії

Млини (рис. 4.5) поділяють на барабанні (тихохідні), середньохідні (роликові, маятникові, кільцеві тощо), ударні (молоткові, вертикальні, шахтові тощо), вібраційні і струйні.

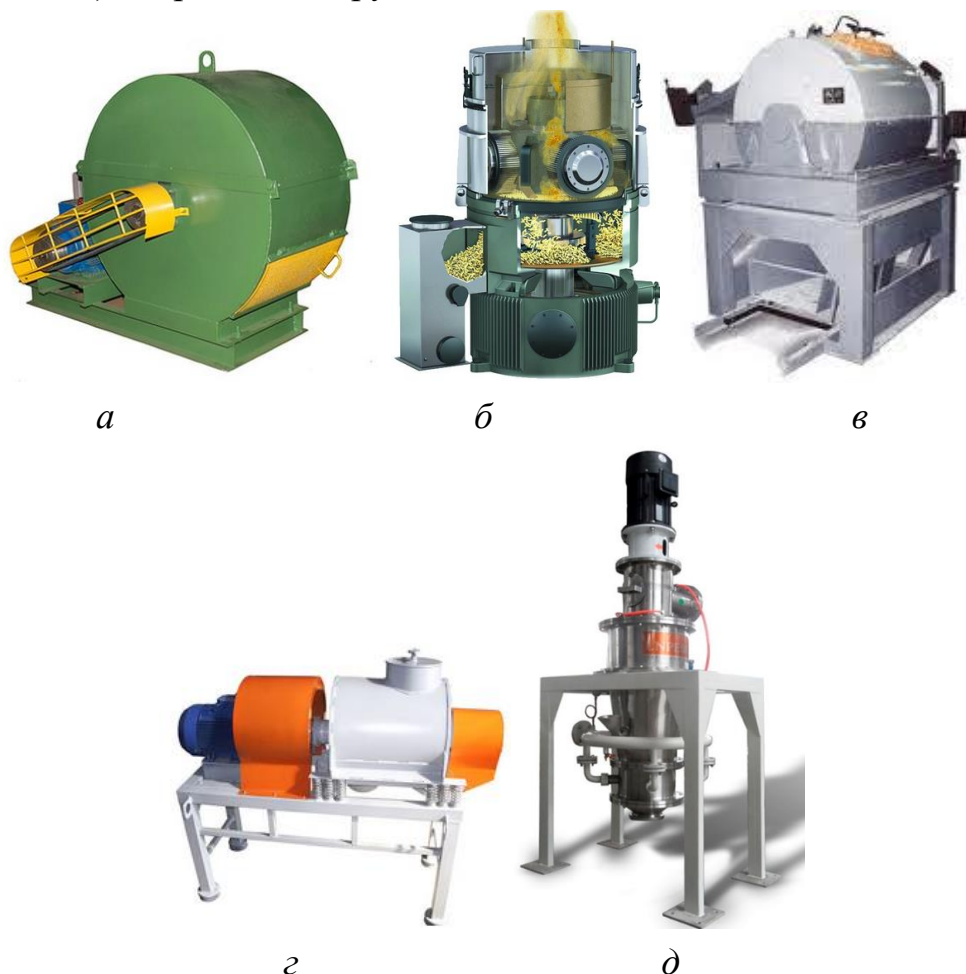


Рис .4.5. Обладнання для помелу:

a – барабанний млин; *б* – середньохідний роликовий млин;
в – ударний млин; *г* – вібраційний млин; *д* – струйний млин

Пальцеві подрібнювачі й бігуни можна використовувати як для дрібного дроблення, так і для грубого помелу, тому вони займають проміжне положення між дробарками та млинами.

Запитання для самоперевірки

1. Наведіть визначення процесу подрібнення і ступеня подрібнення.
2. Чим відрізняється помел від дроблення?
3. Від яких фізико-механічних властивостей вихідного продукту залежить вибір машин для подрібнення? Опишіть кожен із них.
4. Наведіть основні схеми циклів подрібнення й опишіть основні їх етапи.

Лекція № 5

5.1. Принцип дії і параметри механічного режиму щоккових (щелепних) дробарок

Щоккові дробарки здебільшого призначені для крупного й середнього дроблення матеріалів середньої і високої міцності. Основними перевагами такого обладнання є простота конструкції і висока продуктивність дроблення. Дроблення в щоккових дробарках відбувається між рухомою і нерухою щоками внаслідок роздавлювання шматків матеріалу, який надходить у завантажувальний отвір. Матеріал після дроблення вивантажується через розвантажувальний отвір під дією гравітаційних сил у момент відходу рухомої щоки [2].

Класифікуються щоккові дробарки за характером руху робочого органу (рухомої щоки), оскільки саме це й визначає найважливіші техніко-експлуатаційні параметри дробарок. За принциповими кінематичними схемами дробарки бувають із простим і складним рухом щоки.

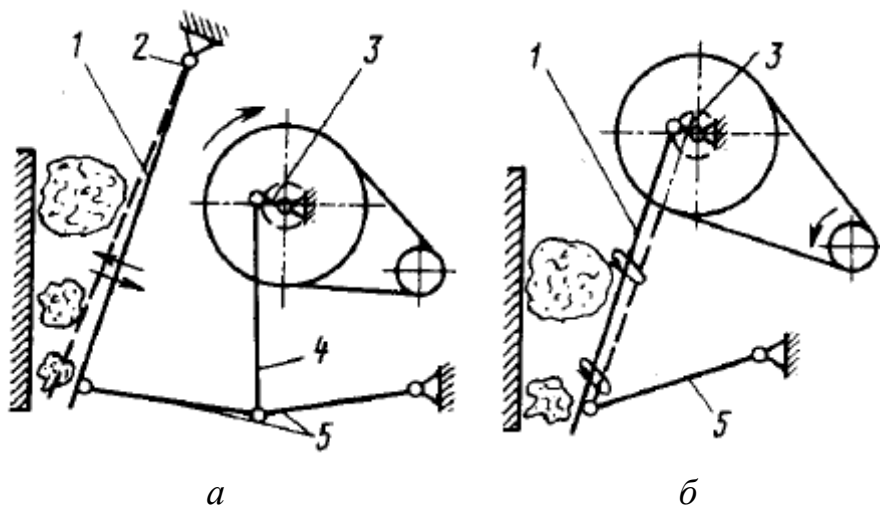


Рис. 5.1. Принципові схеми щоккових дробарок:

a – з простим рухом рухомої щоки;

б – зі складним рухом рухомої щоки

У дробарках із простим рухом щоки (ЩДП) (рис. 5.1, *a*) рухома щока 1 підвішена на осі 2. Щока виконує хитні рухи, траєкторії точок щоки при цьому русі є дугами кола. Хитний рух щоці 1 передає ексцентриковий вал 3, який обертається, через шатун 4 і розпірні плити 5.

Зі зближенням щік матеріал дробиться, а з відходом їх одна від одної куски матеріалу опускаються вниз і випадають із камери, якщо їх розміри менше за розміри розвантажувального отвору. Після цього цикл

повторюється. Матеріал при цьому подрібнюється роздавлюванням і частково зламом.

У дробарок зі складним рухом щоки (ЩДС) (рис. 5.1, б) важільний механізм має простішу схему. Ексцентриковий вал 3 безпосередньо з'єднаний із шатуном, який є рухомою щокою 1 дробарки. Нижнім кінцем щока шарнірно опирається на розпірну плиту 5. Щока виконує складний рух, і складові переміщення точок її поверхні спрямовані як по нормалі до поверхні щоки, так і вздовж неї. Траєкторії руху точок щоки нагадують за формою еліпси. Матеріал подрібнюється як роздавлюванням, так і стиранням, що полегшує процес дроблення в'язких матеріалів.

Основні розміри дробарки (рис. 5.3):

- ширина приймального отвору з максимальним відходом рухомої щоки, B ;
- довжина камери подрібнення, L ;
- висота робочої камери нерухомої щоки, H ;
- мінімальний розмір камери подрібнення в нижній частині або ширина розвантажувального отвору, S .

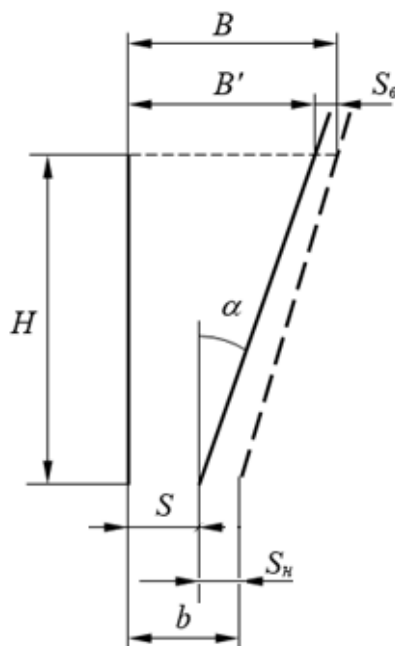


Рис. 5.3. Схема геометричних розмірів щокової дробарки

Типорозмір дробарки характеризується шириною B , за якою оцінюють максимально можливу крупність кусків, що підлягають подрібненню: $D_{max} = 0,85 \cdot B$. Між висотою робочої камери H і шириною B існує така залежність:

$$H = (2,0 \dots 2,5)B.$$

Параметри механічного режиму щоківих дробарок:

- кут захоплення α , град;
- частота обертання привідного вала ω , рад/с;
- хід рухомої щоки у верхній S_B і нижній S_H точках камери дроблення, мм;
- продуктивність P , м³/год;
- потужність P , кВт.

Кут захоплення α між рухомою і нерухомою щоками впливає на інтенсивність процесу подрібнення. З підвищеними значеннями кута матеріал, що подрібнюється, виштовхується з камери подрібнення, а з малими – зменшується ступінь подрібнення матеріалу і збільшується висота дробарки. Через це існують раціональні значення кута, які визначається умовою, щоб камінь надійно утримувався й не виштовхувався вгору.

Умова захоплення матеріалу:

$$2Ff \cos(\alpha / 2) \geq 2F \sin(\alpha / 2),$$

де F – зусилля, які прикладені до матеріалу під час дроблення, Н;
 f – коефіцієнт тертя.

