

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування

Навчально-науковий механічний інститут
Кафедра будівельних, дорожніх та меліоративних машин

02-01-554М

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до вивчення розділу

«Механічні властивості дисперсних матеріалів»
навчальної дисципліни

**«Створення інноваційних робочих процесів
машин обробки дисперсних матеріалів»**

для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня
за освітньо-професійною програмою
«Інжиніринг машин і обладнання»
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою
з якості ННМІ
Протокол № 1 від 27.08.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні рекомендації до вивчення розділу «Механічні властивості дисперсних матеріалів» навчальної дисципліни «Створення інноваційних робочих процесів машин обробки дисперсних матеріалів» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг машин і обладнання» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» денної та заочної форм навчання. [Електронне видання] / Науменко Ю. В. – Рівне : НУВГП, 2024. – 118 с.

Укладач: Науменко Ю. В., д.т.н., професор кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин.

Відповідальний за випуск: Тхорук Є. І., к.т.н., доцент, в. о. завідувача кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин.

Керівник групи забезпечення спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» Кравець С. В.

Попередня версія розрахункового практикуму: 02-01-404М

© Ю. В. Науменко, 2024

© НУВГП, 2024

ЗМІСТ

Вступ.....	5
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РОБОЧІ СЕРЕДОВИЩА ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН.....	8
РОЗДІЛ 2. РІДКІ СЕРЕДОВИЩА.....	9
РОЗДІЛ 3. ЗЕРНИСТІ (ДИСПЕРСНІ) СЕРЕДОВИЩА.....	15
3.1. Поняття зернистих (дисперсних) матеріалів.....	15
3.2. Класифікація зернистих матеріалів.....	16
3.3. Класифікація властивостей зернистих матеріалів.....	16
3.3.1. Властивості речовини матеріалу.....	16
3.3.2. Властивості окремих частинок.....	17
3.3.3. Властивості зернистого матеріалу.....	18
3.3.4. Властивості зернистого тіла або певного стану зернистого матеріалу.....	20
3.4. Склад та структура зернистих матеріалів.....	22
3.5. Геометричні властивості зернистих матеріалів.....	23
3.5.1. Розміри та форма твердих частинок.....	23
3.5.2. Гранулометричний склад.....	25
3.5.2.1. Диференціальна та інтегральні криві розподілення частинок за розмірами.....	28
3.5.3. Типи упаковки сферичних елементів.....	30
3.5.4. Зміна об'єму матеріалу.....	36
3.6. Густина зернистих матеріалів.....	39
3.7. Взаємодії між твердими частинками.....	45
3.7.1. Зв'язні властивості зернистих матеріалів.....	46
3.7.1.1. Аутогезія зернистих матеріалів.....	46
3.7.1.2. Адгезія зернистих матеріалів.....	54
3.7.1.3. Злежування зернистих матеріалів.....	58
3.7.2. Фрикційні властивості зернистих матеріалів.....	60
3.7.2.1. Кут природного укусу та кут обрушення....	62
3.7.2.2. Реологічні властивості зернистих матеріалів.....	72

3.7.2.3. Коефіцієнти та кути внутрішнього і зовнішнього тертя.....	78
3.8. Рухливість або текучість зернистих матеріалів.....	90
3.9. Вологість зернистих матеріалів.....	94
3.10. Гранулярна температура зернистих (дисперсних) матеріалів.....	96
Питання та завдання для самоконтролю.....	102
Список літератури.....	104
Додаток Гравітаційні течії зернистих (дисперсних) матеріалів.....	108

Вступ

Метою вивчення навчальної дисципліни «Створення інноваційних робочих процесів машин обробки дисперсних матеріалів» є:

- ознайомлення із основами моделювання та аналізу інноваційних робочих процесів і динамічних режимів доволі широкого класу машин обробки дисперсних матеріалів багатогалузевого призначення, а також набуття практичних навичок прогнозування та керування поведінкою оброблюваних середовищ в робочих камерах і створення на основі цього вискоелективних процесів та обладнання підприємств будівельних матеріалів;

- формування здатності розуміти фізичну сутність інноваційних робочих процесів машин обробки дисперсних матеріалів та використовувати основні закони протікання технологічних процесів у комплексній виробничо-технологічній діяльності;

- формування здатності виконувати необхідні розрахунки основних технологічних та конструктивних параметрів машин обробки дисперсних матеріалів на основі методів прогнозування та аналізу інноваційних робочих процесів переробки робочих середовищ;

- формування творчого мислення, об'єднання фундаментальних знань основних законів і методів розрахунку інноваційних технологічних процесів та конструкцій машин обробки дисперсних матеріалів для переробки робочих середовищ з проведенням досліджень, із наступною обробкою і аналізом їх результатів;

- формування навичок самостійного проведення теоретичних та експериментальних досліджень у галузі інноваційних робочих процесів машин обробки дисперсних матеріалів.

Основним завданням дисципліни є:

- навчання досконало орієнтуватись у характеристиках, залежностях, закономірностях, ефектах та явищах взаємодії робочих органів із оброблюваними середовищами та їх впливі на інноваційні робочі процеси машин обробки дисперсних матеріалів із урахуванням тенденцій їх розвитку і трансформації на основі сучасних технологій;

- підготовка до виробничо-технологічної діяльності у галузі інноваційних робочих процесів машин обробки дисперсних матеріалів, що є конкурентоздатними на світовому ринку високих технологій;

- підготовка до проектно-конструкторської діяльності у галузі інноваційних робочих процесів машин обробки дисперсних матеріалів, що є конкурентоздатними на світовому ринку високих технологій;

- підготовка до наукових досліджень для розв'язування задач, пов'язаних із розробкою інноваційних методів створення інноваційних робочих процесів машин обробки дисперсних матеріалів;

- підготовка до самонавчання та неперервного професійного самовдосконалення.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

знати: основи інноваційних робочих процесів, тенденцій розвитку, методів аналітичних, чисельних та експериментальних досліджень, критеріїв подібності, динамічного аналізу режимів роботи, моделювання режимів руху та взаємодії оброблюваних середовищ із робочими органами, стійкості режимів руху, оцінювання ефективності робочих процесів машин обробки дисперсних матеріалів;

вміти: застосовувати основні методи прогнозування та аналізу інноваційних робочих процесів на практиці при розрахунку раціональних технологічних та основних конструктивних параметрів машин обробки дисперсних матеріалів, а також самостійно працювати зі спеціальною науково-технічною та довідковою літературою.

Компетентності, що набуваються при вивченні дисципліни

Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми галузевого машинобудування, що передбачають дослідження та/або здійснення інновацій та характеризуються невизначеністю умов та вимог.

Здатність генерувати нові ідеї (креативність).

Здатність приймати обґрунтовані рішення.

Здатність створювати нову техніку і технології в галузі механічної інженерії.

Здатність створювати машини барабанного типу, інноваційні процеси переробки зернистих матеріалів та автоколивні процеси обробки текучих середовищ.

Результати вивчення дисципліни

Знання і розуміння засад технологічних, фундаментальних та інженерних наук, що лежать в основі галузевого машинобудування відповідної галузі.

Здійснювати аналіз, моделювання та створення інноваційних робочих процесів та конструкцій машин барабанного типу.

Здійснювати моделювання та створення міжгалузевого обладнання для переробки різноманітних зернистих матеріалів.

Здійснювати моделювання та створення інноваційних автоколивних процесів переробки текучих робочих середовищ.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РОБОЧІ СЕРЕДОВИЩА ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН

Конструктивні параметри, робочі процеси та потужність приводу технологічних машин в значній мірі визначаються фізико-механічними властивостями оброблюваних середовищ. У камерах таких машин робочим середовищем може бути *рідина, суспензія, тверде тіло та зернистий (дисперсний) матеріал*.

Рідини та суспензії проявляють подібні властивості. Зернисті (дисперсні) матеріали містять велику кількість твердих тіл.

Зернисті (дисперсні) матеріали залежно від швидкості зсувної деформації наближено проявляють властивості деформованого твердого тіла, рідини або газу (рис. 1.1) [1-3]..

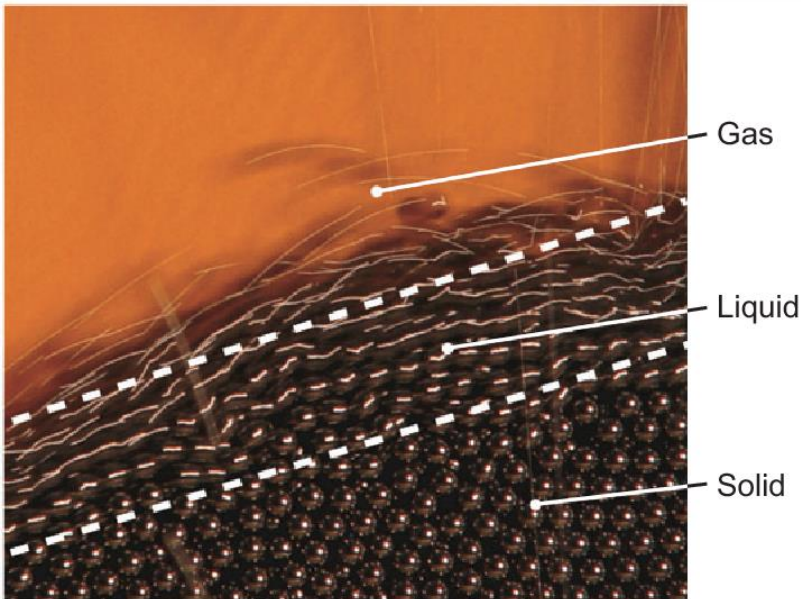


Рис. 1.1. Режими зернистої (дисперсної) течії твердого, рідкого та газоподібного стану, що отримано при русі сталевих кульок (за [2])

РОЗДІЛ 2. РІДКІ СЕРЕДОВИЩА

Основною властивістю рідини є *текучість*. Це здатність необмежено міняти форму під дією дотичних механічних напружень, навіть як завгодно малих, практично зберігаючи при цьому об'єм.

Рідини поділяють на *чисті рідини* та *суміші*.

Сумішшю є система, що складається з двох або більше речовин (компонентів суміші).

Суміші поділяються на *однорідні* та *неоднорідні*. Однорідна суміш є *розчином*. Неоднорідна суміш є *механічною сумішшю*.

Найпоширенішим видом неоднорідної або механічної суміші, як робочого середовища барабанних машин, є *суспензія*. Суспензія або завись є дисперсною системою, яка складається з частинок твердої речовини (дисперсної фази), що розподілені у рідкому суцільному середовищі (дисперсній фазі). Властивості суспензії в значній мірі визначаються поведінкою рідкої фази.

Суспензії отримуються диспергуванням або змішуванням зернистих матеріалів в рідинах. У вигляді суспензій застосовуються будівельні суміші і розчини, шлами та пульпи.

Суспензії поділяються на *дрібнодисперсні*, або розбавлені, та *грубодисперсні*, або концентровані.

Середній розмір частинок грубодисперсних суспензій звичайно є не меншим за 10^{-3} мм. У зв'язку із цим структура таких суспензій є нестійкою. Частинки в них під дією сил тяжіння та відцентрових сил можуть осаджуватись.

В дисперсних системах виникає явище *структуроутворення*, що полягає у фіксації просторового положення частинок внаслідок виникнення контактних зв'язків. Суспензії, в яких виникли просторові ланцюжки з частинок, називають *структурованими*. Структурований стан є характерним для більшості технічних суспензій.

При перемішуванні структурована суспензія може перетворюватись у *неструктуровану*. Така суспензія складається з окремих незв'язаних одна з іншою частинок.

Структурування радикально змінює реологічні властивості

суспензій. Воно підвищує опір деформуванню та послаблює течію. Руйнування структури знижує внутрішнє тертя середовища.

Основними фізико-механічними властивостями рідин є *в'язкість*, початкова *границя текучості*, густина та поверхневий натяг.

Густина і поверхневий натяг рідин, як робочих середовищ барабанних машин, змінюються у порівняно вузьких межах (у 2-3 рази) і суттєвого впливу на гідродинаміку потоків не здійснюють.

В'язкість визначає здатність здійснювати опір переміщенню однієї частини рідини відносно іншої і характеризує її внутрішнє тертя. В'язкість у значній мірі залежить від температури та у меншій – від тиску. Орієнтовно збільшення тиску приблизно на 32 МПа викликає таке ж підвищення в'язкості, як і зниження температури на 1 °К, або 1 °С.

Початкова границя текучості характеризує значення дотичного напруження, нижче якого рідина не тече і проявляє себе як тверде тіло.

В'язкість та границя текучості є *реологічними* властивостями рідини, що характеризують її текучість та деформацію під дією зовнішнього навантаження. Така деформаційна поведінка рідини, як робочого середовища, визначає ефективність реалізація робочих процесів барабанних машин.

У відповідності з реологічними властивостями всі рідини поділяються на *рідкоподібні*, або в'язкі, із нульовим значення границі текучості, та *твердоподібні*, або в'язкопластичні, із ненульовим значенням такої границі.

На відміну від твердоподібних, рідкоподібні рідини не мають границі текучості і достатньо прикласти як завгодно малу зовнішню силу, щоб така рідина потекла.

За характером залежності в'язкості від градієнта зсувної швидкості всі рідкоподібні рідини поділяють на *ньютонівські*, або лінійнов'язкі, та *неньютонівські*, або нелінійнов'язкі.

В'язкість ньютонівських рідин є лінійно пропорційною

похідній модуля швидкості по нормалі до напрямку швидкості. Такі рідини підпорядковуються реологічному закону, запропонованому Ньютоном (1723 р.), аналітичний вираз якого для одномірної течії має вигляд

$$\tau = \mu \frac{dV}{dn}, \quad (2.1)$$

де τ – дотичне напруження зсуву шарів рідини один відносно другого; μ – коефіцієнт пропорційності, що називається динамічним коефіцієнтом в'язкості або динамічною в'язкістю; dV/dn – градієнт швидкості, що характеризує зміну швидкості V на одиницю відстані по нормалі n до вектора швидкості.