Звідки

$$f = \operatorname{tg} \varphi \geq \operatorname{tg}(\alpha / 2) \text{ або } \varphi \geq \alpha / 2.$$

Звідси кут захоплення матеріалу α :

$$\alpha \leq 2\varphi.$$

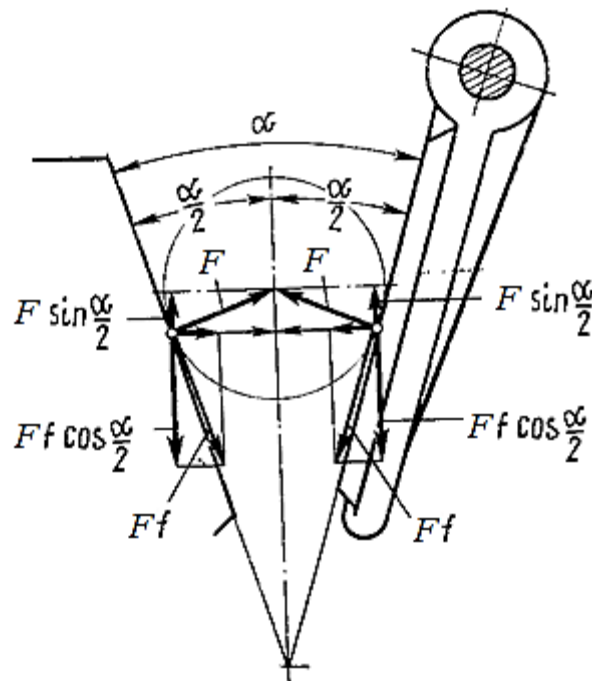


Рис. 5.4. Схема для визначення кута захоплення щоківих дробарок

Зазвичай у щоккових дробарках значення кута захоплення беруть у межах $\alpha = 18 \dots 22^\circ$.

Хід рухомої щоки для дробарок з простим рухом щоки:

– у верхній точці:

$$S_B = (0,01 \dots 0,03)B;$$

– у нижній точці:

$$S_H = 8 + 0,26 \cdot S.$$

Хід рухомої щоки для дробарок зі складним рухом щоки:

– у верхній точці:

$$S_B = (0,03 \dots 0,06)B;$$

– у нижній точці:

$$S_H = 7 + 0,1 \cdot S.$$

Оптимальна частота обертання ексцентрикового вала щоккової дробарки, рад/с:

$$\omega = \frac{4}{\sqrt{S_H}}.$$

Продуктивність щоккових дробарок, м³/год:

$$\Pi = \frac{3600 \cdot \mu \cdot n \cdot L \cdot S_H \cdot d_{\text{сер}}}{\text{tg} \alpha},$$

де $\mu = 0,4 \dots 0,6$ – коефіцієнт розпушення, який враховує нещільне розміщення часток подрібненого матеріалу в камері дроблення; n – частота обертання привідного вала, об/с.

Потужність двигуна для щоккових дробарок, кВт:

– з простим рухом щоки:

$$P = 720L \cdot H \cdot r \cdot n;$$

– зі складним рухом щоки:

$$P = 700L \cdot H \cdot m \cdot n,$$

де $m = 0,56 \dots 0,6$ – конструктивний коефіцієнт; r – ексцентриситет привідного вала, м.

5.2. Принцип дії і параметри механічного режиму конусних дробарок

Конусні дробарки використовують для крупного, середнього і дрібного дроблення міцних і абразивних матеріалів, різних за крупністю. Обладнання руйнується в камері, яка утворюється зовнішнім нерухомим і внутрішнім рухомим конусами. Переважаючий вид навантаження на

матеріал – роздавлювання. За технологічним призначенням поділяються на дробарки: крупного дроблення (ККД), які забезпечують ступінь подрібнення 5...8; середнього (КСД) і дрібного (КМД) зі ступенем подрібнення 20...50. У хімічній промисловості найчастіше використовують дробарки КСД і КМД.

За конструктивною ознакою – способом обпирання вала конуса дроблення – дробарки бувають із підвішеним валом (рис. 5.5, а), опорною п'ятою (рис. 5.5, б) і з консольним валом (рис. 5.5, в). Остання конструкція використовується в обладнанні середнього (КСД) і дрібного (КМД) дроблення.

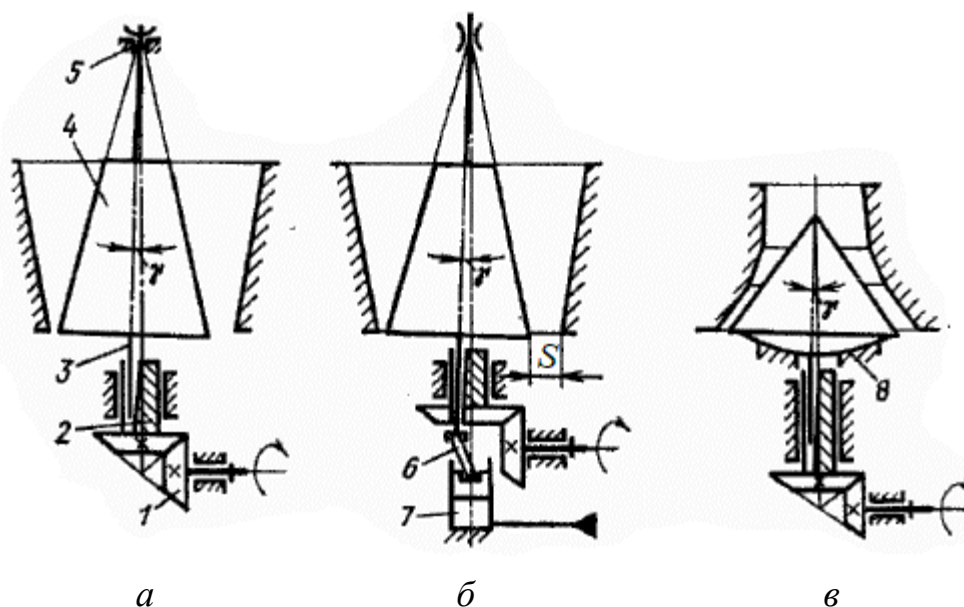


Рис. 5.5. Принципові схеми конусних дробарок

У дробарок із конструкцією, зображеною на рис. 5.5, а, вал 3 рухомого конуса 4 у верхній точці, яка співпадає з точкою перетину осей конуса, підвішений до опори 5, яка сприймає осьову і радіальну складові навантажень. Нижній кінець вала розміщений в ексцентрику 2, опори якого також сприймають радіальне навантаження рухомого конуса 3. Для надання ексцентрику обертового руху використовують конічну зубчасту передачу 1.

У дробарці з опорною п'ятою (рис. 5.5, б) осьова складова навантажень рухомого конуса через опорну п'яту передається на упор гідроциліндра 7, який врівноважується тиском гідравлічної рідини. Така система дає змогу оперативно регулювати ширину S розвантажувального отвору.

Найбільший кусок вхідного матеріалу, який підлягає дробленню у дробарках наведених вище конструкцій варіюється в межах 400...1200 мм. Продуктивність дроблення перебуває в межах 145...2300 м³/год.

У дробарках із консольним валом (рис. 5.5, в), у яких рухомий конус є більш пологим, осьові навантаження сприймаються сферичною п'ятою 8, а радіальна – опорою ексцентрика.

Найбільший кусок вхідного матеріалу, який підлягає дробленню в дробарках із консольним валом, варіюється в межах 40...300 мм. Продуктивність дроблення перебуває в межах 12...580 м³/год.

За принципом дії конусні дробарки середнього (КСД) і дрібного дроблення (КМД) відрізняються лиш формою камери дроблення й довжиною зони паралельності l (рис. 5.6).

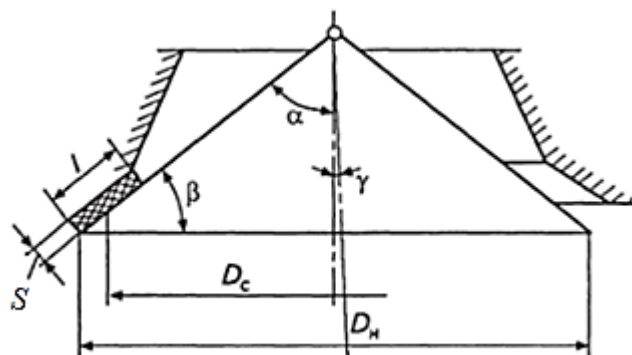


Рис. 5.6. Схема дробарки з консольним валом

Довжина паралельної зони для КСД:

$$l = D_n / 12.$$

Довжина паралельної зони для КМД:

$$l = D_n / 4,$$

де D_n – діаметр основи конуса, м.

Завдяки наявності паралельної зони камери дроблення продукт дроблення виходить більш однорідний за своїм складом і близький до розміру S розвантажувального отвору.

Умови захоплення і дроблення матеріалу в конусних дробарках подібні розглянутим вище для щоккових дробарок. Отже, кут захоплення в конусних дробарках α (рис. 5.7) не повинен бути більший за подвійний кут тертя:

$$\alpha \leq 2\varphi.$$

Зазвичай у конусних дробарках значення кута захоплення беруть у межах $\alpha = 21...23^\circ$.

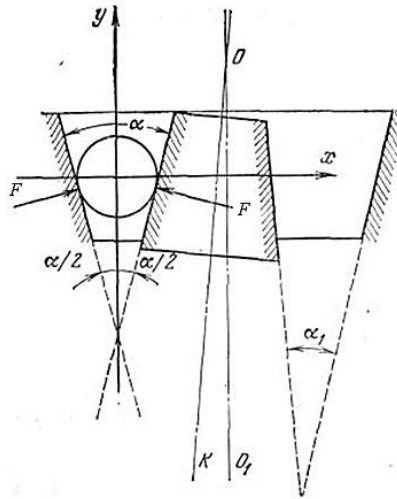


Рис. 5.7. Схема для визначення кута захоплення конусних дробарок

Потужність двигуна для конусних дробарок крупного дроблення, кВт:

$$P = 2160D_H^2 \cdot r \cdot n.$$

Потужність двигуна для конусних дробарок середнього і дрібного дроблення, кВт:

$$P = 12,6D_H^2 \cdot n,$$

де r – ексцентриситет, м; n – частота обертання ексцентрика, об/с.