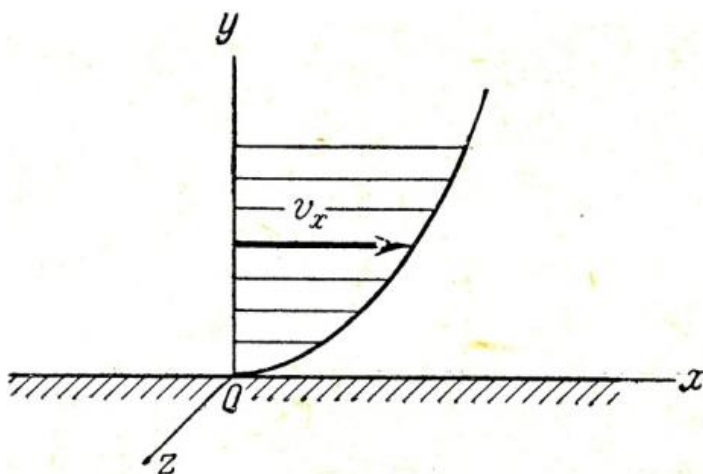


Рис. 2.1. Схема плоскої, у площині xOy , рівномірної течії поблизу твердої стінки, що співпадає із площиною xOz , при $V_x=f(y)$ та $V_y=0$

Ілюстрацію утворення швидкості зсуву dV_x/dy наведено на рис. 2.1, де V_x – швидкість течії; Oy – вісь, що є нормальною до швидкості.

Геометричну інтерпретацію моделі (2.1) для одномірної течії наведено на рис. 2.2.1.

Ньютонівськими рідинами є чисті рідини, однорідні суміші та розбавлені суспензії.

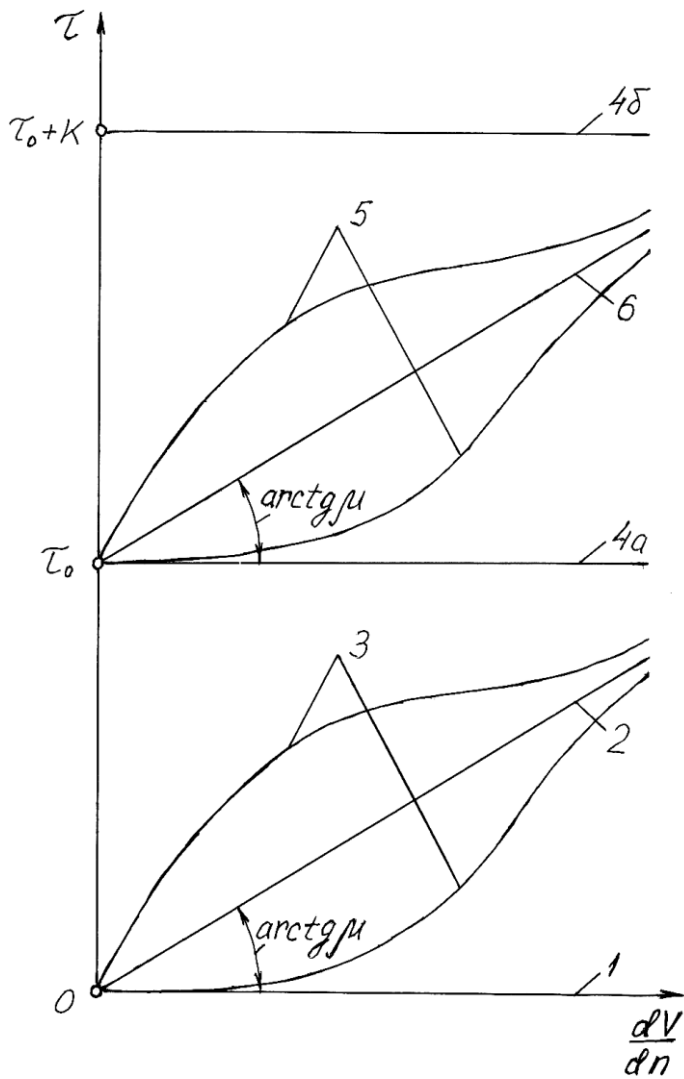


Рис. 2.2. Криві реологічних моделей одномірних течій:
 1 – ньютонівська рідина, 2 – псевдопластична рідкоподібна рідина,
 3 – дилатантна рідкоподібна рідина, 4 – бінгаміська рідина,
 5 – псевдопластична твердоподібна рідина,
 6 – дилатантна твердоподібна рідина

В'язкість неньютонівських рідин є нелінійно пропорційною похідній модуля швидкості по нормалі до напрямку швидкості. Такі рідини не підпорядковуються закону Ньютона (2.1).

Аналітичний вираз реологічної моделі неньютонівської рідини для одномірної течії має вигляд

$$\tau = \left(\mu \frac{dV}{dn} \right)^{\frac{k}{m}}, \quad (2.2)$$

де k та m – реологічні параметри ($k \neq m$), що характеризують ступінь неньютонівської поведінки рідини.

Неньютонівські рідини поділяються на *псевдопластичні рідкоподібні* та *дилатантні рідкоподібні*.

Реологічна модель псевдопластичної рідкоподібної рідини відповідає умові $k/m < 1$ ($k < m$). Геометричну інтерпретацію такої моделі для одномірної течії наведено на рис. 2.2.2. В'язкість псевдопластичної рідкоподібної рідини при повільних рухах є великою і при збільшенні швидкості зсування знижується.

Псевдопластичними рідкоподібними рідинами є концентровані суспензії із асиметричними частинками – полімерні розплави та розчини.

Реологічна модель дилатантної рідкоподібної рідини відповідає умові $k/m > 1$ ($k > m$). Геометричну інтерпретацію такої моделі для одномірної течії зображено на рис. 2.2.3. При збільшенні швидкості зсування дилатантної рідкоподібної рідини в'язкість зростає.

Дилатантними рідкоподібними рідинами є концентровані суспензії із великим вмістом твердої фази – керамічні маси та зибучий пісок.

На відміну від рідкоподібних, твердоподібні рідини мають границю текучості, нижче якої вони не течуть і проявляють себе як тверді тіла.

До твердоподібних або в'язкопластичних рідин, за реологічними властивостями, наближаються концентровані суспензії, що найчастіше використовуються як робочі середовища машин барабанного типу – суміші і розчини, шлами та пульпи.

За характером залежності в'язкості від градієнта зсувної швидкості всі твердоподібні рідини поділяються на *бінгамівські*, або *лінійнов'язкопластичні*, та *небінгамівські*, або *нелінійнов'язкопластичні*.

Аналітичний вираз реологічної моделі бінгамівської рідини має вигляд

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dV}{dn}, \quad (2.3)$$

де τ_0 – границя текучості. Геометричну інтерпретацію моделі (2.3) для одновірної течії наведено на рис. 2.2.4.

Небінгамівські рідини поділяються на *псевдопластичні* та *дилатантні твердоподібні* рідини.

Аналітичний вираз реологічної моделі небінгамівської рідини має вигляд

$$\tau = \left[\tau_0^{\frac{1}{k}} + \left(\mu \frac{dV}{dn} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^k. \quad (2.4)$$

Реологічна модель псевдопластичної твердоподібної рідини відповідає умові $k/m < 1$ ($k < m$). Геометричну інтерпретацію такої моделі для одновірної течії наведено на рис. 2.2.5. При збільшенні швидкості зсування псевдопластичної твердоподібної рідини в'язкість знижується.

Реологічна модель дилатантної твердоподібної рідини відповідає умові $k/m > 1$ ($k > m$). Геометричну інтерпретацію такої моделі для одновірної течії зображено на рис. 2.2.6. При збільшенні швидкості зсування дилатантної твердоподібної рідини в'язкість зростає.

РОЗДІЛ 3. ЗЕРНИСТІ (ДИСПЕРСНІ) СЕРЕДОВИЩА

3.1. Поняття зернистих (дисперсних) матеріалів

Зернистий матеріал є *дисперсною системою*, що містить велику кількість твердих частинок довільної форми, які перебувають у контакті [1]. Простір між частинками заповнено переважно газом (повітрям), рідиною, або частково, газом і рідиною. Властивості такого матеріалу у значній мірі, а іноді і повністю визначаються поведінкою твердої фази.

Зернисті матеріали, на відміну від *гомогенних* сумішей, відносяться до *гетерогенних, неоднорідних* або *багатофазних сумішей*, що характеризуються наявністю макроскопічних неоднорідностей або включень.

Зернистий матеріал суттєво відрізняється від інших гетерогенних сумішей – *суспензії*, що є сумішшю рідини із твердими частинками, та *газозавислості*, що є сумішшю газу із твердими частинками. Зернисті матеріали є *твердими дисперсними сумішами*, в яких тверді частинки утворюють по контактним поверхням єдиний каркас або кістяк. Такі суміші відрізняються порівняно регулярною зернистою структурою, постійною або тимчасовою мінливою.

В реальних умовах сипкі матеріали, як правило, складають полідисперсні системи твердих частинок.

Тверді частинки у дисперсній суміші називаються *дисперсними частинками* або *дисперсною фазою*, а оточуюче середовище – *дисперсійною фазою*.

Структура каркаса або кістяка зернистого матеріалу забезпечує певну рухливість (текучість) у вільному насипному стані під дією гравітаційних сил. Тому така суміш ще називається – *сипким матеріалом* або *сипким тілом*. Крім добре сипких, що вільно течуть, або *незв'язних*, зернисті матеріали можуть бути погано сипкими, що не течуть, або *зв'язними*.

Зернисті матеріали є продукцією багатьох виробництв, у тому числі і багатотоннажних. Вони отримуються подрібненням твердих речовин, виділенням із суспензій, спалюванням газів, кристалізацією, видобуванням із природних кар'єрів та шахт.

3.2. Класифікація зернистих матеріалів

Зернисті матеріали класифікуються за розміром твердих частинок на такі різновиди:

- > 10 мм – *кускові*;
- 2...10 мм – *крупнозернисті*;
- 0,5...2 мм – *дрібнозернисті*;
- 0,05...0,5 – *порошкові*;
- 0,05...10⁻⁴ мм – *пиловидні*;
- 10⁻⁴...10⁻⁶ мм – *ультрадисперсні (наноматеріали)*.

3.3. Класифікація властивостей зернистих матеріалів

Фізико-механічні властивості зернистого матеріалу визначаються його динамічною поведінкою та структуроутворенням.

Найзручніше класифікувати властивості зернистих матеріалів за такими ознаками: властивості *речовини частинок, індивідуальних частинок, зернистого матеріалу та зернистого тіла або певного стану зернистого матеріалу* [2].

3.3.1. Властивості речовини матеріалу

До таких властивостей відносяться:

- *хімічний склад речовини та її природа*;
- *густина*;
- *пружно-пластичні властивості*;
- *твердість*;
- *електропровідність*;
- *діелектричні властивості*;
- *магнітні властивості*;
- *гігроскопічність*;
- *розчинність*;
- *точки плавлення та розм'якшення*.

Від властивостей та природи речовини частинок залежать молекулярні сили аутогезії, можливість виникнення та міцність когезійних контактів між частинками, електрична та магнітна складові сил аутогезії, а також фрикційні властивості при взаємодії частинок між собою та з твердою поверхнею.

Якщо зернистий матеріал готується подрібненням твердого матеріалу, деякі властивості речовини частинок можна визначити

шляхом вимірювання на кусковому матеріалі. Властивості про хімічний склад, гігроскопічність, розчинність, точки плавлення дозволяють якісно оцінити можливість суттєвих змін стану та міцності зернистого матеріалу внаслідок хімічних реакцій, насичення вологою, утворення кристалічних містків та спікання у зоні контакту частинок. Всі ці властивості матеріалу частинок знаходять вираз у міцності та технологічних характеристиках зернистого матеріалу.

3.3.2. Властивості окремих частинок

Ця група властивостей, разом із властивостями речовини частинок, містить специфічні властивості індивідуальних частинок твердої речовини зернистого матеріалу. Відмінними специфічними властивостями частинки, як мікроскопічного об'єму твердої речовини, є *геометричні параметри*, зумовлені обмеженим об'ємом, *поверхневі властивості*, пов'язані із наявністю поверхонь розмежування, *аутогезійна здатність* частинок та їх *фрикційні властивості*.

Геометричними параметрами є:

- *розміри*;
- *форма*;
- *шорсткість поверхні*.

Ці параметри залежить від способу одержання та обробки частинок, а також від властивостей речовини частинок.

Такі ж чинники, разом із властивостями оточуючого середовища, визначають поверхневі властивості частинок. До них відносяться:

- *хімічний склад поверхневого шару, що може бути відмінним від стану речовини усередині частинки*;
- *наявність, характер та хімічний склад шарів адсорбованих речовин*;
- *пружно-пластичні властивості поверхневого шару, включаючи плівки адсорбованих речовин*;
- *твердість поверхневого шару*;
- *електропровідність такого шару*;
- *діелектричні властивості шару*;
- *змочуваність шару*;
- *розчинність шару*.

Поверхневі властивості та геометричні параметри частинок визначають характеристики індивідуальних контактів між частинками. Вони впливають на всі складові сили аутогезії.

Аутогезійна здатність частинок містить:

- *міцність контактів на розрив за відсутності підтискання;*
- *темп зростання міцності контактів при підтисканні частинок.*

Геометричні параметри, поверхневі властивості та властивості речовини частинок визначають також величину тертя у контакті між частинками, тобто фрикційні властивості частинок.

Основними фрикційними властивостями є:

- *кут тертя в індивідуальних контактах;*
- *кут зчеплення.*

3.3.3. Властивості зернистого матеріалу

Зернистий матеріал є сукупністю множини частинок. Частинки можуть приймати найрізноманітнішу упаковку і тим самим змінювати міцнісні та технологічні характеристики зернистого матеріалу. У дану групу, крім властивостей частинок, включено властивості, які не залежать від щільності їх упаковки та є константами для даного зернистого матеріалу

Основними властивостями зернистого матеріалу є *розподіл частинок за розмірами, аутогезійна здатність матеріалу, його внутрішнє тертя, опосередковані та технологічні характеристики.*

Специфічною характеристикою зернистого матеріалу, як сукупності частинок, є розподіл частинок за розмірами або дисперсний стан. *Середній розмір частинок, характер розподілу, верхній та нижній граничні розміри* частинок – основні фактори, що визначають число контактів і тим самим впливають на всі міцнісні та реологічні характеристики матеріалу.

Аутогезійна здатність частинок та дисперсний стан визначають аутогезійну здатність зернистого матеріалу, тобто його здатність протистояти розтягуючим навантаженням за рахунок сил аутогезії. Ця здатність проявляється у різному ступені в залежності від умов формування зернистого тіла. Такі

умови здійснюють вирішальний вплив на міцнісні характеристики, що визначають здатність зернистого тіла протистояти руйнуванню. Самі міцнісні характеристики пов'язані із певною щільністю упаковки частинок і тому не входять у дану групу властивостей.