5.3. Методика розрахунку параметрів для вибору щоккових і конусних дробарок

Для вибору дробарок основними показниками є найбільший розмір кусків вихідного матеріалу D_{max} і продуктивність Π (м³/год) надходження матеріалу для дроблення. Для конусних і щоккових дробарок граничні розміри кусків, що завантажуються у дробарки, не повинні перевищувати 0,85 ширини завантажувального отвору [4]:

$$B \geq D_{max} / 0,85.$$

Потрібна продуктивність дробарки Π_n на етапі попереднього вибору має відповідати умові:

$$\Pi_n \geq \Pi K_n,$$

де K_n – коефіцієнт нерівномірності подачі матеріалу, $K_n = 1,1 \dots 1,3$.

За отриманими значеннями потрібної мінімальної ширини завантажувального отвору B і продуктивності Π_n попередньо вибирають дробарки.

Під час вибору дробильного обладнання треба враховувати умови роботи дробарки та ступінь складності дроблення, які визначаються з відповідних довідників [14] і з урахуванням коефіцієнта a :

$$a = D_{\max} / B',$$

де B' – ширина приймального отвору вибраної дробарки; D_{\max} – розмір вихідного матеріалу.

На основі визначених показників ступеня складності дроблення й умов роботи визначається продуктивність дробарки:

$$P_{\text{др}} = P_m K_{\text{ск}},$$

де P_m – табличне значення продуктивності вибраної дробарки за нормальних умов роботи; $K_{\text{ск}}$ – коефіцієнт ступеня складності дроблення.

Максимальний розмір матеріалу на виході з камери дроблення визначається з такої залежності:

$$d_{\max} = D_{\max} / i,$$

де d_{\max} – максимальний розмір матеріалу після проходження камери дроблення, мм; i – ступінь дроблення матеріалу.

Для визначення ширини розвантажувального отвору дробарки S слід враховувати, що максимальний розмір матеріалу d_{\max} після дроблення на деякий відсоток більший за ширину розвантажувального отвору. Цей відсоток відображає коефіцієнт укрупнення матеріалу K_M [1].

Тобто залежність максимального розміру матеріалу від ширини розвантажувального отвору можна виразити таким рівнянням:

$$d_{\max} = S \cdot K_M,$$

звідси потрібна ширина розвантажувального отвору:

$$S = d_{\max} / K_M. \quad (5.1)$$

З огляду на зазначене з графіків залежності продуктивності дробарки від ширини розвантажувального отвору коригують продуктивність $P_{\text{др}}$ попередньо вибраних дробарок за розвантажувальним отвором S (див. формулу 5.1) і беруть ті дробарки, які відповідають умові:

$$P_{\text{др}} \geq P_n.$$

За результатами розрахунків вибирають найбільш оптимальний комплект дробильного обладнання, який забезпечує потрібну продуктивність.

На останньому етапі розрахунків дробильного обладнання визначають гранулометричний склад продукту дроблення в частинах ширини розвантажувального отвору [12]:

$$\frac{d_1}{S}, \frac{d_2}{S} \dots \frac{d_n}{S},$$

де d_1, d_2, \dots, d_n – межі потрібних фракцій готового продукту.

За графіками гранулометричного складу продуктів (рис. 5.8) дроблення вибраного дробильного обладнання визначається склад фракцій у відсотках [3].

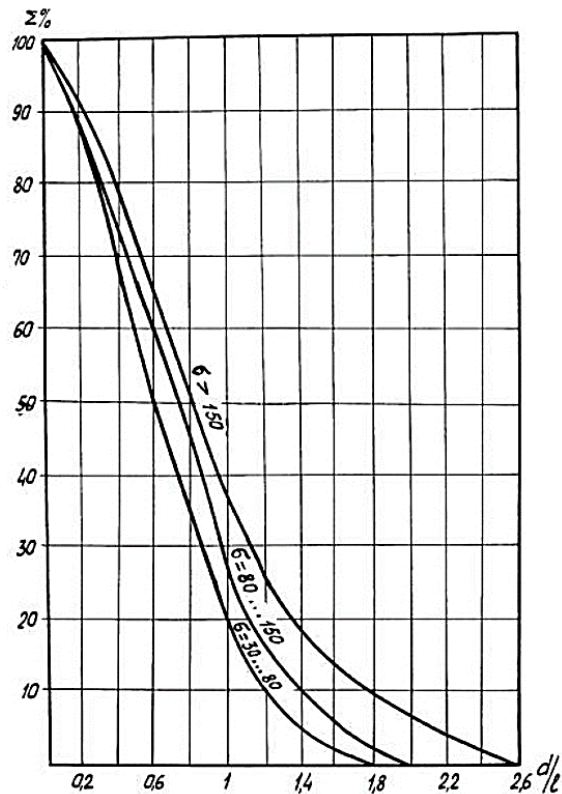


Рис. 5.8. Графіки гранулометричного складу продуктів дроблення щоківих дробарок

Отримані дані заносяться в таблицю гранулометричного складу продуктів дроблення (див. табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Приклад таблиці гранулометричного складу продуктів дроблення

Розміри фракцій	Відсотковий склад фракцій у відсотках	Продуктивність дроблення матеріалу за фракціями
0...5	= 100–98,5 = 1,5 %	2,145 м ³ /год
5...10	= 98,5–97 = 1,5 %	2,145 м ³ /год
10...20	= 97–95 = 2 %	2,86 м ³ /год
20...40	= 95–90 = 5%	7,15 м ³ /год
40...50	= 90–86 = 4 %	5,72 м ³ /год
50 і більше	86 %	122,98 м ³ /год
Разом:	100 %	143 м ³ /год

5.4. Принцип дії і параметри механічного режиму валкових дробарок

Валкові дробарки використовують у хімічній промисловості для середнього і дрібного дроблення матеріалів середньої міцності, а також для подрібнення пластичних і крихких матеріалів [12].

Принцип дії валкових дробарок однаковий: вихідний матеріал подається зверху, затягується валками 6 і 10 (див. рис. 5.9), що обертаються в зустрічному напрямку, і під час проходження між ними подрібнюється.

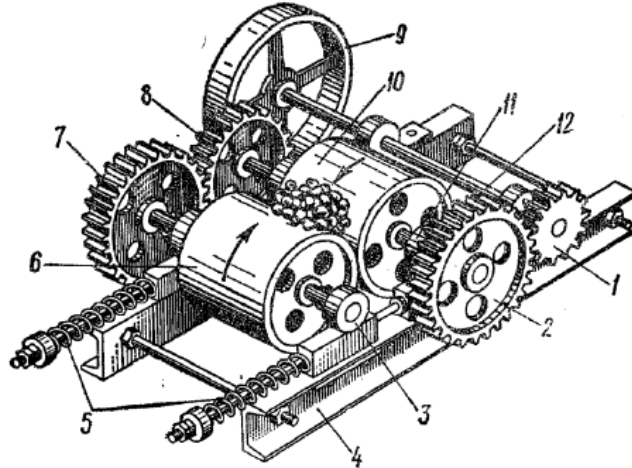


Рис. 5.9. Схема валкової дробарки з гладкими валками й шестеренчастим приводом

Залежно від фізико-механічних властивостей матеріалу, який підлягає дробленню, і технологічного призначення подрібненого продукту використовують валкові дробарки з різною кількістю валків і з різною робочою їх поверхнею [4] (рис. 5.10).

Валкові дробарки з гладкими валками (рис. 5.10, а) або з повздовжніми напівкруглими виїмками на одному з валків (рис. 5.10, б) використовують для середнього і дрібного дроблення матеріалів. Для крупного дроблення глинистих матеріалів використовують дробарки із зубчастими валками (рис. 5.10, в). Для середнього і дрібного дроблення глинистих матеріалів і видалення камінців використовують дробарки з одним гладким і іншим рифленим валками (рис. 5.10, г), а також із гвинтовими валками (рис. 5.10, д). Для крупного, середнього і дрібного дроблення матеріалів і формування брикетів використовують дробарки з дірчатими валками (рис. 5.10, е) і валками, які мають напівсферичні виїмки на двох валках [7].

За кількістю валків дробарки можуть бути: одновалковими, двовалковими і багатовалковими.

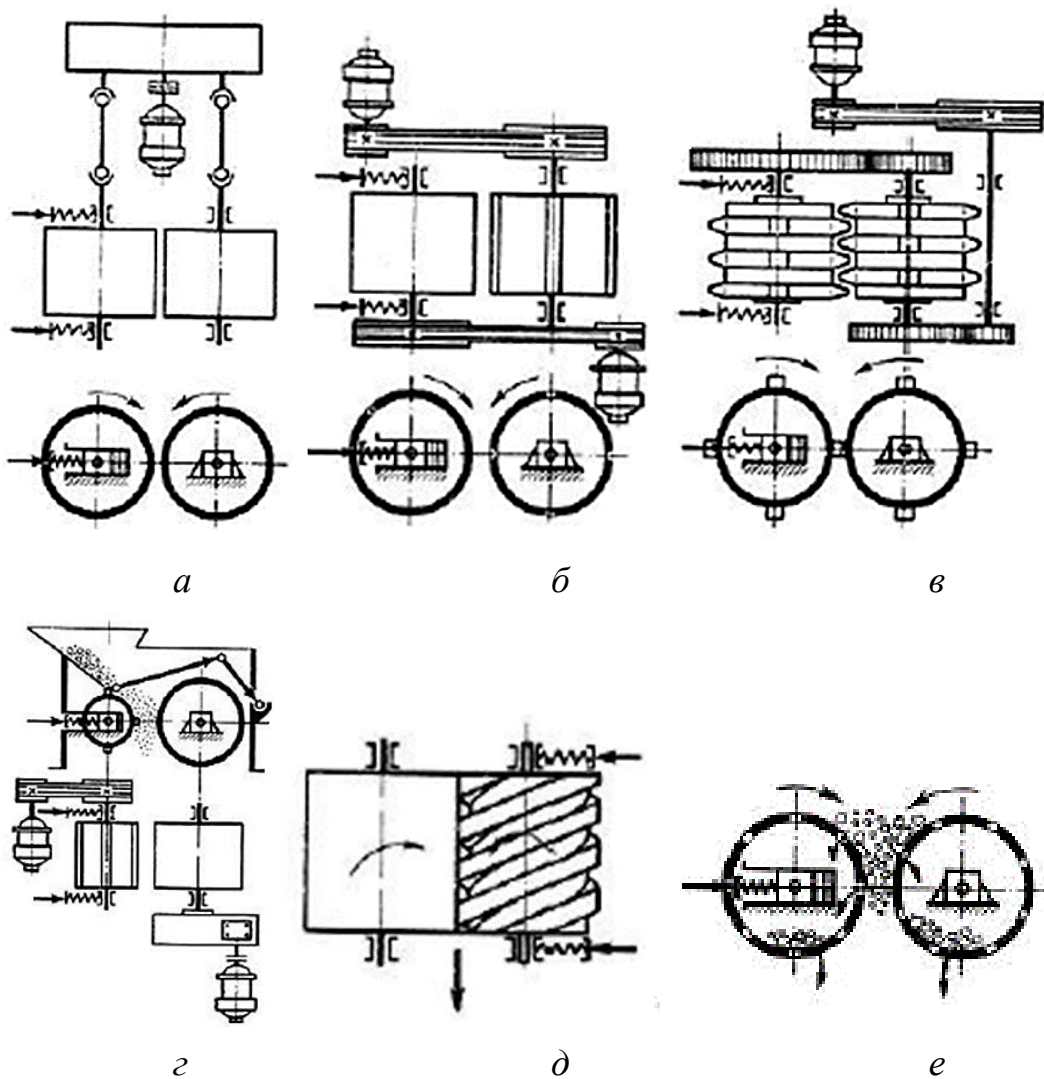


Рис. 5.10. Класифікація валкових дробарок за типом робочої поверхні валків: *a* – з гладкою поверхнею валків; *б* – повздовжніми виїмками на одному з валків; *в* – із зубчастими валками; *г* – з рифленим валком; *д* - з гвинтовою поверхнею валків; *е* – з дірчастими валками