Аутогезійна здатність зернистого матеріалу містить:

- *міцність шару на розрив при стандартних умовах формування;*

- *темпи зростання міцності шару при ущільненні;*

- *енергетичні та лінійні параметри.*

Фрикційні властивості частинок та дисперсний склад визначають внутрішнє тертя зернистого матеріалу. Від такого тертя залежать умови деформування, течії та стискання зернистого матеріалу. Сила тертя, або опір зсуву, даного матеріалу змінюється у широких межах в залежності від щільності упаковки частинок та нормального навантаження. Тому характеристиками фрикційних властивостей зернистого матеріалу є інші величини, що не залежать від зазначених чинників.

Аутогезійна здатність та внутрішнє тертя є основними властивостями зернистого матеріалу, які визначають всі міцнісні та реологічні характеристики. Такі характеристики в основному не є пов'язаними із конкретною щільністю упаковки і є однозначними для даного матеріалу. Тому їх включено у дану групу властивостей зернистих матеріалів. До них відносяться, зокрема, кути внутрішнього тертя.

Характеристиками внутрішнього тертя зернистого матеріалу є:

- *кути внутрішнього тертя;*

- *діаграми зсувних випробувань.*

Окрім основних характеристик зернистих матеріалів, які впливають із уявлень про такий матеріал, як про суцільне тверде тіло, існує низка опосередкованих характеристик, що базуються на різних проявах, притаманних матеріалу як дисперсному середовищу. Такі характеристики залежать одночасно від аутогезійних та фрикційних властивостей, а також від щільності частинок. До таких характеристик, які не є пов'язаними із певною

щільністю упаковки частинок, відносяться *здатність до ущільнення зернистих матеріалів, текучість, сипучість, здатність до злипання, кути природного укусу та обрушення.*

Деякі характеристики такого роду є тісно пов'язаними із певними технологічними процесами та знаходять безпосереднє застосування на практиці. До таких технологічних характеристик зернистого матеріалу відносяться *здатність до грудкоутворення, розпилюваність, здатність до псевдозрідження, здатність до злежування, схильність до склепоутворення (максимальний розмір склепоутворюючого отвору).* Між опосередкованими та технологічними характеристиками можна провести умовну межу, оскільки деякі характеристики, наприклад здатність до ущільнення, текучість, кут природного укусу, можуть виступати, як в одній, так і в іншій якості.

3.3.4. Властивості зернистого тіла або певного стану зернистого матеріалу

До такої групи відносяться властивості, що є характерними для якогось конкретного стану зернистого матеріалу (шару, засипки, гранули та інш.) або на певній стадії технологічного процесу (наприклад, у процесі течії матеріалу у бункері, по жолобу, в екструдері, у камері обертового барабана, при зберіганні матеріалу в бункерах, мішках та інш.).

Основними властивостями зернистого тіла, або певного стану зернистого матеріалу, є: *щільність упаковки частинок, стан контактів між частинками, міцнісні та технологічні характеристики.*

Специфічними характеристиками конкретного зернистого тіла, або стану зернистого матеріалу, є *щільність упаковки частинок та стан або міцність контактів між частинками.*

Щільність упаковки частинок разом із дисперсним станом матеріалу визначає число контактів. Щільність залежить від способу формування тіла, дисперсного стану матеріалу, його аутогезійної здатності та внутрішнього тертя. Основними параметрами щільності упаковки частинок зернистого матеріалу є: *ступінь заповнення об'єму за відсутності вільної поверхні матеріалу, ступінь заповнення об'єму камери матеріалом при*

наявності його вільної поверхні, розпорошення (дилатансія) матеріалу.

Стан контактів, тобто *ступінь зближення частинок*, наявність когезійної взаємодії, капілярної вологи, *утворення твердих містків між частинками* внаслідок хімічних реакцій, кристалізації, спікання визначають величину міцності контактів та силу тертя у контактах. Стан контактів обумовлено властивостями частинок, умовами оточуючого середовища, силою підтискання частинок, яка у свою чергу залежить від способу формування зернистого тіла та дисперсного складу матеріалу.

Умови формування зернистого тіла визначають, у якій мірі реалізується аутогезійна здатність матеріалу та якої міцності набуває зернисте тіло. Щільність упаковки частинок та стан контактів визначають міцнісні характеристики зернистого тіла. Основними міцнісними характеристиками зернистого тіла є величини, які визначають умови зміни об'єму, руйнування та зсувного деформування тіла. Саме ці величини є необхідними для розрахунку конкретних технологічних процесів та визначення якості продукту. Умови розрахунку тіла визначаються *міцністю на розрив* та *міцністю на роздавлення або стискання*. Умови деформування та течії зернистого тіла виражаються *опором зсуванню*. *Структурна міцність* визначає можливість ущільнення матеріалу, тобто зменшення об'єму.

Основні міцнісні характеристики зернистого тіла, що базуються на механіці суцільного середовища, не завжди вдається прикласти до розрахунків технологічних процесів зі складним механізмом руйнування тіла. Тоді використовується низка технологічних характеристик, що базуються на моделюванні реальних процесів. До таких характеристик відносяться *динамічна міцність тіл*, *здатність до стирання*, *стійкість проти ерозії повітряним потоком*, *здатність до осипання*, *здатність до обрушення*, *здатність до струшування (пилових шарів)* та *опір проникненню твердих тіл*.

3.4. Склад та структура зернистих матеріалів

Кістяк зернистого матеріалу є складним конгломератом компактно розташованих твердих частинок, які можуть мати різну природу, розміри, форму та орієнтацію у просторі.

Частинки можуть бути незв'язними між собою (*незв'язний зернистий матеріал*) або зв'язними (*зв'язний зернистий матеріал*), міцність зв'язків яких, звичайно, є у багато разів меншою за міцність самих частинок.

У неущільненому насипному стані частинки контактують лише в окремих точках або по поверхнях малих розмірів, утворюючи пористу структуру, вільний простір якої заповнено газоподібними або частково рідкими речовинами.

Якщо простір між частинками (пори або поровий об'єм) заповнено повністю газом (повітрям) або рідиною, то такі зернисті середовища називають *двофазними*. У випадку, коли пори заповнено газом та частково рідиною, їх називають *трифазними*.

Саме структура та структурні зв'язки визначають фізичну сутність механічних процесів, пов'язаних як із рухом (течією), що може супроводжуватись *зрідженням* та *розпорошенням*, зернистих матеріалів, так і з їх здатністю під дією тиску досягати різного ступеня ущільнення та *агломерування* (компактування) дисперсних частинок.

За умови дії зовнішніх силових факторів відбувається деформування первинної структури зернистого середовища, і подальша поведінка таких матеріальних систем визначається їх опором процесам ущільнення та зміцнення, що відбуваються при цьому, коли весь об'єм матеріалу або головна структурна його частина залишається у твердому стані протягом всієї силової взаємодії.

Така поведінка зернистих матеріалів зумовлена сукупністю властивостей структури *зернисто-пористого тіла* (твердого пористого тіла) за різного ступеня їх ущільнення.

Тверда частина зернистих матеріалів складається із окремих частин та їх агрегатів, зерен та уламків кристалічної або аморфної будови.

Газоподібні включення (пари, гази) постійно містяться у

зернистих середовищах як у вільному, так і у розчиненому стані.

Рідкі речовини у зернистих сумішах присутні або як необхідна технологічна складова даної рецептури, або містяться у твердих компонентах та поровому просторі.

3.5. Геометричні властивості зернистих матеріалів

Зернисті матеріали лише у рідких випадках складаються із однакових частинок. Якщо всі частинки розглядуваного матеріалу мають однаковий розмір, то зернистий матеріал є монодисперсним. Більша частина зернистих матеріалів, що використовуються у виробництві, є полідисперсними системами окремих частинок, які різняться як за формою, так і за розмірами.

Основними геометричними властивостями зернистих матеріалів є розміри та форма частинок, гранулометричний склад, типи упаковки елементів та дилатансія.

3.5.1. Розміри та форма твердих частинок

Розміри частинок можуть змінюватись у дуже широких межах, від тисячних часток міліметра (ультрадисперсні матеріали) до метрів (крупнокускові матеріали). Форма частинок також може змінюватись у широкому діапазоні, від кулеподібної до голчастої. Різноманітність форм утруднює кількісну оцінку розмірів навіть однієї частинки. Для подолання таких труднощів введено поняття про середній або еквівалентний діаметр частинки.

Середній діаметр може бути обчислений за трьома вимірами частинки (довжиною, шириною та висотою), як середнє арифметичне

$$d = \frac{lbh}{3},$$

або середнє геометричне значення

$$d = \sqrt[3]{lbh},$$

де l , b , h – відповідно, довжина, ширина та висота частинки, що обмірюється.

Частинки неправильної форми можуть характеризувались еквівалентним діаметром

$$d_e = \frac{6}{S_n}, \quad (3.1)$$

де $S_n=S/V$ – питома поверхня частинки, S – поверхня частинки, V – об’єм частинки.

Значення S_n визначаються звичайно для порівняно великої порції зернистого матеріалу, що складається з багатьох частинок. У цьому випадку вираз (3.1) дозволяє визначити середній діаметр частинок досліджуваної порції матеріалу. Параметр S_n визначається на спеціальному приладі, принцип дії якого базується на вимірюванні опору, який здійснює шар певної порції зернистого матеріалу потоку газу, що прокачується через нього. Параметр S_n використовується для характеристики властивостей зернистого матеріалу у випадках, коли вони у значній мірі залежать від площі поверхні його частинок; наприклад, хімічна активність, розчинність, теплопровідність, звукопроникність суттєво залежать від S_n . Значення S_n змінюється у широкому діапазоні (від декількох тисяч до декількох мільйонів м^{-1}) у залежності від ступеня дисперсності частинок. Наприклад, питома поверхня цементу вимірюється у $\text{см}^2/\text{г}$, визначається як відношення поверхні частинки на її масу і набуває значення 2000-6000 $\text{см}^2/\text{г}$.

Частинки неправильної форми можуть характеризуватись також діаметром умовної сфери d_e , що є еквівалентною об’єму частинки V

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}.$$

Реальна форма частинки враховується фактором форми Φ , що є відношенням поверхні кулі πd_e^2 , об’єм якої $(\pi d_e^3)/6$ дорівнює об’єму частинки, до фактичної поверхні частинки S

$$\Phi = \frac{6}{S_n d_e}.$$

Для частинок сферичної форми значення фактора форми $\Phi=1$, в інших випадках – $\Phi<1$. Для округлих частинок – $\Phi=0,77$, для частинок кутастої форми – $\Phi=0,66$, для видовжених частинок

– $\Phi=0,58$, для пластинчастих частинок – $\Phi=0,43$.

Для визначення питомої поверхні зернистих матеріалів застосовують методи, що базуються на залежностях значення гідравлічного опору, адсорбції та інших параметрів від величини поверхні контакту. Найширше використовується метод визначення питомої поверхні за стаціонарною фільтрацією розріджених газів.

Із різного роду середніх параметрів, що характеризують полідисперсну систему, стосовно до зернистих матеріалів найбільш розповсюдженим є *статистичний середньомасовий діаметр* \bar{d} . Він розраховується як середнє арифметичне еквівалентних діаметрів частинок різних фракційних класів, на які розбивається діапазон полідисперсного розподілу частинок за розмірами

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

де d_{ei} – середнє значення еквівалентного діаметра i -го фракційного класу; m_i – маса частинки i -го фракційного класу; k – число фракційних класів, на які розбито всю шкалу значень d_e (звичайно $k=5-10$).

Для оцінки ступеня дисперсності зернистих матеріалів використовують різні характеристики: найбільший d_{max} та найменший d_{min} розмір частинок, відношення $R=d_{max}/d_{min}$ найбільшого розміру частинок до найменшого (діапазон варіювання), середній розмір (діаметр) d частинок, питому поверхню S_n та гранулометричний склад.

Діапазон варіювання R деяких зернистих матеріалів може приймати доволі великі значення (понад 1000).

3.5.2. Гранулометричний склад

Гранулометричний або *дисперсний склад* зернистого матеріалу є характеристикою, що показує, яку частку за масою, об'ємом, поверхнею або кількістю частинок становлять певні за розміром частинки або групи частинок у всій масі проби, що

аналізується.

Для експериментального визначення гранулометричного складу зернистих матеріалів використовуються такі методи: прямого вимірювання, ситового аналізу, седиментаційного аналізу, фільтрації, електрокласифікації, фотоімпульсний, телевізійний та кондуктометричний.

Пряме вимірювання полягає у визначенні розмірів частинок кускових та крупнозернистих матеріалів за допомогою відповідних вимірювальних інструментів, а частинок дрібнозернистих матеріалів – за допомогою інструментального мікроскопу. Достовірні результати визначення розмірів частинок можуть бути досягнуті лише шляхом вимірювання великої їх кількості. Якщо частинки мають різну форму та розміри, число вимірювань має бути не менше 2000. Метод безпосереднього вимірювання вважається трудомістким.

Ситовий аналіз полягає у розділенні порції зернистого матеріалу на класи (фракції) за допомогою послідовного просіювання при струшуванні через набір сит із отворами різної величини.

Седиментаційний метод аналізу гранулометричного складу зернистого матеріалу базується на різниці у швидкостях осадження твердих часток у рідині. При заданих властивостях рідини та твердого матеріалу *швидкість осадження частинок є пропорційною квадрату їх діаметра.*

Фільтраційний метод аналізу використовується для визначення зовнішньої питомої поверхні частинок зернистого матеріалу шляхом вимірювання швидкості фільтрації повітря через шар досліджуваного матеріалу.

Електрокласифікацію зернистих матеріалів здійснюють шляхом електрофільтрування.

Фотоімпульсний метод полягає у почерговому вимірюванні кількості світла, що розсіюється окремими частинками зернистого матеріалу.

Телевізійний метод полягає у визначенні яскравості частинок та меж між ними.

Кондуктометричний метод полягає у пропусканні через калібрований мікроотвір суспендованого зернистого матеріалу.

Найпоширенішим методом визначення гранулометричного складу зернистого матеріалу є ситовий аналіз. Принцип ситового аналізу полягає у тому, що певна порція досліджуваного продукту пропускається через набір сит. Порція матеріалу поміщається у верхнє сито. Зібрана стопка сит із матеріалом закріплюється на столі із віброприводом, що вмикається на певний час. Після просіювання зважуються залишки матеріалу на кожному із сит, а також частинки, що пройшли через найтонкіше сито у піддон. Значення класу визначається розміром отворів сусідніх сит. Наприклад, якщо нижнє сито має отвір, що дорівнює 0,5, а верхнє 0,7 мм, то між цими ситами після просіювання залишиться фракція зернистого матеріалу класу (0,5...0,7) мм.

Діаметр частинок зернистого матеріалу розглядається як випадкова одновимірна величина, а для описування його гранулометричного складу найчастіше використовуються методи статистичної математики.

Середній розмір частинок \bar{d} полідисперсного матеріалу обчислюється за результатами визначення гранулометричного складу

$$\bar{d} = \frac{d_1 m_1 + d_2 m_2 + d_3 m_3 + \dots + d_k m_k}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_k} = \sum_{i=1}^k d_i m_i,$$

де $d_1, d_2, d_3, \dots, d_k$ – середній розмір частинок окремих фракцій ситового аналізу, що визначається як півсума розмірів отворів двох сит – найближчого верхнього, через яке поїшли всі частинки фракції, та сита, на якому частинки цієї фракції затримались, не просіявшись; $m_1, m_2, m_3, \dots, m_k$ – масові частки

кожної фракції (залишки на ситах) ($\sum_{i=1}^k m_i = 1$).

Результати експериментального визначення d_{ei} для всіх k фракційних класів, на яких розбито шкалу значень d_e зернистого матеріалу, що аналізується, дозволяють побудувати гістограму. Вона є графічним зображенням функції розподілу випадкових величин, що приймає після експериментального визначення низку дискретних значень. Гістограма наочно характеризує гранулометричний склад або визначає вид та параметри

аналітичного закону розподілу частинок у масі зернистого матеріалу (за діаметром, масою, поверхнею, кількістю).

За результатами ситового аналізу будується крива розподілу мас частинок за розмірами. Для цього у прямокутній системі координат по вертикальній осі відкладається масова часткам всіх фракцій, що пройшли через дане сито, а по горизонтальній осі – розмір комірок цього сита (тобто верхній розмір фракції частинок).

3.5.2.1. Диференціальна та інтегральні криві розподілення частинок за розмірами

Гістограми розподілу дисперсних частинок за розмірами або криві гранулометричного складу представлено на рис 1.

На рис. 3.1а наведено *диференціальну криву розподілу*, яка характеризує вміст $P(d)$ (у частках або відсотках) фракції частинок розміром d . При побудові по осі абсцис відкладається виміряні значення d_e для окремих фракцій, а по осі ординат – вміст відповідних фракцій $P(d)$. Для зручності практичних розрахунків диференціальна крива може бути зображена у вигляді гістограми – послідовності прямокутних площадок, ординати яких визначають вміст $P(d)$ фракцій частинок на малому інтервалі розмірів між d' та d'' у загальному діапазоні розмірів від d_{min} до d_{max} .

На рис. 3.1б наведено *інтегральну (або кумулятивну) криву розподілу*: по ординаті – сумарний (накопичений) вміст фракцій,

тобто частка (звичайно – масова) частинок
$$F(d) = \sum_{d_{min}}^d P(d) \Delta d$$

розмірами від мінімального d_{min} до поточного d . Доля часток у діапазоні діаметрів від d' до d'' , тобто відносно кількості даної фракції у суміші, відображається відрізком Δx на ординаті цієї кривої. У межах однієї фракції або класу d_e приймається сталим. Середній розмір вузької фракції для наближених розрахунків може бути визначена як середньоарифметична величина із d' та d'' .

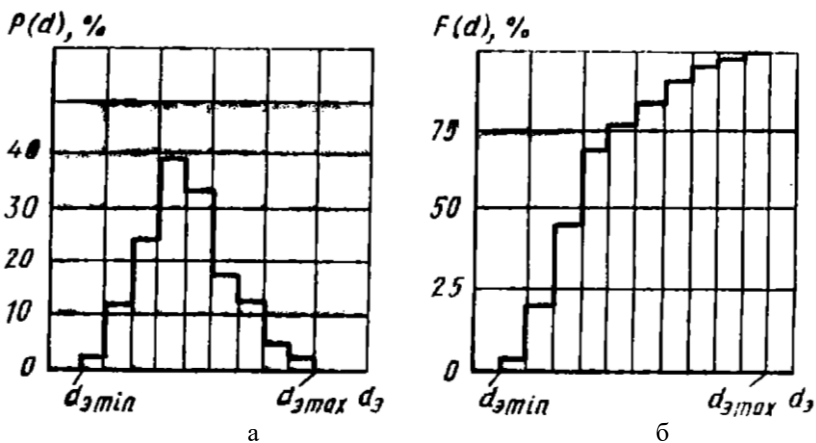


Рис. 3.1. Гістограми розподілу дискретних частинок за розмірами: а – диференціальна крива розподілу, б – інтегральна крива розподілу

За допомогою кривих розподілу легко знайти вміст кожної досить вузької фракції у суміші.

Гістограми дають загальну картину розподілу частинок за розмірами. Чим вужчим є інтервал, яким обмежено розміри частинки, тим ближче є матеріал до монодисперсного стану. Навпаки, чим нижчим є максимум на гістограмі та ширшим є інтервал розмірів частинок, тим більш полідисперсним є матеріал, що аналізується.

На рис. 3.2 наведено, для порівняння, схеми найбільш типових якісних експериментальних диференціальних кривих розподілу частинок зернистих матеріалів за розмірами, що було подрібнено у різних дробарках.

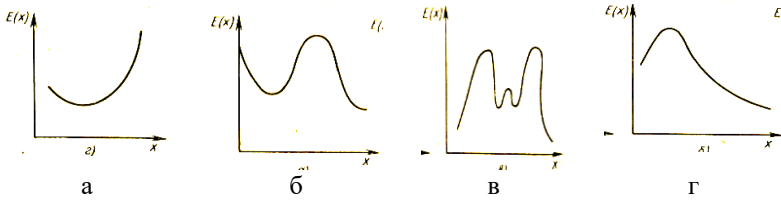


Рис. 3.2. Схеми експериментальних кривих розподілу частинок за розмірами для подрібнених зернистих матеріалів: а – у щокочових дробарках, б – у валкових дробарках, в – у роторних дробарках, г – у молоткових дробарках

3.5.3. Типи упаковки сферичних елементів

Упаковка елементів зернистого матеріалу характеризує взаємне розташування та взаємодію частинок у нерухомому шарі матеріалу. Такий шар матеріалу вважається щільним, в якому кожна частинка має деяке число контактів із сусідніми, що забезпечує її нерухомість та стійкість. Загалом типи упаковок характеризуються значною різноманітністю.

Особливості упаковки суттєво впливають на реалізацію технологій із застосуванням шару зернистого матеріалу.

Основними параметрами, що визначають різновид упаковки шару зернистого матеріалу, є: розмір частинки d , об'ємна концентрація твердої фази ζ та порожність $\varepsilon=1-\zeta$, що відповідає частці порожнин у шарі.

Найпростішим прикладом упаковки є випадок взаємного розташування елементів шару монодисперсного зернистого матеріалу, що складається із частинок у вигляді сфер однакового діаметра [3].

Упаковки куль у шарі поділяються на регулярні та випадкові.

Найпоширенішими типами *регулярних укладок* є кубічна (рис. 3.3), октаедрична (рис. 3.4), тетраедрична (рис. 3.5) та ромбоедрична (рис. 3.6). Друга та третя із зазначених упаковок дають у нескінченному об'ємі максимально можливу концентрацію твердої фази $\zeta \approx 0,7405$.

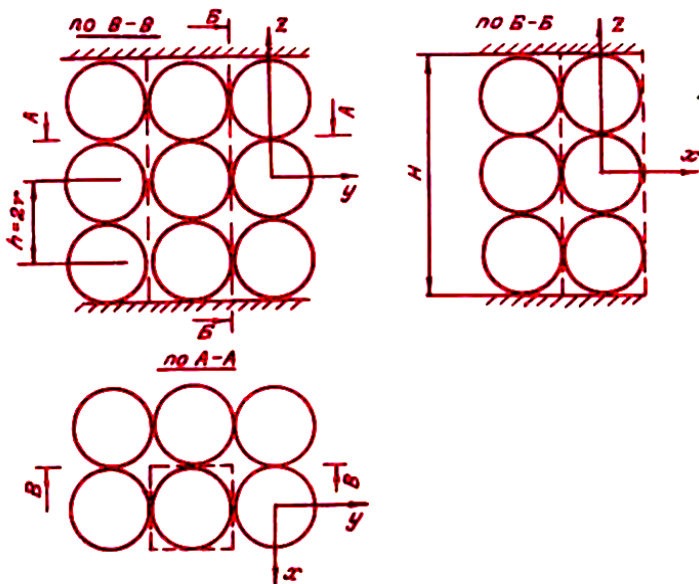


Рис. 3.3. Кубічна укладка

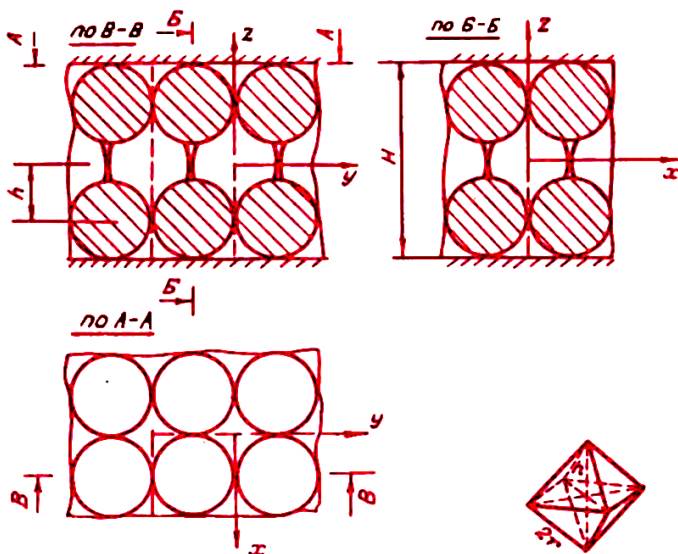


Рис. 3.4. Октаедрична укладка

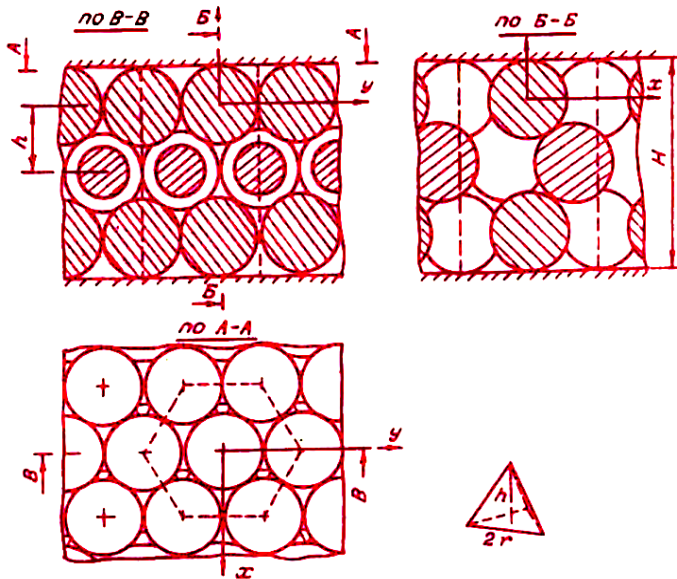


Рис. 3.5. Тетраэдрична укладка

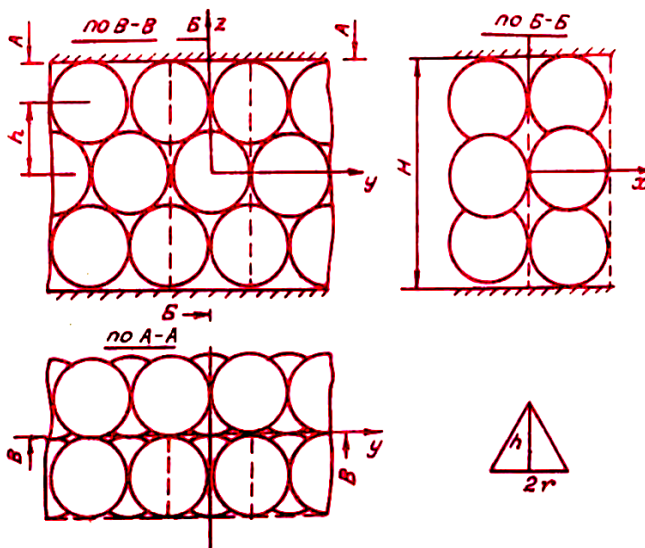


Рис. 3.6. Ромбоэдрична укладка

На рис. 3.3-3.6 введено позначення: $r=d/2$ – радіус кулі, h – відстань по осі z між центрами сусідніх шарів куль, H – відстань між твердими стінками. У напрямку осей x та y укладка вважається необмеженою. На схемах також наведено ілюстрації до розрахунку h .

Якщо в об'ємі шару V об'єм куль становить V_k , то $\zeta=V_k/V$.

У випадку кубічної упаковки

$$\zeta = \frac{\pi}{6} \approx 0,5236. \quad (3.2)$$

У цю величину не входить число шарів k , що показує сталість концентрації кубічної упаковки незалежно від об'єму, що займається. Вона є єдиною природною упаковкою, на яку у прямокутній системі координат не здійснюють впливу стінки і яка дає мінімальну концентрацію.

При *октаедричній упаковці*

$$\zeta = \frac{\pi k}{3\sqrt{2}(\sqrt{2}-1+k)}. \quad (3.3)$$

При $k \rightarrow \infty$ $\zeta = \pi/(3\sqrt{2}) \approx 0,7405$, що відповідає максимально щільній упаковці.

У випадку *тетраедричній упаковці*

$$\zeta = \frac{\pi k}{3\sqrt{2}\left(\sqrt{\frac{3}{2}}-1+k\right)}. \quad (3.4)$$

При $k \rightarrow \infty$ $\zeta = \pi/(3\sqrt{2}) \approx 0,7405$.