В одновалкових дробарках із зубчастими валками куски матеріалу поступають у простір між валком і нерухомою дробильною плитою. Подрібнення матеріалу відбувається роздавлюванням і розколюванням, а також частково стиранням.

У двовалкових дробарках із гладкими валками матеріал подається зверху на валки однакового діаметра, які обертаються в зустрічному напрямку. Подрібнення відбувається роздавлюванням і стиранням.

Багатовалкова дробарка являє собою поєднання в одному агрегаті двох або більше валкових дробарок. Матеріал послідовно проходить від однієї пари валків до іншої у процесі подрібнення.

Основними вихідними показниками для вибору валкових дробарок є найбільший розмір кусків вихідного матеріалу D_{max} і максимальний розмір матеріалу на виході з дробарки d_{max} , продуктивність надходження матеріалу до відповідної дробарки Π (м³/год) і фізико-механічні параметри дробленого матеріалу (міцність на стиск, крихкість, щільність тощо).

Максимальний розмір вихідного матеріалу D_{max} для машин із гладкими валками визначають за залежністю:

$$D_{max} = D_{вал} / (18...22),$$

де $D_{вал}$ – діаметр валка, мм.

Максимальний розмір вихідного матеріалу D_{max} для машин із зубчастими валками:

$$D_{max} = D_{вал} / (1,5...4,5).$$

Максимальний розмір вихідного матеріалу D_{max} для машин із рифленими валками:

$$D_{max} = D_{вал} / (10...12).$$

Довжина валків:

$$L = (0,3...0,7) D_{вал}.$$

Продуктивність валкових дробарок, м³/год:

$$\Pi = \frac{S \cdot L \cdot \omega \cdot D_{вал} \cdot \mu \cdot \rho}{2},$$

де μ – коефіцієнт розпушення, який враховує нещільне розміщення часток матеріалу в камері дроблення (беруть у межах 0,2...0,3 для твердих порід, а для вологих невисокої міцності – 0,5...0,6).

Визначення потужності двигуна для валкової дробарки орієнтовно виконують за дослідними даними з розрахунку, що на 1 м³/год продуктивності валкової дробарки потрібно (кВт): для дробарок зубчастих середнього дроблення під час дроблення глинистих матеріалів – 0,75–0,9; для дробарок дезінтеграторних і дрібного дроблення – 1,2–1,35; для дробарок із гладкими валками під час дроблення скальних порід – 1,5–3,0; для дробарок із гладкими валками під час дроблення глини, гіпсу, крейди, коксу – 0,75–1,3.

5.5. Принцип дії і параметри механічного режиму дробарок ударної дії

Дробарки ударної дії використовують для подрібнення малоабразивних матеріалів середньої міцності і м'яких (вапняку, гіпсу, кам'яного вугілля й інших). Ці дробарки дають змогу отримувати високий

ступінь подрібнення (зазвичай ступінь подрібнення коливається в межах 15...20, іноді сягає 50), завдяки чому можна зменшити число стадій дроблення. Відрізняються простотою конструкції, малою металоємністю, зручністю обслуговування, а також вибірковістю дроблення й вищою якістю готового продукту за формою зерен.

У дробарках ударної дії матеріал руйнується під дією механічного удару, через що кінетична енергія рухомих тіл повністю або частково переходить в енергію деформації і руйнування [7]. Однак, на відміну від розглянутих попередньо конструкцій дробарок, у яких матеріал стискається між двома поверхнями дроблення, у дробарках ударної дії шматок матеріалу піддається фізичному впливу лише з одного боку, а зусилля дроблення, які при цьому виникають, визначаються силами інерції маси самого шматка матеріалу.

За конструкцією вирізняють роторні, молоткові й пальцеві дробарки (подрібнювачі).

Роторні дробарки (рис. 5.11, *а*) складаються з масивного ротора 2, на якому жорстко закріплені змінні біла 3 зі зносостійкої сталі. Матеріал у процесі подрібнення отримує удари від усієї маси ротора. Переважаючий вид навантаження на матеріал – удар.

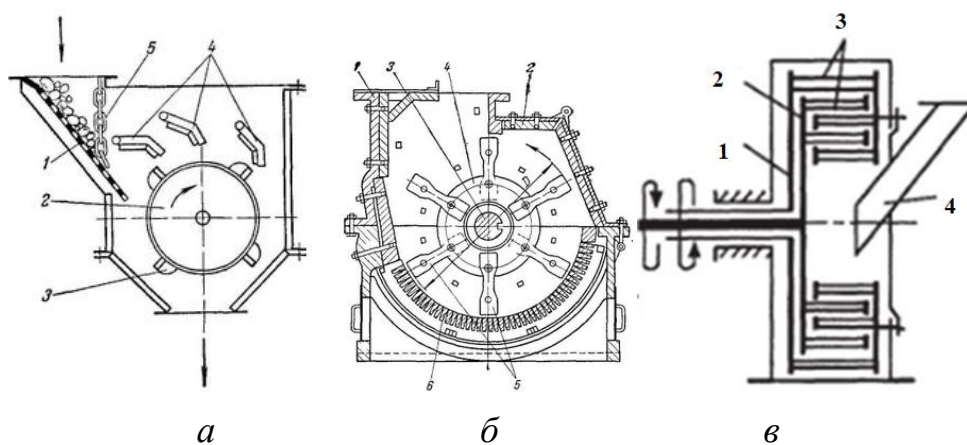


Рис. 5.11. Схеми конструкцій дробарок ударної дії:

а – роторна; *б* – молоткова; *в* – пальцева

Молоткові дробарки (рис. 5.11, *б*) складаються з молотків 5, які шарнірно підвішені до ротора 4. Матеріал у процесі подрібнення дробиться завдяки кінетичній енергії молотків. Переважаючі види навантаження на матеріал – удар і стирання.

В обох випадках матеріал, що підлягає дробленню, під дією сили тяжіння подається через завантажувальну горловину й потрапляє під дію бил або молотків швидкообертового ротора. Унаслідок удару шматок матеріалу руйнується і його уламки відкидаються на футеровку – відбійні плити або колосники, які складають камеру дроблення. Під час удару об футеровку матеріал продовжує руйнуватися і, відбиваючись від неї, знову потрапляє під дію ротора. Це продовжується доти, доки продукт дроблення не досягне розмірів, достатніх для виходу з дробарки через розвантажувальний отвір або колосникову решітку.

Пальцеві дробарки (рис. 5.11, в) складаються з двох дисків (корзин) 1 і 2 зі встановленими по їх периметру пальцями 3, причому пальці одного диска проходять між рядами пальців іншого. Матеріал подається через воронку 4 і під дією пальців 3 руйнується від удару і зламу.

Розміри ротора, такі як діаметр D_p і довжина L_p , визначаються максимальними розмірами кусків вихідного матеріалу D_{max} :

– для роторних дробарок крупного дроблення:

$$D_p / D_{max} = 1,7...2;$$

$$L_p / D_p = 0,8;$$

– для роторних дробарок середнього і дрібного дроблення:

$$D_p / D_{max} = 3,3;$$

$$L_p / D_p = 1;$$

– для молоткових дробарок:

$$D_p / D_{max} = 3,2...4;$$

$$L_p / D_p = 0,7...1,5.$$

Продуктивність дробарок ударної дії зазвичай розраховують за емпіричними формулами. Для роторних дробарок продуктивність визначається формулою [6], м³/с:

$$\Pi = 480 \cdot L_p \cdot D_p^{1,5} \cdot k_\beta \cdot v^{-0,35} \cdot z^{-0,5},$$

де L_p і D_p – довжина і діаметр ротора, м; k_β – 1...5,2 – коефіцієнт, що враховує положення відбивної плити; z – число рядів бил; v – колова швидкість ротора, м/с.

Продуктивність молоткових дробарок, м³/с:

$$\text{якщо } D_p > L_p, \quad \Pi = 1,66 \cdot D_p^2 \cdot L_p \cdot n,$$

$$\text{якщо } D_p < L_p, \quad \Pi = 1,66 \cdot D_p \cdot L_p^2 \cdot n,$$

де n – частота обертання ротора, об/с.

Потужність двигуна молоткової дробарки, кВт:

$$P = \frac{7,5 \cdot D_p \cdot L_p \cdot n}{60}$$

Гранулометричний склад продуктів дроблення у дробарках ударної дії зазвичай визначається за допомогою ситового аналізу під час дроблення партії матеріалу.

Запитання для самоперевірки

1. Які конструкції дробарок використовують для крупного дроблення міцних і абразивних матеріалів?
2. Наведіть короткий опис конструкції конусної дробарки крупного дроблення. Опишіть принцип її роботи.
3. Наведіть короткий опис конструкції щоклової дробарки зі складним рухом щокло. Опишіть принцип її роботи.
4. Які конструкції дробарок використовують для середнього і дрібного дроблення міцних і абразивних матеріалів?
5. Наведіть короткий опис конструкції конусної дробарки середнього дроблення. Опишіть принцип її роботи.
6. Наведіть короткий опис конструкції щоклової дробарки з простим рухом щокло. Опишіть принцип її роботи.