При *ромбоедричній упаковці*

$$\zeta = \frac{\pi k}{3\sqrt{3}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}-1+k\right)}. \quad (3.5)$$

При $k \rightarrow \infty$ $\zeta = \pi/(3\sqrt{3}) \approx 0,6046$.

Результати розрахунку за виразами (3.3-3.6) наведено на рис. 3.7.

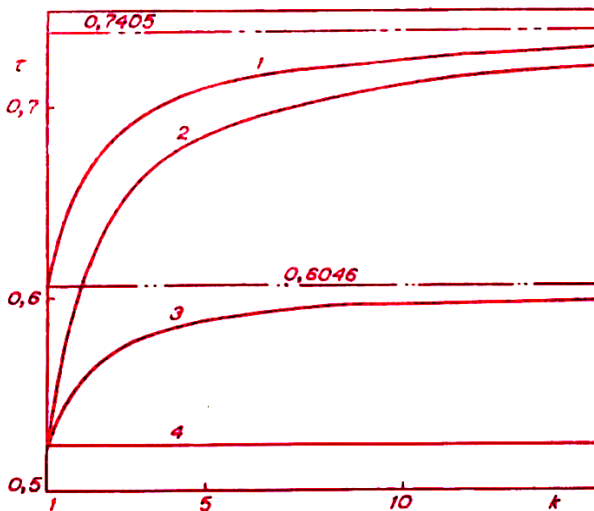


Рис. 3.7. Залежності концентрації твердої фази від кількості шарів куль ($\tau=\zeta$)

Графічні залежності концентрації засвідчують, що на всі укладки, тетраедричну (крива 3.7.1), октаедричну (крива 3.7.2) та ромбоедричну (крива 3.7.3), окрім кубічної (крива 3.7.4), стінки здійснюють суттєвий вплив.

Тетраедрична упаковка є найбільш сприятливою для досягнення максимальної концентрації твердої фази. Вона ж є і найбільш технологічною, оскільки інші упаковки є доволі нестійкими у процесі укладання куль.

Реальні зернисті шари рідко бувають упорядкованими. Середня концентрація ζ випадкової упаковки куль залежить від способу утворення шару, але не дуже сильно. На рис. 3.8 наведено фотографію вільної випадкової укладки куль. На рис. 3.9 – та сама укладка, але після утруски. Як видно, у другому випадку структура укладки є більш упорядкованою. Тут, поряд із дефектами у вигляді вакансій та дислокацій, є великі домени із цілком упорядкованою більш щільною укладкою. Тим не менш, незважаючи на відмінність структур, концентрація ζ у першому випадку є лише на 5 % нижчою, ніж у другому.

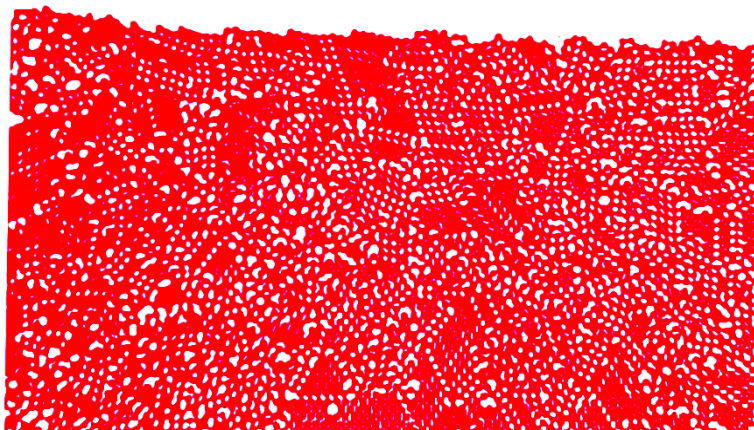


Рис. 3.8. Вільна випадкова упаковка куль

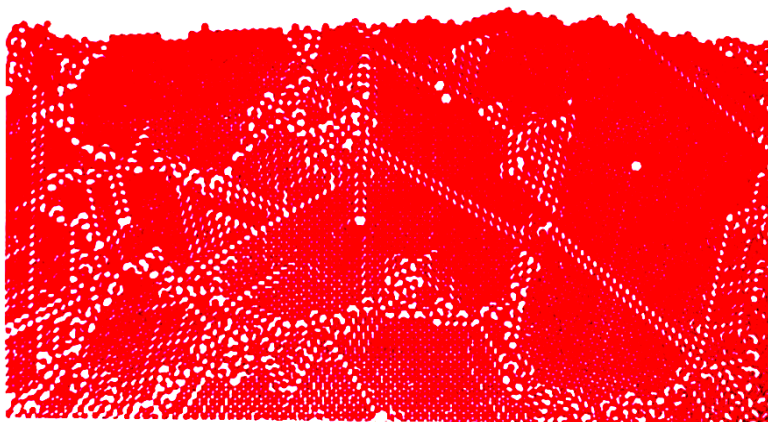


Рис. 3.9. Випадкова упаковка куль після утруски

Звичайно, якщо не вживати спеціальних засобів, випадкова упаковка однакових куль характеризується середньою концентрацією, що є близькою до $\zeta \approx 0,6$ та $\varepsilon = 0,4$ (стандартний випадок).

Поблизу твердої стінки випадкові укладки характеризуються підвищеним значенням порожноти. На самій стінці $\varepsilon = 1$. Зі зростанням координати x , що відраховується від

стілки, на відстані $d/2$ величина ε досягає локального мінімуму, а потім, осцилюючи, прямує до значення ε_∞ (у стандартному випадку $\varepsilon_\infty=0,4$) (рис. 3.10).

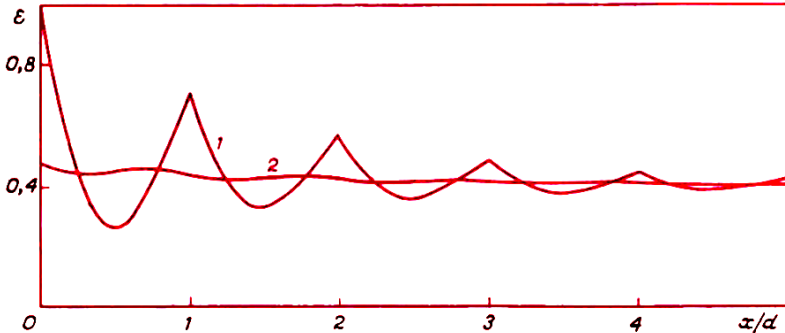


Рис. 3.10. Розподіл порожноти у пристінній зоні: 1 – для упорядкованої кубичної упаковки, 2 – для неупорядкованої усередненої упаковки

Для випадкової упаковки полідисперсного кульового молярного завантаження барабанних млинів вважається, що $\zeta \approx 0,6$ та $\varepsilon \approx 0,4$ (стандартний випадок). У разі цильпесного завантаження (елементи мають циліндричну форму) – $\zeta \approx 0,65$ та $\varepsilon \approx 0,35$ [4,5].

3.5.4. Зміна об'єму матеріалу

У процесі деформування, під час руху або переробки, зернисті матеріали можуть змінювати об'єм. Зміна об'єму матеріалу чисельно характеризується дилатансією, порожністю та коефіцієнтом ущільнення.

Дилатансією є явище зміни об'єму зернистого матеріалу при зсувній деформації. Така зміна полягає у збільшенні об'єму (додатна дилатансія). Зсувна деформація зернистих матеріалів є можливою за умови переміщення частинок у напрямку, що є нормальним до напрямку зсуву, тобто за умови збільшення об'єму. Збільшення порожнистого простору зернистих середовищ здійснюється шляхом разуцільнення, розпушування та розпорошення.

Дилатансія є характерною лише для зернистих матеріалів,

оскільки в пружних середовищах, а також у рідинах та газах вона не виникає.

Явище дилатансії було відкрито у 1885 році О. Рейнольдсом.

Чисельно визначити величину дилатансії ν поточного стану зернистого матеріалу можна визначити за виразом

$$\nu = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon},$$

де ε – порожність зернистого матеріалу у поточному стані, ε_0 – порожність матеріалу у початковому стані, що відповідає вільному спокою.

У випадку, коли порція зернистого матеріалу заповнює замкнену камеру, вираз для дилатансії набуває вигляду

$$\nu = \frac{V}{V_{\kappa} \kappa},$$

де V – об'єм матеріалу у поточному стані, V_{κ} – об'єм камери, κ – ступінь заповнення камери матеріалом у початковому стані, що відповідає вільному спокою.

Під час руху зернистого матеріалу зі значним розпорошенням дилатансія може досягати великих значень – декількох одиниць.

Порожністю зернистого матеріалу ε є об'ємна частка порожнин між частинками у всьому об'ємі матеріалу

$$\varepsilon = \frac{V_n}{V},$$

де V_n – об'єм порожнин між частинками, V – об'єм всього зернистого матеріалу.

Величину порожності для монодисперсних зернистих матеріалів із частинками кульової форми можна визначити із урахуванням їх взаємного положення

$$\varepsilon = 1 - \zeta \left(\frac{1}{1 + \frac{a}{d}} \right)^3,$$

де d – середній діаметр частинки, a – середня відстань між частинками (або середня довжина вільного пробігу частинок), ζ – максимальне значення об’ємної концентрації твердої фази зернистого матеріалу при $a=0$. Максимальна об’ємна концентрація, як було показано раніше для різних упаковок кульових частинок, набуває значення $\zeta=0,52-0,74$.

Величини порожності залежить від способу укладання частинок, їх форми, розміру, дії зовнішніх факторів та режиму руху. Наприклад, при дії вібрації або при розпорошенні ε може змінюватись для одного зернистого матеріалу, зменшуючись або збільшуючись, у декілька разів.

Значення ε пов’язано із густиною матеріалу

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho}{\rho_m},$$

де ρ – густина матеріалу у поточному стані, ρ_m – густина твердої частини матеріалу ρ_m .

Для теоретичної оцінки порожності зернистого матеріалу використовується, розглянута вище, глобулярная модель порожнистого середовища, що складається із ідеалізованих сферичних монодисперсних частинок. При цьому розглядається щільна кульова упаковка, мінімальна порожність якої, як було показано, теоретично досягає значення 0,26.

Зменшити порожність дозволяє використання багатодисперсних системи кульових частинок.

Використання бінарних систем, за рахунок введення другої фракції сферичних монодисперсних частинок меншого діаметра у порожнини каркасу крупних частинок, теоретично дозволяє знизити порожність до 0,14. При цьому така щільна укладка частинок у бінарній системі може бути отримана коли діаметр малих сфер становить $d_m \leq (2/\sqrt{3} - 1)d_e \approx 0,154d_e$, де d_e – діаметр великих сфер.

Для глобулярної системи із трьох фракційних компонентів із співвідношенням діаметрів сферичних частинок 77:7:1 система має теоретично мінімальну порожність упаковки 0,065.

Для систем із чотирьох фракційних компонентів сферичних частинок теоретична мінімальна порожність укладки

становить 0,029.

Отримання високої щільності упаковки, нижче 0,14, практично є вкрай утруднено оскільки розміри частинок кожної фракції повинні відрізнятись між собою приблизно на порядок.

Зміна об'єму зернистого матеріалу під дією стискаючого навантаження, як ступінь ущільнення, характеризується *ущільнюваністю*, що відповідає відношенню різниці густини ущільненого та неущільненого матеріалу до густини ущільненого матеріалу

$$U = \frac{\rho_y - \rho_n}{\rho_y},$$

де ρ_y – густина матеріалу після ущільнення, ρ_n – насипна густина матеріалу.

Ущільнення здійснюється струшуванням або вібруванням до досягнення зернистим матеріалом сталого об'єму.

Ущільнюваність зростає зі зменшенням розміру частинок та збільшенням зв'язності зернистого матеріалу. Значення ущільнюваності U для різних матеріалів змінюється у діапазоні від 0,05 до 0,4...0,6.

Ущільнюваність зернистого матеріалу безпосередньо пов'язана із його текучістю. Зі збільшенням ущільнюваності текучість знижується.

3.6. Густина зернистих матеріалів

Зернистий матеріал може характеризуватись власне густиною та густиною твердої частини.

Густина зернистого матеріалу ρ є відношенням маси матеріалу до його об'єму

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_m + m_p}{V_m + V_n},$$

де $m = m_m + m_p$ – маса матеріалу, m_m – маса твердих частинок, m_p – маса рідини у порах зернистого матеріалу (маса повітря або газу через незначність не враховується), $V = V_m + V_n$ – об'єм матеріалу, V_m – об'єм твердих частинок, V_n – об'єм порожнин між частинками.

Густина зернистого матеріалу у стані вільного спокою називається *насіпною* або *гравіметричною густиною* (ρ_n).

Між ρ та густиною твердої частини зернистого матеріалу ρ_m є взаємозв'язок

$$\rho = \rho_m(1 - \varepsilon).$$

Насіпна густина є інтегральним показником структурно-механічного стану зернистого матеріалу і широко застосовується у технологічних цілях.

Разом з тим, насіпна густина не є абсолютною характеристикою. Її значення залежить від гранулометричного складу, форми частинок, стану їх поверхні, схильності частинок до агломерації, способу засипки у ємність та упаковки частинок. Крім того, насіпна густина зернистого матеріалу залежить і від товщини шару. Ця характеристика враховується у технологічних цілях при зберіганні, транспортуванні та дозуванні зернистих матеріалів, а також у процесі подальшої переробки.

Насіпна густина звичайно зменшується із подрібненням частинок зернистого матеріалу. Тому завжди необхідно зазначати за яких значень середнього розміру частинок її було отримано.

За величиною насіпної густини зернисті матеріали поділяються на такі різновиди:

- < 600 кг/м³ – легкі;
- 600...1100 кг/м³ – середні;
- 1100...2000 кг/м³ – важкі;
- >2000 кг/м³ – дуже важкі.

Метод визначення насіпної густини полягає у визначенні маси зернистого матеріалу у відомому об'ємі. Використовується мірний циліндр, переважно, діаметром D та висотою $H=1,5...2 D$. Верхню частину циліндра (висотою $0,2...0,4 H$) з'єднано із нижньою частиною за допомогою повороту відносно вертикальної осі, що проходить через точку, яка лежить на серединній поверхні обичайки циліндра. Розміри циліндра визначаються дисперсністю матеріалу. Зі збільшенням крупності частинок матеріалу збільшуються габарити мірного циліндра.

Для визначення насіпної густини матеріал насипається у мірну посудину. Верхня частин повертається на кут, близький до

180 градусів. Після повороту відкрита поверхня матеріалу являє собою площину, що проходить по верхній границі нижньої (робочої) частини мірної посудини. Посудина із матеріалом зважується.

Насипна густина матеріалу визначається за допомогою приладу (рис. 3.11), що складається зі стакана 1, у верхній частині якого закріплено за допомогою штиря 2 нерухому царгу 3. Досліджуваний матеріал завантажується у прилад до верхнього рівня царги, після чого вона повертається у положення *a*, і матеріал, що знаходиться у ній, скидається на піддон 4. Нижня кромка царги вирівнює рівень зернистого матеріалу в стакані 1. Після зняття царги зі штиря 2 стакан зважують. Насипна густина досліджуваного матеріалу обчислюється за виразом

$$\rho_n = \frac{m_m - m}{V},$$

де m_m – маса стакана із матеріалом, m – маса стакана без матеріалу, V – внутрішній об'єм стакана.

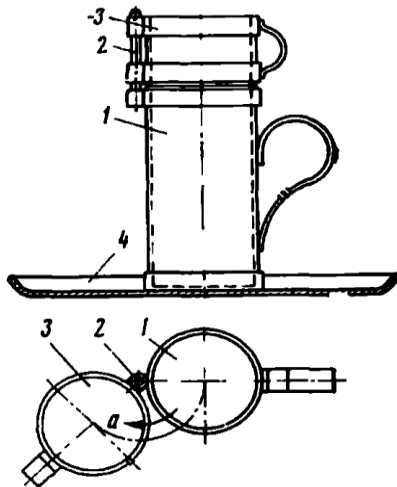


Рис. 3.11. Прилад для визначення насипної густини зернистих матеріалів: 1 – стакан, 2 – штир, 3 – царга, 4 – піддон

Величина ρ_n залежить від способу заповнення стакана матеріалом. Тому рекомендується заповнювати мірну посудину шляхом вільної течії досліджуваного матеріалу із воронки. У

зв'язку з цим для визначення насипної густини зернистих матеріалів можна застосувати більш точні методи: із використанням воронки та за допомогою волюмометра Скотта.

Сутність методу із використанням воронки пролягає у вимірюванні маси певної кількості матеріалу, який у вільно насипаному стані повністю заповнює ємність (стакан) відомого об'єму (рис. 3.12). Вільний насипаний стан одержується при заповненні ємності за допомогою воронки, що розташована над нею на певній відстані. Відношення маси до об'єму є насипною густиною.

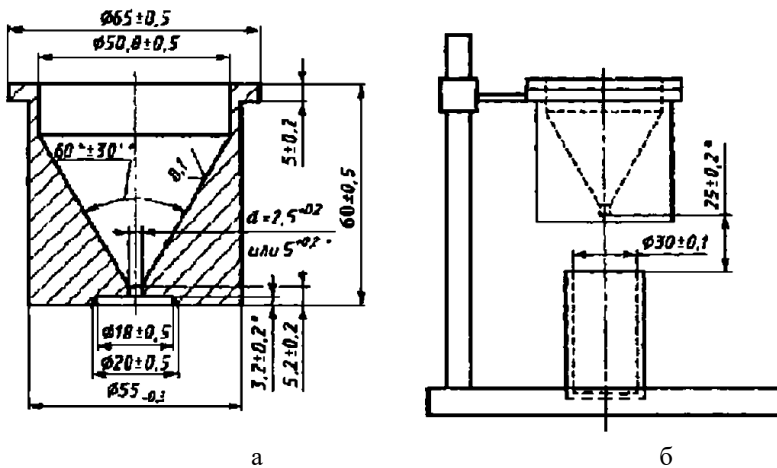


Рис. 3.12. Схема пристрою для визначення насипної густини зернистого матеріалу із використанням воронки:
а – воронка, б – пристрій у складеному стані

Процес визначення густини такий. Воронка, із закритим отвором, заповнюється матеріалом. Після заповнення воронки, відкривається вихідний отвір та пропускається матеріал через отвір до повного заповнення ємності та початку пересипання із неї матеріалу. Одноразовим рухом за допомогою рейки вирівнюється в ємності поверхня матеріалу, не здійснюючи на нього тиск. Маса матеріалу в ємності зважується. Для зернистих матеріалів із відмінним розміром частинок застосовуються

воронки із різними діаметрами отворів.

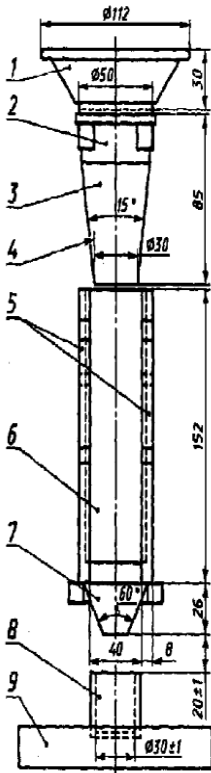


Рис. 3.13. Схема волюмометра

Скотта (вигляд спереду):

- 1 – великий конус воронки,
- 2 – циліндрична частина воронки,
- 3 – малий конус воронки,
- 4 – внутрішній діаметр,
- 5 – бічні сторони коробки,
- 6 – передній та задній боки коробки,
- 7 – нижня воронка,
- 8 – смінь, 9 – основа приладу

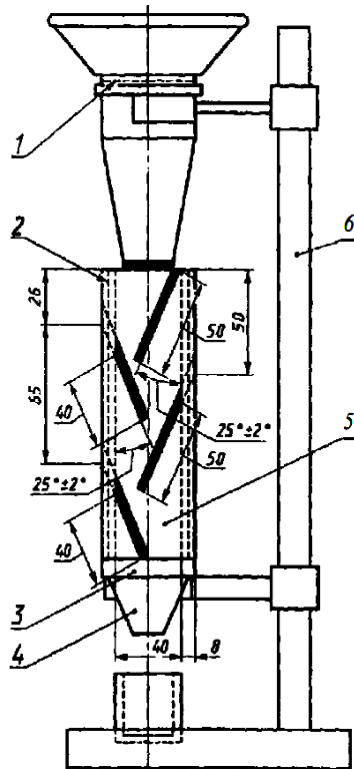


Рис. 3.14. Схема волюмометра

Скотта (вигляд збоку):

- 1 – сито, 2 – бік коробки зі скла,
- 3 – деталь нижнього з'єднання,
- 4 – нижня квадратна воронка,
- 5 – бік коробки із деревини,
- 6 – стояк

Схему волюмометра Скотта наведено на рис. 3.13 та 3.14. Коробка квадратного перерізу має чотири скляні похилі

пластини, які розміщено на протилежних (бічних) її боках. Пластини встановлено у такий спосіб, щоб матеріал послідовно падав на кожну з них, внаслідок чого падіння матеріалу переривається, а швидкість його потоку зменшується. Послідовність визначення насипної густини є такою ж, як і у методі із використанням воронки.

Густина твердої частини зернистого матеріалу (піднометрична густина) ρ_m визначається співвідношенням маси твердих m_m частинок до їх об'єму V_m

$$\rho_m = \frac{m_m}{V_m}.$$

Для однокомпонентних складів ρ_m співпадає із густиною речовини твердої фази. Для сумішевих композицій ρ_m можна обчислити використовуючи правило адитивності

$$\rho_m = a_1\rho_1 + a_2\rho_2 + \dots + a_n\rho_n,$$

де a_1, a_2, \dots, a_n – масові частки кожного твердого компонента у суміші; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ – густина відповідного твердого компонента.

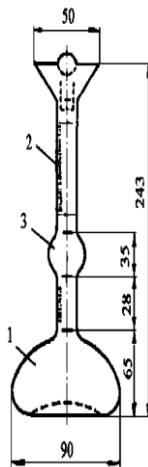


Рис. 3.15. Схема пікнометра Ле-Шательє-Кондо:
1 – колбочка, 2 – шийка, 3 – балончик

Для визначення густини твердої частини зернистого матеріалу використовуються різні модифікації пікнометра Ле-Шательє-Кондо (рис. 3.15). Пікнометр має колбочку 1 та значно

видовжену шийку 2. На певній відстані від колбочки шийку пікнометра розширено у балончик 3. Закінчується шийка згори воронкоподібним розширенням. На шийці пікнометра є об'ємна шкала, нульова поділлка якої знаходиться між колбочкою та балончиком – показник об'єму пікнометра при 20°C.

Пікнометричний метод визначення густини твердої частини зернистого матеріалу базується на визначенні об'єму рідини, що витіснена матеріалом, маса якого є попередньо виміряною. Частка від ділення маси матеріалу на витиснений ним об'єм дорівнює шуканій густині матеріалу.

Пікнометрична густина ρ_m визначається у такий спосіб. У скляний мірний циліндр насипається порція досліджуваного матеріалу масою m , потім наливається рідина, у якій частинки матеріалу не розчиняються. Об'єм цієї рідини V_p повинен бути таким, щоб рівень суспензії, що утворюється в циліндрі, був вищим за початковий рівень сухого зернистого матеріалу. За величиною об'єму суспензії V_c , а також величинами m та V_p густина матеріалу частинок обчислюється за виразом

$$\rho_m = \frac{m}{V_c - V_p}.$$

3.7. Взаємодії між твердими частинками

Між частинками зернистого матеріалу виникають сили взаємодії різної природи. Кожна частинка перебуває під дією системи зовнішніх та внутрішніх сил та енергетичних полів, що ними збуджуються. Внутрішні поля збуджуються міжчастинними силами, джерелами яких є самі структурні елементи матеріалу – окремі частинки, що формують масив середовища. Зовнішні поля виникають за рахунок дії прикладеного до матеріалу навантаження (тиску) та гравітаційних сил.

Прояв взаємодії частинок зернистих матеріалів залежить від їх складу, властивостей структури, а також визначаються перебудовою та зміною структури у процесі руху та ущільнення при дії робочих органів технологічного обладнання.

Поведінка зернистого матеріалу під дією внутрішніх сил

визначається його зв'язними властивостями, а під дією зовнішніх сил – фрикційними властивостями.

Зв'язні властивості зернистих матеріалів перешкоджають переміщенню частинок у дотичному, а фрикційні властивості – у нормальному до поверхні контакту напрямку.

3.7.1. Зв'язні властивості зернистих матеріалів

Сили *зв'язної взаємодії* на поверхні контакту двох однорідних тіл вважаються аутогезійними, а сили взаємодії при контакті різнорідних тіл – адгезійними.

Із аутогезійною та адгезійною взаємодією частинок пов'язані такі споріднені їм явища, як когезія, агломерація, агрегація та злежуваність.

Когезією є зв'язок між молекулами, що призводить до утворення єдиного твердого тіла (вникає у місті контакту тіл, що взаємодіють). Когезією є взаємодія між молекулами у об'ємі одного тіла. Когезійна взаємодія реалізується при створенні значних зовнішніх зусиль притискання частинок, що спричинюють прорив поверхневих плівок (аутогезійних або окисних) та виникнення їх свіжоутворених контактних поверхонь із високою міжмолекулярною взаємодією, яка може бути порівняною із міцністю матеріалу частинок. Когезія характеризує властивості самого матеріалу, на відміну від інших видів зв'язної взаємодії, що є поверхневими явищами.

Агломерацією є процес укрупнення частинок внаслідок спікання. *Агрегацією* є самовільне укрупнення дрібних частинок.

3.7.1.1. Аутогезія зернистих матеріалів

Аутогезією є зв'язок між частинками, що дотикаються [6]. Аутогезійний зв'язок, або злипання, перешкоджає роз'єднанню частинок зернистого матеріалу. Для порушення цього зв'язку необхідна зовнішня дія.

Аутогезія проявляється при взаємодії як двох окремих частинок, так і множини частинок у масі зернистого матеріалу. Проте, найбільший прикладний інтерес становить аутогезійна взаємодія, що реалізується не між окремими ізольованими частинками, а саме між множиною частинок, що складають матеріал.

Як основний показник, що характеризує аутогезію

зернистих матеріалів, може бути прийнято міцність на розрив. Розривна міцність визначається лише аутогезією матеріалу за умови, коли переріз розриву розташовано нормально до напрямку дії ущільнюючого навантаження. Така умова реалізується при вимірюванні міцності зернистого матеріалу на розрив за допомогою приладу, що містить циліндр, який розрізано упоперек осі, і у який завантажено досліджуваний матеріал (рис. 3.16). У циліндр, що складається з нерухомої 1 та рухомої 2 частини завантажуються матеріал 3, що може зазнавати ущільнення. Під дією зовнішньої сили T , направленої вертикально угору, відбувається розривання матеріалу по перерізу А-А. Знаючи значення сили та переріз циліндра, можна визначити міцність зернистого матеріалу у розрахунку на одиницю поверхні розриву із точністю до 10 Па.

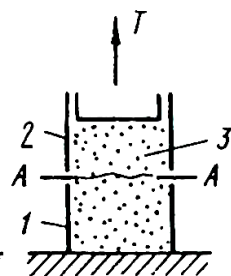


Рис. 3.16. Схема приладу для вимірювання міцності зернистого матеріалу на розрив: 1 – нерухома частина циліндра, 2 – рухома частина циліндра, 3 – досліджуваний зернистий матеріал

За величиною міцності на розрив зернисті матеріали можна класифікувати на такі групи:

<60 Па – ті, що *не злипаються*;

60...300 Па – ті, що *слабо злипаються*;

300...600 Па – ті, що *середньо злипаються* (сухий цемент);

>600 Па – ті, що *сильно злипаються* (зволожений цемент, гіпс, глина, мергель).

Ефект аутогезії проявляється у всіх процесах переробки зернистих матеріалів. Негативний вплив аутогезія здійснює перш

за все на подрібнення, сепарування, дозування, змішування, сушіння, вібро- і пневмотранспортування та зберігання. Позитивний вплив – на компактування, гранулювання, агломерування, пресування, спікання та пиловловлювання.

У загальному випадку можуть у тій або іншій мірі проявлятися такі види фізичних та хімічних зв'язків між частинками: сили хімічної природи, молекулярні сили, іонно-електричні сили, капілярні, електростатичні (кулонівські) сили, магнітні та сили механічного зчеплення.

Прояв зазначених сил може викликати такі механізми зв'язування між частинками зернистих матеріалів.

1. Взаємодія між частинками внаслідок прояву хімічних зв'язків, молекулярних сил притягання (сили Ван-дер-Ваальса), електростатичних та магнітних сил.