Лекція № 6

6.1. Принцип дії і параметри механічного режиму барабанного обладнання для подрібнення

Як було наведено (див. рис. 4.5), за конструктивними ознаками обладнання для помелу поділяється на таке: барабанні млини, млини роздавлювальної і стиральної дії, ударні млини, вібраційні млини, струйні млини.

Обладнання барабанного типу використовують для тонкого помелу матеріалів високої міцності. Найбільший кусок вихідного матеріалу не перевищує 50 мм, розмір матеріалу після помелу не перевищує 2 мкм.

Помел матеріалу відбувається всередині футерованого барабана, у якому перебувають тіла перемелювання – кулі або стрижні (рис. 6.1).

Під час обертання барабана тіла перемелювання починають рухатися разом із корпусом барабана, піднімаються на деяку висоту і потім падають на шматки матеріалу, які лежать на футеровці. Матеріал руйнується під дією стисненого удару, а також роздавлюванням і стиранням. Ступінь подрібнення матеріалу змінюється залежно від часу перебування матеріалу всередині обладнання.

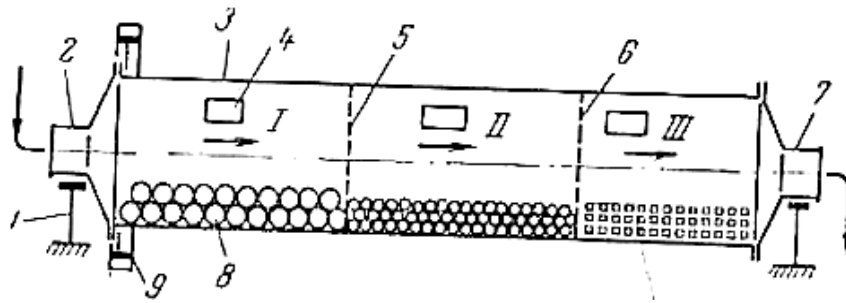


Рис. 6.1. Схема трикамерного барабанного млина:
 1 – стойка; 2 – завантажувальна цапфа; 3 – барабан; 4 – отвір; 5, 6 – діафрагми;
 7 – вивантажувальна цапфа; 8 – помольні тіла; 9 – приводна пара

Барабанні млини поділяються [5]:

- залежно від режиму їх роботи – періодичної (рис. 6.2, а) і безперервної (рис. 6.2, б) дії;
- за способом помелу – для сухого і мокрого помелу;
- за формою барабана і залежно від співвідношення діаметра і довжини – циліндроконічні (рис. 6.3, а), циліндричні короткі (рис. 6.3, б), циліндричні довгі (рис. 6.3, в), трубні (рис. 6.3, з);
- за видом перемелювальних тіл – кульові, стержневі, галькові, самоподрібнення;
- за способом розвантаження – з центральним і периферійним розвантаженням;
- за приводом барабана – з периферійним (рис. 6.4, а) і центральним (рис. 6.4, б) приводом.

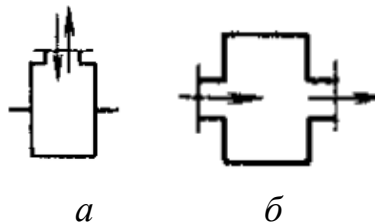


Рис. 6.2. Класифікація барабанних млинів за режимом роботи

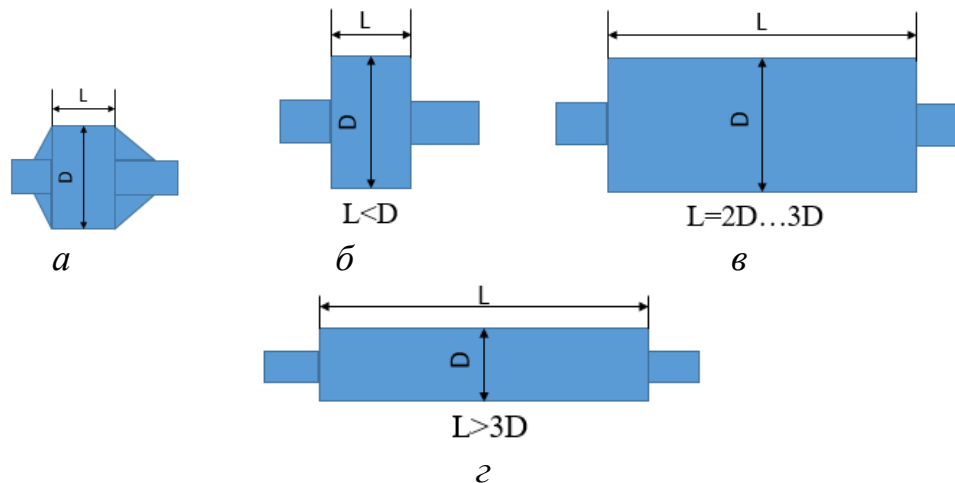


Рис. 6.3. Різновиди барабанів млинів

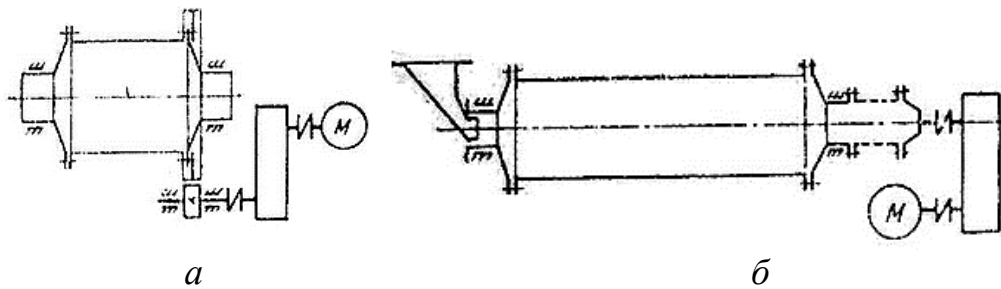


Рис. 6.4. Класифікація барабаних млинів залежно від конструкції привода

Характер руху тіл перемелювання в обертовому барабані залежить від його кутової швидкості. З невисокою частотою обертання барабана виникає каскадний режим руху тіл перемелювання, останні захоплюються барабаном у бік його обертання (рис. 6.5, *a*), піднімаються і потім скочуються паралельними шарами вниз. Переважаюча дія на матеріал, що підлягає перемелюванню, – роздавлювання і стирання.

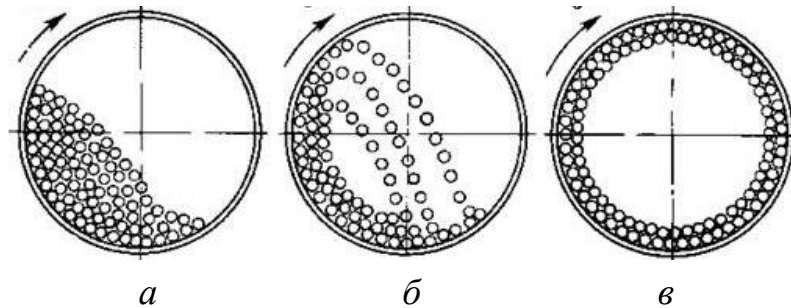


Рис.6.5. Схеми руху тіл перемелювання в обертовому барабані:
a – каскадний режим руху тіл помелу; *б* – водоспадний режим руху тіл помелу;
в – тіла помелу з критичною кутовою швидкістю обертання барабана

З більшою частотою обертання барабана виникає водоспадний режим руху тіл перемелювання, останні захоплюються барабаном у бік його обертання (рис. 6.5, *б*), піднімаються і потім у верхній зоні відриваються від шару й вільно падають у свій шар з ударом. Переважаюча дія на матеріал, що підлягає перемелюванню, – удар, а також роздавлювання і стирання.

З подальшим збільшенням частоти обертання й досягненням кутової частоти обертання до рівня критичної режим руху тіл змінюється і вони проходять через верхнє положення барабана без відриву від нього (рис. 6.5, *а*).

Критична кутова частота барабана визначається за формулою, рад/с:

$$\omega_{\text{кр}} = 4,43 / \sqrt{D},$$

де D – внутрішній діаметр барабана, м.

Оптимальна кутова швидкість барабана в роботі у водоспадному режимі становить 76 % від критичної, або:

$$\omega_{\text{опт}} = 3,33 / \sqrt{D}.$$

Оптимальна кутова швидкість барабана в роботі в каскадному режимі становить 50...60 % від критичної, або:

$$\omega_{\text{опт}} = 2,21...2,65 / \sqrt{D}.$$

Потужність двигуна барабанних млинів, кВт:

$$P = 0,39m_3R\omega g / \eta,$$

де m_3 – маса завантаження, т; η – ккд привода (для центрального – 0,9...0,94, для периферійного – 0,85...0,88).

Продуктивність кульових барабанних млинів, т/год:

$$\Pi = 6,45 \cdot V_6 \cdot \sqrt{D} \cdot (m_M/V_6)^{0,8} k \cdot q,$$

де V_6 – об'єм барабана, м³; m_M – маса тіл помелу, т; k – коефіцієнт, який враховує тонкість помелу (0,6...1,2 залежно від залишку на ситі 80 мкм від 2 до 15 %); $q = 0,4$ – питома продуктивність млина, т/(кВт·г).

6.2. Принцип дії і параметри механічного режиму обладнання для подрібнення роздавлювальної і стиральної дії

Млини роздавлювальної і стиральної дії є типом машин, у яких подрібнення матеріалу відбувається під одночасною дією роздавлювальних і стиральних навантажень. Серед великої кількості конструкцій такого обладнання найбільшого поширення отримали бігуни, жорнові, роликові, кульово-кільцеві, роликово-маятникові й бісерні млини (див. рис. 6.6) [3].

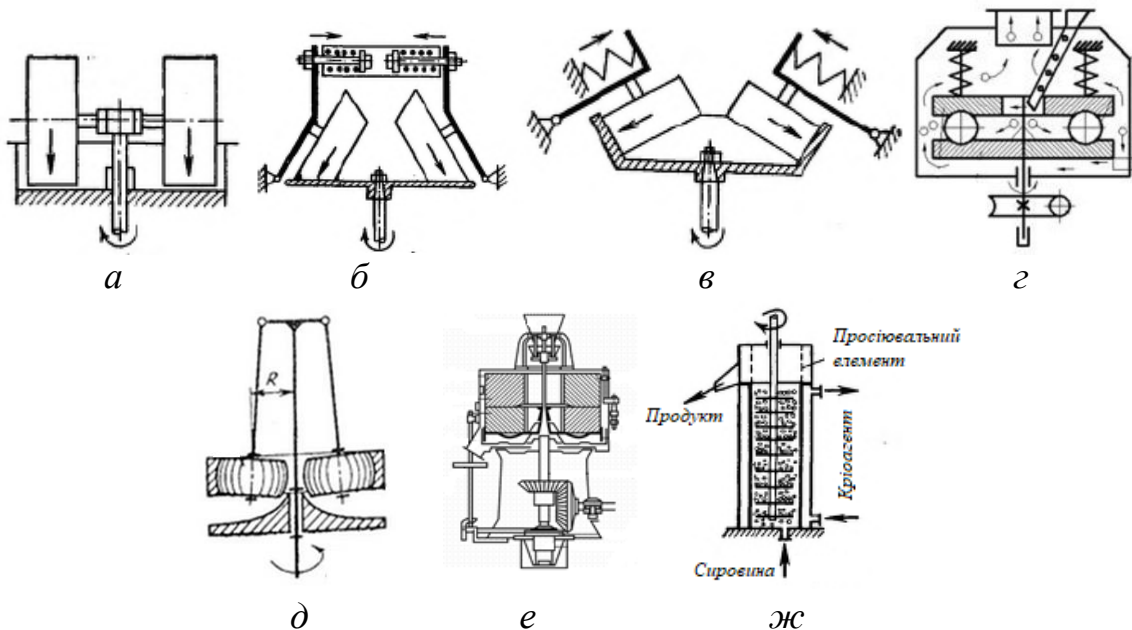


Рис. 6.6. Основні кінематичні схеми млинів роздавлювальної і стиральної дії: а – бігуни; б – роликово-дисковий (роликово-тарілчастий); в – роликово-чашевий; г – кульово-кільцевий; д – ролико-маятниковий; е – жорновий; ж – бісерний

Завдяки таким конструкціям млинів можна виконувати грубий і тонкий помел матеріалів середньої і малої міцності [6], а за допомогою бісерних подрібнювачів (млинів) і жорнових млинів – надтонкий помел матеріалів.

Жорнові млини в хімічній промисловості використовуються зазвичай для розмелювання й розтирання барвників у лакофарбовій індустрії. Серед переваг їх можна назвати інертність матеріалів елементів, якими відбувається перемелювання, через що у процесі помелу робочі поверхні через зношування не забруднюють продукт подрібнення. У сучасних жорнових млинах елементи, якими відбувається перемелювання, найчастіше виробляють із корунду, а деталі, які стикаються з оброблюваним матеріалом, – з легованих сталей [3].

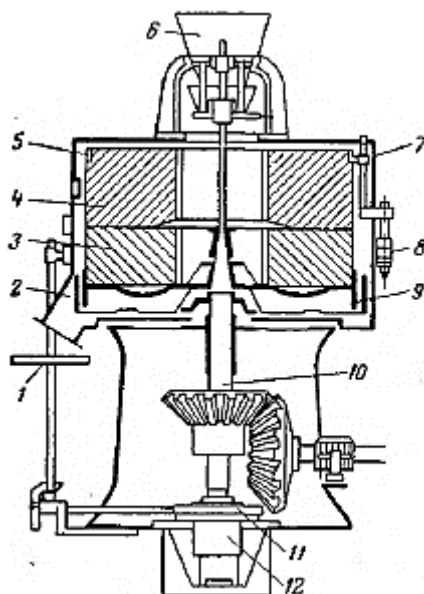


Рис. 6.7. Схема конструкції жорнового млина

Основними робочими елементами жорнового млина (рис. 6.7) є два круги 3 і 4, які називають жорнами. Одне із жорен (нижнє або верхнє) приводиться в обертний рух, а інше лишається нерухомим. Верхнє жорно притискається до нижнього за допомогою пружин 8. Матеріал через воронку 6 подається всередину верхнього жорна і потім відцентровими силами, а також за допомогою спеціальних канавок на робочих поверхнях жорен затягується між останніми і відбувається помел.

Матеріал після помелу викидається в кожух 7 і виходить через воронку 2. Крупність помелу встановлюють регулювальним пристроєм 1, завдяки якому можна переміщувати одне із жорен в осьовому напрямку і

змінювати зазор між жорнами. Частота обертання рухомого жорна може сягати 50 об/с і більше.

Бігуни (бігункові млини) у хімічній промисловості використовують не тільки для мілкового дроблення та помелу, а й для виконання супутніх процесів перемішування, просочування і розтирання матеріалів. Подрібнений продукт зазвичай має розміри не більші за 40 мкм.

Бігуни (рис. 6.8) складаються з котків 1, які закріплені на півосях і шарнірно з'єднані з водилом 3, центрального вала 4, який опирається на підп'ятник 7 і через втулку на чашу 5. Водило 3, обертаючись, захоплює з собою катки 1 і змушує їх бігати по дну чаші. Звідси і назва – бігуни. Матеріал, який підлягає подрібненню, подається в чашу 5 і подрібнюється котками 1 до потрібної товщини. У процесі подрібнення, під дією відцентрових сил, матеріал зсувається до зовнішньої стінки чаші, звідки його повертають під котки спеціальні шкребки 8. Роздавлювання відбувається під час попадання кусків під важкі котки, а стирання – під час повертання котків відносно їх вертикальної осі. Стирання відбувається завдяки тому, що точки розміщені по ширині котка відносно центрального вала, мають різні швидкості, які залежать від радіуса руху точок.

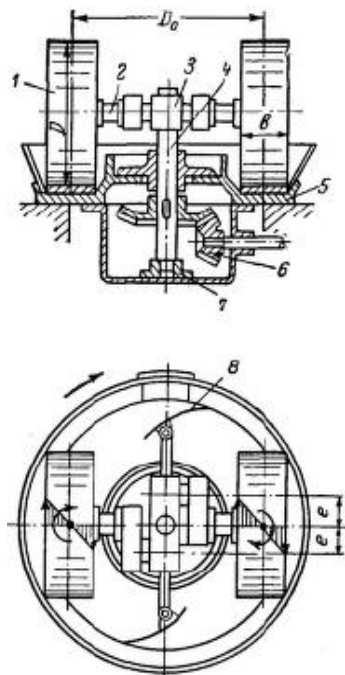


Рис. 6.8. Схеми конструкції бігункового млина (бігунів)

За один оберт центрального вала середня за шириною котка точка пройде шлях:

$$S_0 = \pi D_0,$$

де D_0 – відстань між центральними точками котків, м.

Шлях, пройдений зовнішньою і внутрішньою точкою котка:

$$S_3 = \pi(D_0 + b),$$

$$S_B = \pi(D_0 - b),$$

де b – ширина котка, м.

Відношення діаметра котка D до діаметра матеріалу D_{max} , який піддається подрібненню, визначається умовами захвату куска матеріалу, за якого кут захоплення не перевищує подвійного кута тертя $\alpha \leq 2\varphi$:

$$D \geq (1/\varphi^2)D_{max}.$$

Зазвичай для матеріалів середньої міцності для сухого помелу беруть:

$$D/D_{max} = 11.$$

Для в'язких матеріалів малої міцності для сухого помелу:

$$D/D_{max} = 5.$$

Потужність двигуна, потрібна для приведення в дію бігункових млинів, визначають за формулою:

$$P = (P_1 + P_2 + P_3) / \eta,$$

де $\eta = 0,7 \dots 0,8$ – ККД привода; P_1 – потужність на опір коченню, кВт; P_2 – потужність на опір силам тертя ковзання котків, кВт; P_3 – потужність на опір силам тертя ковзання скребків, кВт.

Потужність, яка витрачається на опір коченню:

$$P_1 = 2F_1 k \omega r z / D,$$

де F_1 – сила притискання котка до матеріалу, кН; $k = 0,05 \dots 0,1$ м – коефіцієнт опору під час кочення; ω – кутова частота обертання центральної точки котка відносно чаші, рад/с; r – відстань від центра чаші до центра котка, м, z – число котків, шт.

Потужність, яка витрачається на опір силам тертя ковзання котків:

$$P_2 = 0,25 F_1 f \omega b z,$$

де $f \approx 0,2$ – коефіцієнт тертя матеріалу по чаші;

Потужність, яка витрачається на опір силам тертя ковзання скребків:

$$P_3 = F_3 f_c z_c \omega R,$$

де $F_3 = 1$ кН – сила притискання скребків; f_c – коефіцієнт тертя скребків по чаші; z_c – число скребків; R – відстань від центра чаші до центра скребка, м.

Роликові, кульово-кільцеві й роликово-маятникові млини (див. рис. 6.6, б, в, г, д) належать до середньоходових млинів. Частота обертання робочих органів у середньому становить 0,4–2 об/с, колова швидкість – 3–10 м/с. Робочі органи цих машин – ролики й кулі.

Навантаження притискання робочих органів створюється притискними пружинами або відцентровими силами. Такі млини мають знижені порівняно з барабанными млинами енерговитрати, менший знос робочих органів і більш компактні.

Конструкцію роликів млинів розглянемо на прикладі роликово-чашевого (роликово-тарілчастого) (рис. 6.9), який складається з корпусу 1 із закріпленою в ньому поверхнею розмелювання – кільця помелу 2 і роликів 3, які обертаються на осях 4. Ролики притискаються до кільця помелу за допомогою пружин 7 через систему важелів і осей. Під час роботи обертається чаша 1, куди подається матеріал подрібнення, який під дією відцентрових сил відкидається на кільце помелу 2 і потрапляє під ролики 3, подрібнюється та викидається з чаші.