2. Утворення твердих «містків» між частинками внаслідок дії таких факторів: хімічних реакцій, дифузії молекул на ділянках контакту, плавлення речовин у зонах контакту частинок, кристалізації розчинених речовин.

3. З'єднання за рахунок зв'язуючого (адгезійні та когезійні містки зв'язуючого).

4. Механічні зв'язки зчепленням між частинками.

Між- та внутрішньочастинкові *сили взаємодії між твердими частинками* поділяються на такі види: хімічної природи, молекулярні, електростатичні (кулонівські) та магнітні.

Сили зв'язку хімічної природи є внутрішньомолекулярними. Вони виникають усередині частинок та між кристалами у полікристалічних агрегатах. Ці сили породжуються внаслідок електричної взаємодії між атомами і можуть бути іонними або ковалентними. Такі сили є близькодійними, а міцність зв'язків є близькою до міцності кристалічних зерен.

Молекулярні, електричні та магнітні сили зв'язку є міжмолекулярними (міжчастинковими). Міцність зв'язків між окремими частинками є значно меншою за внутрішньомолекулярні зв'язки.

Молекулярні сили взаємодії, що виникають між двома частинками, можуть бути значними, коли поверхні частинок є

досить близькими між собою (рис. 3.17).

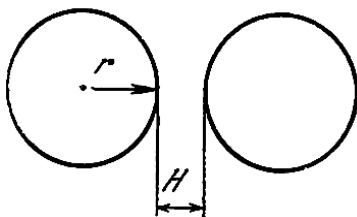


Рис. 3.17. Схема міжмолекулярної взаємодії двох частинок сферичної форми

Однак такі сили швидко спадають зі збільшенням відстані між контактними ділянками. Вираз для сили міжмолекулярної взаємодії F має вигляд

$$F = \frac{Ar}{12H^2},$$

де r – радіус частинки, H – відстань між частинками, A – константа міжмолекулярної взаємодії.



Рис. 3.18. Схема контакту частинок з шорсткими поверхнями із зазором H_3 між контактуючими поверхнями:

1 – до дії зовнішньої сили, 2 – після дії зовнішньої сили

Необхідна умова розвитку таких зв'язків полягає у зменшенні зазору H_3 та щільному зближенні поверхонь, що вступають у контакт, під дією зовнішніх сил (рис. 3.18). Тому у добре сипких матеріалах такі зв'язки взагалі відсутні, і міцність таких матеріалів визначається головним чином силами механічного зчеплення.

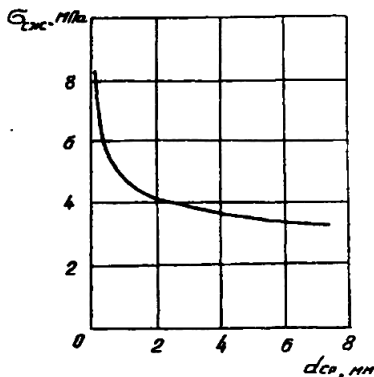


Рис. 3.19. Графік залежності міцності пресованих виробів σ від середнього діаметра частинок d_{cp}

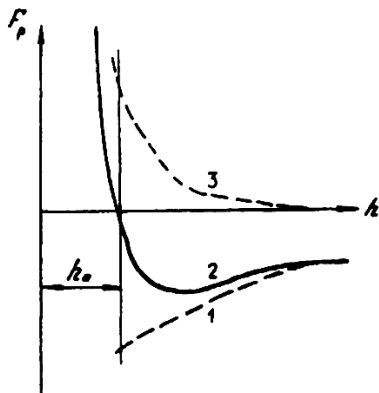


Рис. 3.20. Графік залежності сил взаємодії між частинками від відстані між ними: 1 – сила притягання, 2 – результуюча сила, 3 – сила відштовхування

Оскільки нерівності на поверхні дуже малих частинок є значно меншими за абсолютною величиною, за нерівності на поверхнях більш крупних частинок, схильність до агломерації більш дрібних частинок є набагато вищою як через їх здатність до більш щільного зближення, так і внаслідок їх відносно високої питомої площі поверхні. Тому і міцність спресованих матеріалів є тим вищою, чим є дрібнішими частинки матеріалу. Про це свідчить наведені на рис. 3.19 дані вимірювання міцності при стисканні пресованих виробів у залежності від середнього діаметра частинок.

Графічну залежність сил взаємодії між частинками від відстані між ними зображено на рис. 3.20. По осі абсцис відкладено відстань між частинками h , а по осі ординат – сили взаємодії між ними F_p , де h_0 відповідає відстані, при якій рівнодійна сила дорівнює нулю.

Електростатичні сили виникають внаслідок накопичення на поверхні частинок електростатичних зарядів. При різнозначних заряджених частинках вони притягаються, а при однозначних заряджених відштовхуються.

Значима дія статичної електрики на зернисті матеріали із

діелектричними властивостями має місце при їх витіканні із апаратів та бункерів, а також русі у транспортних системах, особливо у пристроях пневматичного транспорту, через можливе самоспалахування та вибуху деяких з них.

Виникнення *магнітних сил* у тонкодисперсних зернистих матеріалах пов'язано із наявністю у їх складі феромагнітних речовин.

Дуже часто при зберіганні та обробці зернистих матеріалів тиском агломерування окремих частинок у монолітне пористе тіло відбувається і за рахунок утворення *твердих містків*, що виникає *між частинками*.

Такі *дифузійні тверді містки* між частинками утворюються за рахунок молекулярної дифузії речовини із однієї частинки у другу на ділянках контакту. Швидкість процесу визначається температурою, площею контакту поверхонь та тиском у місті контакту. Зі збільшенням температури, тиску та площі контакту швидкість зв'язування зростає.

Тверді містки, що утворюються за допомогою хімічних реакцій, залежать від типу матеріалу та їх хімічної активності. Підвищення температури та тиску сприяє іноді збільшенню швидкості зростання та зміни структури такого містка. Хімічні реакції гігроскопічних речовин часто активізуються у присутності вологи.

На ділянках контакту між частково оплавленими частинками (поверхнєве плавлення може відбуватись, наприклад, за рахунок тепла, що виділяється при терті) утворюються *рідкі містки*. У випадках, коли додаткове тепло не підводиться, ці містки швидко тверднуть. Такий механізм визначає агломерацію частинок матеріалу із відносно низькою температурою плавлення.

Тверді кристалічні містки можуть утворюватись шляхом кристалізації розчинених речовин. Підвищення температури може викликати розчинення речовини, яка *рекристалізується* із утворенням твердих містків між частинками при подальшому зниженні температури.

Зміцнення структури пористого тіла за рахунок твердих містків, що об'єднують окремі частинки у спільний моноліт, є

спіканням (схоплюванням).

Поняття спікання або схоплювання зернистих матеріалів включає явище утворення твердих містків внаслідок сумарної дії хімічних та фізичних факторів. Температура речовини, при якій зазначені фактори зв'язку між частинками починають проявляти себе є *температурою спікання* $T_{сп}$. Температура спікання може бути значно нижчою за температуру плавлення: $T_{пл} - T_{сп} = (0,3 - 0,9)T_{пл}$.

У з'єднаннях за рахунок зв'язуючого в залежності від характеру впливу зв'язуючого на твердий кістяк зернистого матеріалу, всі зв'язуючі речовини поділяються на в'язучі, плівкоутворюючі та хімічні.

При використанні *в'язучих речовин* (смоли, мастики та інш.) міцність зв'язку, що утворюється, залежить від рівномірного нанесення шару на поверхню частинок, адгезійної взаємодії мастила із поверхнею частинок, стану поверхні та форми частинок.

Плівкоутворюючі зв'язуючі речовини застосовують звичайно у вигляді розчинів або суспензій. Ці зв'язуючі утворюють адсорбційні шари на частинках. Тонкі адсорбційні шари навколо частинок на можуть рухатись вільно. Однак вони можуть приходити у дотикання або проникати один в інший легше за чисті тверді частинки.

Ефективність застосування *хімічних зв'язуючих речовин* залежить від характеру взаємодії між компонентами зв'язуючого або між зв'язуючим та матеріалом твердих частинок. У залежності від якості вихідного матеріалу та вимог до готового продукту хімічні зв'язуючі речовини можуть бути в'язучими або плівкоутворюючого типу.

Пластинчасті частинки, а також частинки неправильної форми мають тенденцію зачіплятись або переплітатись між собою, що призводить до виникнення *механічних зв'язків між частинками*. Міцність зв'язків такого типу залежить безпосередньо від міцності самих частинок та від виду зачеплення.

Сили механічної взаємодії викликані механічним зачепленням частинок та виникненням опорних сил між

частинкам (рис. 3.21).

Механічне зачеплення проявляється у тому випадку, коли форма частинок відхиляється від сферичної (рис. 3.21а). Чим складнішою є форма частинки, тим більшою є ймовірність її механічного зачеплення.

Прояв опорних сил зумовлено силами тяжіння сусідніх частинок (рис. 3.21б). Для відокремлення частинки II від спільного шару необхідно прикласти додаткову силу, яка дорівнює силі тяжіння сусідніх частинок I та III, що здійснюють опір.

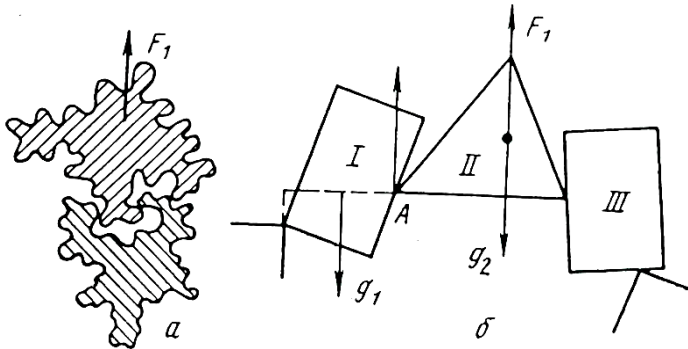


Рис. 3.21. Схеми дії сил механічної взаємодії частинок зернистого матеріалу: а – сила зачеплення, б – опорна сила

У вихідному стані вільного спокою в зернистих матеріалах між частинками головним чином діють сили механічного зачеплення, а дія зв'язків, що визначаються міжмолекулярною взаємодією, часто взагалі є відсутньою.

Прояв кожної групи із зазначених типів зв'язків може змінюватись під дією зовнішнього тиску при реалізації технологічного процесу компактування зернистого матеріалу.

3.7.1.2. Адгезія зернистих матеріалів

Адгезією є зв'язок між частинками та твердою поверхнею – стінкою камери або поверхнею робочого органу [7]. Адгезійний зв'язок, або прилипання, перешкоджає роз'єднанню частинок зернистого матеріалу та поверхні. Для порушення такого зв'язку необхідна зовнішня дія.

Адгезійний зв'язок поділяється на статичний та

кінетичний. Статичне прилипання характеризується силою опору початку відокремлення, кінетичне – взаємодією між частинками та поверхнею у процесі відокремлення. Для відокремлення частинок необхідно подолати головним чином силу статичного прилипання, оскільки сила кінетичного прилипання завжди є меншою за силу статичного прилипання.

Адгезія зернистих матеріалів вважається шкідливим явищем при реалізації подрібнення, змішування, зберігання, транспортування та інших процесів.

Адгезія зернистих матеріалів може проявлятися у вигляді взаємодії із твердою поверхнею окремих частинок, моношару та полішару частинок (рис. 3.22).

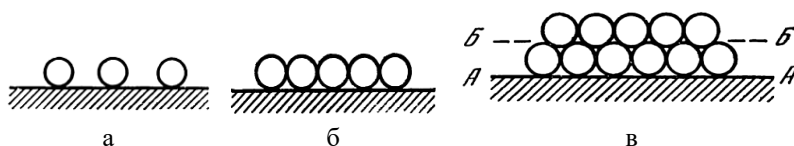


Рис. 3.22. Схеми видів адгезії зернистих матеріалів:

а – адгезія окремих частинок, б – адгезія моношару частинок,
в – адгезія полішару частинок

Адгезія окремих частинок (рис. 3.22а) виникає при невеликій кількості частинок. Частинки, що є прилиплими до поверхні, на дотикаються між собою.

Адгезія моношару частинок (рис. 3.22б) виникає при великій кількості частинок, що дотикаються між собою та утворюють на твердій поверхні один шар.

Адгезія полішару частинок (рис. 3.22в) виникає при великій кількості частинок, що дотикаються між собою та утворюють на твердій поверхні принаймні два шари. У такому випадку на поверхні А-А поділу частинки–тверда поверхні виникає адгезійна взаємодія між найближчим шаром частинок та твердою поверхнею, а на поверхні Б-Б поділу частинки–частинки – аутогезійна взаємодія між частинками.

Найбільший прикладний інтерес становить адгезійна взаємодія, що реалізується між множиною частинок, що складають зернистий матеріал, та твердою поверхнею. Наслідком

адгезії є утримання на твердій поверхні переважно малих частинок.

Сили, що визначають адгезійну взаємодію, можна умовно розділити на дві групи.

Перша група сил зумовлює взаємодію частинок із поверхнею до безпосереднього стикання тіл. Величина цих сил різко спадає зі збільшенням відстані між контактуючими поверхнями. До таких сил відносяться молекулярні та частково кулонівські.

Друга група сил виникає під час контакту частинок із поверхнею, оскільки поза контактом ці сили не могли б існувати. Це капілярні сили та сили електричної взаємодії.

Молекулярні сили адгезії зумовлені ван-дер-ваальсівськими силами взаємодії молекул частинок зернистого матеріалу та матеріалу поверхні (рис. 3.23). Вони починають проявлятися ще до безпосереднього контакту частинок із поверхнею та залежать від властивостей пари контактуючих тіл, розміру частинок, шорсткості поверхні та площі контакту.

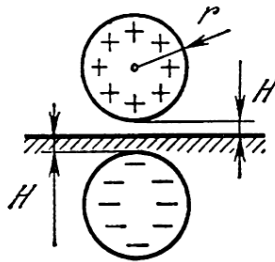


Рис. 3.23. Схема міжмолекулярної взаємодії сферичної частинки та плоскої поверхні із урахуванням заряду частинки

Вираз для сили міжмолекулярної взаємодії F має вигляд

$$F = \frac{Ar}{6H^2},$$

де r – радіус частинки, H – відстань між тілами, A – константа міжмолекулярної взаємодії.