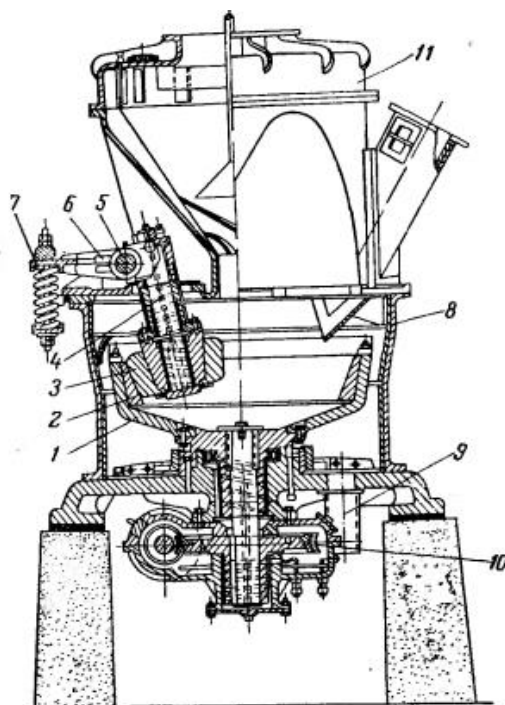


Рис. 6.9. Схема конструкції роликово-чашевого млина

Вивантаження матеріалу після помелу у всіх конструкціях середньоходових млинів відбувається з використанням потоку газу (пневморозвантаження). У роликово-чашевому млині потік газу подається знизу й потрапляє в кільцеву щілину між чашею і корпусом млина, підхоплює частинки матеріалу й виносить їх у сепаратор, де виконується розділення матеріалу. Крупні частинки повертаються в чашу для додаткового помелу, а цільовий продукт виходить разом із потоком для подальшої обробки.

У роликово-дискових і роликово-чашевих млинах залежність між діаметром роликів і кусків матеріалу, який потрапляє на подрібнення, визначають аналогічно, як і для бігунів, однак за формулою розраховують менший діаметр усіченого конуса D_1 (рис. 6.10):

$$D_1 \geq (1/\varphi^2)D_{\max}.$$

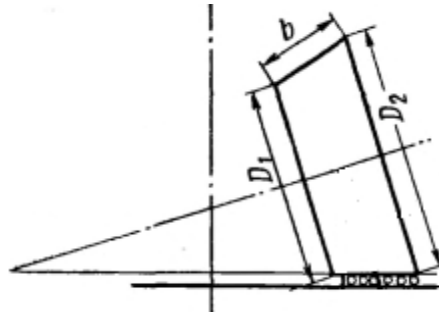


Рис. 6.10. Схема ролика роликово-чашевого млина

У кульово-кільцевих млинах помел відбувається завдяки суцільним або пустотілим кулям. Роздавлювання і стирання може відбуватися під дією зусиль, які передаються на кулі від притискних пристроїв під дією пружин, або відцентрових сил [3].

На рис. 6.11 наведено конструкцію кульово-кільцевого млина з горизонтальним розміщенням кільця помелу, у якому притискання куль до кільця відбувається під дією відцентрових сил.

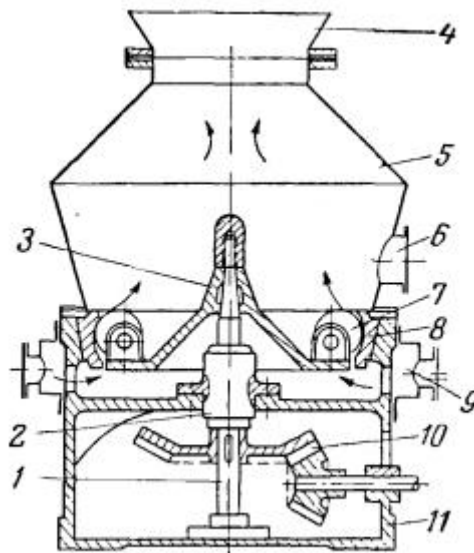


Рис. 6.11. Схема конструкції кульово-кільцевого млина

Матеріал, який підлягає подрібненню, подається через впускний патрубок 6, потрапляє на обертове водило 3, відкидається відцентровою силою до кільця помелу 8 і потрапляє під кулі 7, де й відбувається помел.

У роликово-маятникових млинах (див. рис. 6.12) ролики 5, закріплені на маятниках, шарнірно підвішених до центрального вала-хрестовини, під час обертання вала під дією лиш відцентрових сил притискаються до нерухомого кільця помелу. Матеріал подається на подрібнення в нижню частину корпуса і спеціальними лопатками, які обертаються разом із валом, прямує до зони подрібнення [6].

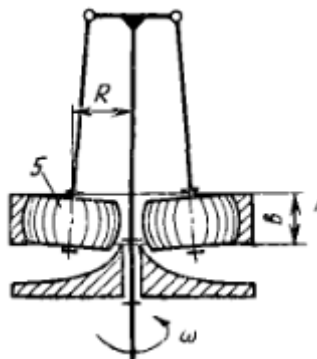


Рис.6.12. Схема конструкції роликово-маятникового млина

Частоту обертання вала-хрестовини вибирають так, щоб забезпечити виникнення відцентрової сили роликів, яка має створювати питому силу притискання до кільця помелу не менше ніж $F_{np} = 0,1 \dots 0,25$ МН/м:

$$\omega \geq \sqrt{F_{np} b / (mR)},$$

де b – ширина ролика, м; m – маса ролика, кг; R – відстань від осі обертання до центра мас ролика, м. Значення питомої сили притискання F_{np} у формулу потрібно підставляти в Н/м.

Продуктивність млинів роздавлювальної і стиральної дії визначають дослідним шляхом або за емпіричними формулами відповідно до конструкції.

6.3. Конструкції ударних, вібраційних і струйних млинів

Млини ударної дії за конструкцією і принципом дії аналогічні дробаркам ударної дії. Їх використовують для сухого тонкого помелу м'яких і середньої міцності матеріалів до розмірів частинок від 50 до 500 мкм. Найбільший кусок матеріалу, який підлягає помелу, – 5 мм.

Шахтний млин (рис. 6.13) за конструкцією ротора й закріпленню молотків подібний до молоткової дробарки [8]. Матеріал подається через патрубок 1 у шахту 3 у простір між стінкою млина 6 і молотками 5. Подрібнення відбувається під дією удару і стирання під час удару молотків

по матеріалу і подальшого відкидання матеріалу до стінок. Молотки 5 транспортують матеріал у нижній зоні і викидають його в шахту. Завдяки ротору з молотками в камері помелу створюється розрідження й забезпечується втягування повітря через приймальні канали 4. Дрібні фракції готового продукту транспортуються потоком повітря через патрубок 2 в циклон. Крупні частинки випадають із потоку повітря на додаткове подрібнення.

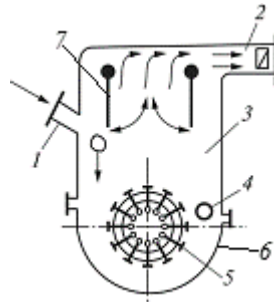


Рис. 6.13. Схема конструкції шахтного млина

Тонкість помелу регулюють за допомогою двох шибєрних механізмів 7, положення який визначає швидкість повітряного потоку в шахті 1, як наслідок, розмір частинок у цільовому продукті.

Аеробильний млин подібний за конструкцією до роторної дробарки – біла жорстко закріплені на роторі [8].

Аеробильний і шахтний млини можна використовувати одночасно і для підсушування матеріалу.

Млини вібраційної дії широко використовують для надтонкого сухого або мокрого помелу матеріалів середньої міцності. Розмір матеріалу до помелу – до 5 мм, після помелу – 1...5 мкм [6]. Подрібнення відбувається під дією високочастотного удару і стирання. Тіла перемелювання зазвичай виготовляють зі сталей або твердих сплавів. У випадках, коли продукти зносу не повинні забруднювати готовий продукт, використовують фарфорові кулі.

За режимом роботи млини вібраційної дії бувають як періодичної (рис. 6.14, а) так і безперервної дії (рис. 6.14, б).

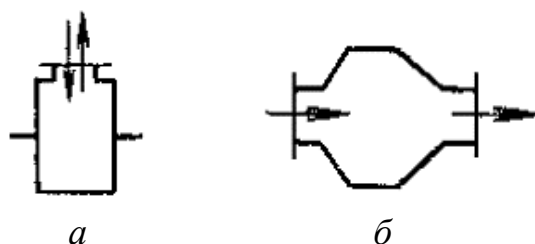


Рис. 6.14. Схеми млинів вібраційної дії за режимом роботи

За способом збудження вібрації розрізняють машини гіраційного і інерційного типів. Конструктивно млин гіраційного типу (рис. 6.15, а) складається з електродвигуна 1, який з'єднано через муфту 2 з колінвалом 3, на якому з ексцентриситетом на підшипниках закріплено корпус 4 млина з тілами перемелювання 5. Корпус опирається на пружини 7. Тілами перемелювання корпус зазвичай заповнений на 80–90 %. Під час обертання колінвала (частота обертання зазвичай 25 або 50 Гц) корпус виконує гіраційний рух, при цьому коливання корпусу передаються тілам перемелювання, які починають із взаємним ударом повільно циркулювати в бік, який є зворотним до напрямку обертання вала. Дебаланси 6 призначені для врівноваження відцентрових сил корпусу 4.

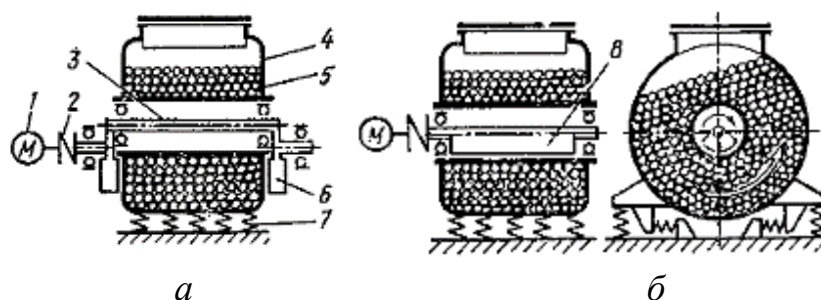


Рис. 6.15. Схеми млинів вібраційної дії

Більш широко розповсюдженими на сьогодні є млини вібраційної дії інерційного типу (рис. 6.15, б). Для надання коливань корпусу використовують віброзбудник інерційного типу – вал із дебалансом 8. Частоти коливань вала і характер руху куль аналогічні таким показникам у машинах гіраційного типу.

Амплітуда коливань вібраційних млинів перебуває в межах від 3 до 20 мм.

Потужність двигуна, кВт:

$$P = (P_1 + P_2) / \eta,$$

де P_1 – середня потужність для підтримання вимушених коливань, кВт;
 P_2 – потужність, потрібна для подолання тертя в підшипниках, кВт;
 η – коефіцієнт корисної дії привода.

Середня потужність для підтримання вимушених коливань:

$$P_1 = F_0 \omega / [4m(\omega_0^2 - \omega^2)],$$

де F_0 – змушуюча сила коливань, Н; ω – частота вимушених коливань системи, рад/с; ω_0 – частота вільних (власних) коливань системи, рад/с;
 m – маса коливних частин системи, кг.

Струменеві млини або подрібнювачі – це обладнання, яке використовують найчастіше для надтонкого помелу абразивних матеріалів середньої міцності. Найбільший кусок матеріалу на вході у млин не перевищує 1 мм, після помелу розмір часток продукту варіюється в межах від 2 до 5 мкм. Дія такого виду млинів заснована на використанні енергії стиснених газів (повітря, інертний газ) або пари, які на виході із сопел мають швидкість, яка сягає декількох сотень метрів на секунду. Матеріал, який підлягає подрібненню, вводиться у струмінь газу й руйнується внаслідок взаємних зіткнень під час перетину потоків струменів або удару об тверду перетинку.

Завдяки принципу роботи таких млинів забруднення матеріалу, що подрібнюється, мінімальне.

За конструкцією камери помелу струменеві млини поділяються на три основні групи (рис. 6.16):

- з протитоковою камерою;
- з плоскою камерою;
- з трубчастою камерою.

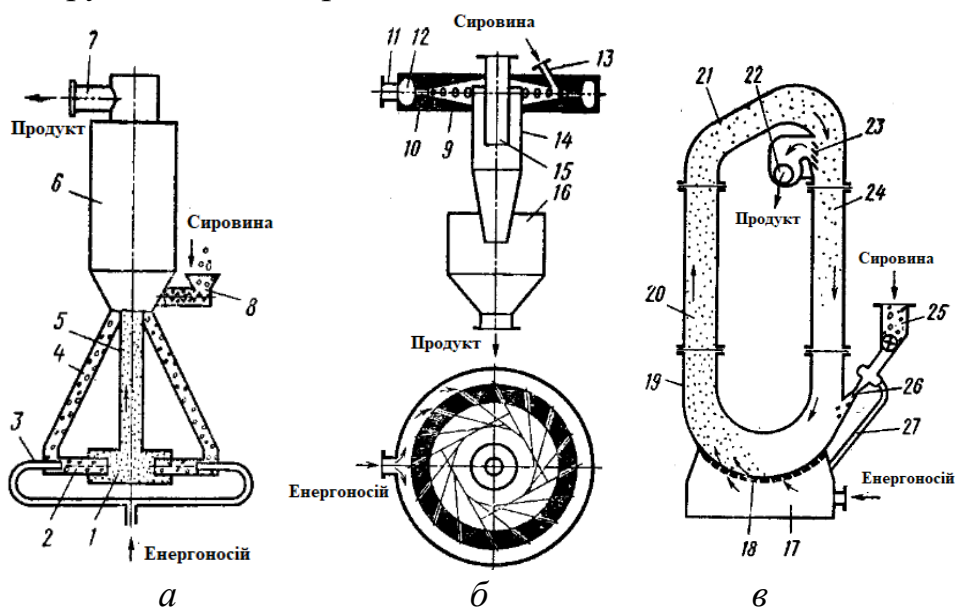


Рис. 6.16. Схеми конструкцій струменевих млинів

Схему струменевого млина з протитоковою камерою зображено на рис. 6.16, *a*. Млин складається з камери помелу 1, яка всередині футерована зносостійким матеріалом. У камеру з двох боків входять розгінні трубки 2 з розміщеними в них соплами 3 для подачі енергоносія. У розгінні трубки з живильника 8 по рукавах 4 подають матеріал для подрібнення, який підхоплюється потоком енергоносія, і в камері 1 відбувається помел. Після

подрібнення матеріал виводиться через трубу 5 і потрапляє в сепаратор 6, де відбувається відділення крупної фракції, яка потім повертається на повторне подрібнення. Цільовий продукт через штуцер 7 виводиться з млина і йде на подальшу обробку. Такі млини використовують для тонкого помелу.

Струменевий млин із плоскою камерою зображено на рис. 6.16, б. Подрібнення матеріалу, який подається по штуцеру 13, відбувається в камері 9, куди через штуцер 11 через сопла 10 у кільцевий колектор 12 подають енергоносії. Сопла розміщені так, щоб струмені з енергоносієм перетиналися в камері, що призводить до зіткнення й руйнування частинок матеріалу. Відокремлення дрібних фракцій продукту в таких млинах відбувається через обертання пилогазової суміші, у процесі чого відбувається витіснення крупних фракцій до периферії камери помелу, де вони знову захоплюються в рух потоком енергоносія. Дрібна фракція з потоком газу потрапляє в сепаратор 14, осідає і потрапляє у збірник 16. Газ виводиться на кінцеву очистку через трубу 15. Такі млини використовуються для тонкого й надтонкого помелу.

Струменевий млин із трубчастою камерою (рис. 6.16, в) складається з труб висхідного 20 і східного 24 потоків. Ці дві труби з'єднані між собою знизу дугоподібною камерою помелу 19, а зверху сепараційною трубою 21. З колектора 17 через сопла 18 у камеру помелу підводять енергоносії. Сопла 18 розміщені таким чином, що енергоносії на виході з них перетинаються. Матеріал на подрібнення подається через воронку 25 і вводиться в робочу зону ежектором 26, енергоносії подаються через трубку 27. Частинки матеріалу підхоплюються струменями енергоносія, і відбувається їх подрібнення від ударів між собою і по стінках і стирання. Поток енергоносія частинки піднімаються по трубі 20, після чого потрапляють у сепараційну трубу, де відбувається поворот газопилового потоку. Крупніші частинки потрапляють до периферії і зі східним потоком повертаються по трубі 24 для повторного подрібнення. Потік енергоносія з дрібними частинками проходить через жалюзійну решітку 23, яка виконує функцію відбійника крупних часток, і через патрубок 22 прямує до фільтрів для відділення від газопилової суміші цільового продукту.

Струменеві млини мають ряд переваг, серед яких варто назвати відсутність рухомих частин, малий знос стінок камери помелу і, як наслідок, низьке забруднення цільового продукту частинками матеріалу камер помелу тощо. Розрахунок і проектування струйних млинів зазвичай

засновуються на використанні експериментальних даних, які отримують під час проведення експериментів на модельних установках. Результати здебільшого залежать від дисперсного складу продукту помелу й фізико-механічних властивостей матеріалу, який підлягає подрібненню.

Запитання для самоперевірки

1. Наведіть конструкції і опишіть принцип дії барабанного млина. Для помелу яких матеріалів використовують такі млини?

2. Які існують схеми руху тіл перемелювання в обертовому барабані барабанного млина? Під дією яких навантажень відбувається подрібнення в кожній із цих схем?

3. Для помелу яких матеріалів використовують струменеві млини або подрібнювачі? Які їх переваги порівняно з іншими конструкціями млинів?

4. Які існують схеми струменевих млинів за конструкцією камери помелу?

5. У яких млинах помел відбувається одночасною дією роздавлювальних і стиральних навантажень?

Список літератури

1. *Назаренко І. І.* Машини для виробництва будівельних матеріалів : підручник / І. І. Назаренко. – К. : КНУБА, 1999. – 488 с.
2. *Білецький В. С.* Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Частина І. Підготовчі процеси : посібник / В. С. Білецький, Т. А. Олійник, В. О. Смирнов та ін. – Кривий Ріг : Видавець ФОП Чернявський Д. О., 2019. – 200 с.
3. *Сиденко П. М.* Измельчение в химической промышленности. Изд. 2-е, перераб. / П. М. Сиденко. – М. : Химия, 1977. – 368 с.
4. *Серго Е. Е.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учебник для вузов / Е. Е. Серго. – М. : Недра, 1985. – 285 с.
5. *Коваленко І. В.* Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв : підручник / І. В. Коваленко, В. В. Малиновський. – К. : Інрес: Воля, 2005. – 264 с.
6. *Гусев Ю. И.* Конструирование и расчет машин химических производств : учебник для машиностроительных вузов по специальности «Химическое машиностроение и аппаратостроение» / Ю. И. Гусев, И. Н. Карасев, Э. Э. Кольман-Иванов и др. – М. : Машиностроение, 1985. – 408 с.
7. *Сокур М. І.* Підготовка корисних копалин до збагачення : монографія / М. І. Сокур, В. С. Білецький, О. І. Єгурнов та ін. – Кременчук : Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, Академія гірничих наук України. ПП Щербатих О.В., 2017. – 392 с.
8. *Бахталовский И.В.* Механическое оборудование керамических заводов : учебник для техникумов промышленности строительных материалов / И. В. Бахталовский, В. П. Барыбин, Н. С. Гаврилов. – М. : Машиностроение, 1982. – 432 с.
9. *Назаренко І. І.* Основи проектування і конструювання машин та обладнання переробних виробництв : навчальний посібник / І. І. Назаренко, І. М. Берник. – К. : Аграр Медіа Груп, 2013. – 544 с.
10. *Назаренко І. І.* Машини і устаткування підприємств будівельних матеріалів. Конструкції та основи експлуатації : підручник / І. І. Назаренко, О. В. Туманська. – К. : Вища школа, 2004. – 504 с.

11. *Хмара Л. А.* Дробильно-сортувальні заводи і устаткування : навч. посіб. / Л. А. Хмара, О. С. Шипілов, О. Г. Онищенко. – Полтава : ПолтНТУ, 2009. – 209 с.

12. *Хмара Л. А.* Машини та обладнання промисловості виробництва будівельних матеріалів, виробів і конструкцій : атлас конструкцій / Л. А. Хмара, С. В. Кравець, В. Г. Нікітін та ін. – Рівне : НУВГП, 2006. – 300 с.

13. *Блохин В. С.* Основные параметры технологических машин. Машины для дезинтеграции твердых материалов: пособие; ч. I / В. С. Блохин, В. И. Большаков, Н. Г. Малич. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2006. – 404 с.

Навчальне видання

**Назаренко Іван Іванович,
Клименко Микола Олександрович,
Дьяченко Олександр Сергійович та ін.**

МЕХАНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ

**Конспект лекцій
У трьох частинах
Частина 1**

Редагування та коректура *Т. В. Івченко*
Комп'ютерне верстання *А. П. Селівестрової*

Підписано до друку 17.05.2023. Формат 60 × 84_{1/16}.
Ум. друк. арк. 3,72. Обл.-вид. арк. 4,0.
Електронний документ. Вид. № 9/І-23

Видавець і виготовлювач
Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002.