Молекулярні сили адгезії можна зменшити шляхом кращої обробки твердої поверхні (шліфуванням та поліруванням) та, за

технологічної можливості, зменшенням розміру частинок зернистого матеріалу.

Для відносно дрібних частинок неправильної форми реалізується пряма пропорційна залежність між силою адгезії та розміром частинки. Зі зростанням цього розміру збільшується число контактів на шорсткій поверхні та сили адгезії (рис. 3.24). Відносно крупні частинки спираються на виступи шорсткої поверхні. Зростання розмірів частинок спричинює збільшення числа та площі контактів. Сила адгезії частинок неправильної форми при взаємодії із шорсткою поверхнею перевищує таку силу при взаємодії із гладкою поверхнею внаслідок більшого числа та площі контакту.

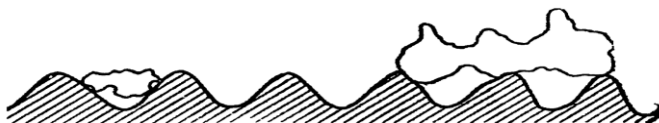


Рис. 3.24. Схема адгезії частинок неправильної форми на шорсткій поверхні

Капілярні сили адгезії виникають при конденсації пари води із вологого повітря, що знаходиться у порах зернистого матеріалу, та за наявності плівкової вологості матеріалу. У таких випадках між частинками та поверхнею виникає меніск, який силами поверхневого натягу притискає частинки до стінки.

Капілярні сили адгезії можна зменшити гідрофобізацією поверхні, шляхом перетворення її поверхні у ту, що не змочується, по відношенню до рідини, що присутня у зернистому матеріалі.

Електричні сили адгезії проявляються лише при контакті частинок із поверхнею. При реалізації технологічного процесу частинки зернистого матеріалу труться одна об одну, об робочі органи та стінки обладнання, набуваючи електричного заряду. При контакті таких частинок із твердою поверхнею наведені на їх поверхні заряди притягують рівні за величиною та зворотні за знаком заряди, що розташовано на твердій поверхні. Це спричинює виникнення на межі контактуючих тіл контактної

різниці потенціалів, під дією якої вони притягуються один до одного. Зі збільшенням контактної різниці потенціалів збільшуються електричні сили адгезії.

Кулонівські сили адгезії виникають при наближенні заряджених частинок до твердої поверхні. У цей момент на протилежному боці твердої поверхні наводяться заряди, що є рівними за величиною заряду частинки але протилежними за знаком. При цьому виникають так звані сили дзеркального відображення (кулонівські сили). Кулонівські сили проявляються лише при утворенні певного зазору між частинками та поверхнею. При дотиканні частинка до поверхні виникає витікання заряду, що спричинює зниження кулонівських сил. Зі збільшенням провідності стінки зменшуються за величиною залишкові кулонівські сили, а отже, і сили адгезії.

Для відокремлення частинки від поверхні, потрібно прикласти до частинки відповідну силу $F_{від}$. Якщо силу відокремлення $F_{від}$ направлено перпендикулярно до поверхні, то вона витрачається лише на подолання сил адгезії, що називаються силами статичного прилипання. Отже, сили адгезії можна оцінити за силою $F_{від}$, що відокремлює.

Для створення сили відокремлення використовуються такі способи: шляхом нахилу твердої поверхні до горизонталі, відцентровий та вібраційний способи.

При першому способі величина сили відокремлення $F_{від}$ визначається за кутом нахилу поверхні до горизонталі, при якому частинка починає рухатись

$$F_{від} = V(\rho_c + \rho_s)g \sin\alpha,$$

де V – об'єм частинки, що відокремлюється; ρ_s – густина частинки; ρ_c – густина оточуючого середовища (газу або рідини); g – прискорення сили тяжіння; α – кут нахилу частинки до горизонталі.

При відцентровому способі поверхня разом із частинками приводиться в обертання, при цьому вираз для вектора сили відокремлення $\vec{F}_{від}$ має вигляд

$$\vec{F}_{від} = V(\rho_s + \rho_c)(\vec{j} + \vec{g}),$$

де \vec{j} – вектор відцентрового прискорення; \vec{g} – вектор прискорення сили тяжіння.

При відцентровому способі поверхні надається вібраційна дія, застосовуючи низко- та височастотні коливання, при цьому вираз для вектора сили відокремлення $\vec{F}_{ei\partial}$ має вигляд

$$\vec{F}_{ei\partial} = V(\rho_q + \rho_c)(\vec{a} + \vec{g}),$$

де \vec{a} – вектор прискорення коливального руху.

3.7.1.3. Злежування зернистих матеріалів

Злежуваністю є властивість зернистих матеріалів втрачати свою текучість при тривалому зберіганні.

Причиною злежуваності зернистих матеріалів є збільшення щільності упаковки частинок або підвищення вологості, що спричинює виникнення кристалічних містків між частинками або капілярних сил.

Основний вплив на злежуваність здійснює тиск, зокрема від дії стовпа самого зернистого матеріалу. Крім того, суттєвий вплив здійснює вібрація, що виникає при транспортуванні матеріалу.

Злежуваність супроводжується ущільненням матеріалів внаслідок перерозподілу частинок у шарі – дрібні частинки під дією незначних вібрацій вклинюються у зазори між крупними частинками (рис. 3.25). Це спричинює збільшення числа і площі контактів та посилює міцність індивідуальних контактів, як між частинками, так і частинок із твердою поверхнею, і як наслідок, до зростання сил аутогезії та адгезії.

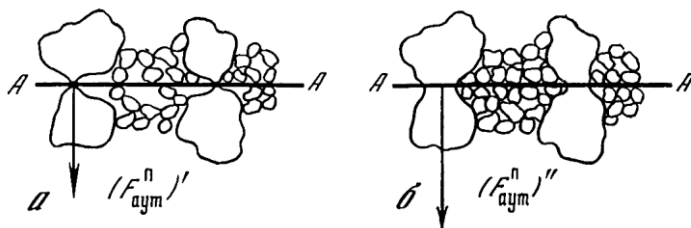


Рис. 3.25. Схема розташування частинок зернистого матеріалу:
а – до злежування, б – після злежування

Крім того, злежуваність підвищується зі збільшенням вологості повітря внаслідок підвищення капілярних сил аутогезії та адгезії. Зокрема цемент, гіпс та вапняк легко злежуються під дією вологи.

Чисельно злежуваність оцінюється за опором P руйнування на роздавлювання спресованого циліндричного брикету із проби зернистого матеріалу стовпчика матеріалу під навантаженням. За величиною P ступінь злежуваності зернистих матеріалів поділяються на такі категорії:

- $<0,1$ МПа – легка;
- $0,1 \dots 0,2$ МПа – незначна;
- $0,2 \dots 0,4$ МПа – нижче середньої;
- $0,4 \dots 0,7$ МПа – середня;
- $0,7 \dots 1,0$ МПа – значна;
- $1,0 \dots 1,5$ МПа – сильна;
- $>1,5$ МПа – дуже сильна.

Злежуваність є переважно несприятливим чинником при виконання технологічних процесів. Вона перешкоджає вільній течії зернистих матеріалів та сприяє утворенню застійних зон та пробок. Часто причиною незадовільної роботи камер обладнання для переробки таких матеріалів, зокрема бункерів, є сповільнення або припинення витікання матеріалу внаслідок утворення стійких склепінь, труб та завислостей (рис. 3.26).

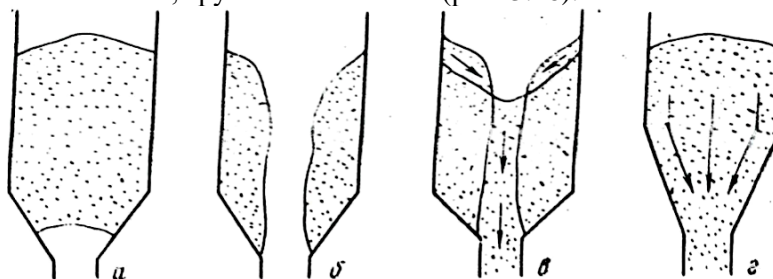


Рис. 3.26. Схеми руху в бункерах зернистих матеріалів, що набули злежуваності: а – склепоутворення, б – трубоутворення, в – несущільна течія, г – суцільна течія

Склепоутворення зернистих матеріалів пояснюється виникненням у зоні розвантажувального отвору такого напруженого стану, при якому горизонтальні напруження у шарі частинок досягають найбільшого значення. Горизонтальний тиск ущільнює матеріал та створює відповідну вертикальну складову розпору склепіння, яка стає достатньою для сприйняття маси вантажу над отвором.

Зменшуючи у будь який спосіб сили аутогезії між частинками та адгезії між частинками та твердою поверхнею, можна знизити ступінь злежуваності зернистих матеріалів. Доволі ефективним засобом підвищення ефективності течії та циркуляції матеріалу у камері є вертикальна аерація його шару за допомогою придонних форсунок, а також вібрування стінок камери. Корисно знижувати вологість матеріалу. Крім того, доцільно застосовувати раціональні конструктивні параметри камер для переробки зернистих матеріалів – форма камер, кут нахилу стінок камер, шорсткість і покриття поверхні камер та розмір випускних і пропускних отворів.

3.7.2. Фрикційні властивості зернистих матеріалів

Поведінка зернистого матеріалу у технологічних процесах визначається його здатністю чинити опір зміні об'єму, форми та порушення цілності. Характерною особливістю зернистих матеріалів є відносна рухливість частинок (текучість або сипучість) та здатність переміщуватись під дією зовнішньої сили. Текучість залежить від гранулометричного стану матеріалу, його вологості і ступеня ущільнення та проявляється по-різному (рис. 3.27).

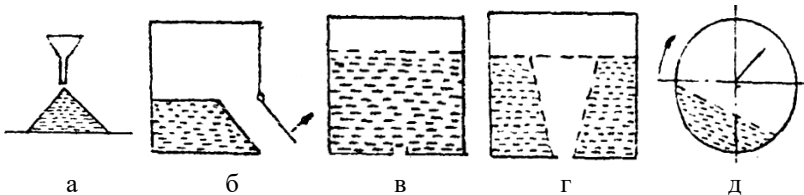


Рис. 3.27. Схеми прояву текучості зернистих матеріалів:
 а – течія через воронку, б – обрушення шару після видалення бічної стінки, в – припинення витікання із малого отвору у днищі із

утворенням склепіння, г – витікання із великого отвору у днищі із утворенням кратера, д – течія в обертовій камері

Витіканні зернистого матеріалу із воронки на горизонтальну поверхню (рис. 3.27а) утворюється конус із кутом природного укосу при основі. При видаленні підпірної бічної стінки відбувається обрушення шару матеріалу із розташуванням ділянки вільної поверхні, що утворюється, під певним кутом до горизонтальної площини (рис. 3.27б).

При відкриванні малого твору у плоскому днищі камери відбувається часткове витікання матеріалу із утворенням склепіння (рис. 3.27в). При відкриванні великого твору у плоскому днищі камери відбувається витікання матеріалу із утворенням кратера (рис. 3.27г).

При припиненні обертання навколо власної горизонтальної осі циліндричної камери, вільна поверхня зернистого завантаження утворює певний кут із горизонтальною площиною (рис. 3.27д).

Для оцінки фрикційних властивостей зернистих матеріалів, що визначають їх поведінку під дією зовнішніх сил, використовується декілька характеристик: кут природного укосу, кут обрушення, кут внутрішнього тертя, кут зовнішнього тертя, кут тертя руху, кут тертя спокою, коефіцієнт внутрішнього тертя, коефіцієнт зовнішнього тертя, коефіцієнт тертя руху, коефіцієнт тертя спокою.

3.7.2.1. Кут природного укосу та кут обрушення

Кутом природного укосу α_{np} є кут нахилу твірної конуса, що отримується при висипанні з воронки без динамічної дії певної порції зернистого матеріалу на горизонтальну поверхню, до площини онови конуса (рис. 3.28).

Кут природного укосу є відносною характеристикою, що опосередковано оцінює структурно-механічні властивості зернистих матеріалів. Опосередковані методи залишаються найпоширенішими методиками практичного оцінювання властивостей матеріалів. Поширеність такої характеристики пояснюється простотою та надійністю вимірювань, а також комплексним характером цієї величини. Кут природного укосу дає безпосередню уяву про рухливість або текучість зернистого

матеріалу у стані вільної насипки. Він використовується для порівняльної оцінки реологічних та технологічних властивостей матеріалів.



Рис. 3.28. Схема утворення кута природного укосу зернистого матеріалу

Формування поверхні укосу шляхом поступового насипання зернистого матеріалу відповідає стану динамічної рівноваги, тому такий кут $\alpha_{пр}$ ще називається *динамічним кутом природного укосу* або кутом осипання.

Подібним до кута $\alpha_{пр}$ є *кут обрушення* $\alpha_{обр}$, що характеризує положення відносно горизонтальної площини поверхні укосу, що утворюється при обрушенні та сповзанні частини шару зернистого матеріалу внаслідок видалення підпірної стінки. Такий кут ще називається *статичним кутом природного укосу*. Кут обрушення $\alpha_{обр}$ завжди є більшим за динамічний кут природного укосу $\alpha_{пр}$.

Величини кутів природного укосу та обрушення зернистого матеріалу пов'язані зі значенням кута його внутрішнього тертя. Для крупнозернистих незв'язних матеріалів кут природного укосу приблизно дорівнює *куту внутрішнього тертя руху*, а кут обрушення приблизно дорівнює *куту внутрішнього тертя спокою*. Натомість для дрібнозернистих

зв'язних матеріалів кути природного укосу та обрушення можуть бути значно меншими за кути внутрішнього тертя руху та спокою.

Діапазон зміни кута природного укосу є доволі широким: від $25-35^\circ$ для незв'язних матеріалів, до $60-70^\circ$ та більше для зв'язних.

Величина кута природного укосу залежить від фрикційної і аутогезійної взаємодії та щільності упаковки частинок. Щільність упаковки визначається висотою падіння матеріалу при висипанні. Тому при вимірюванні такого кута конус із зернистого матеріалу повинен утворюватись внаслідок висипання матеріалу з однакової висоти над опорною поверхнею.

Значення кута природного укосу впливає на конструктивні параметри напрямних та випускних пристроїв для зернистих матеріалів (бункерів, контейнерів, воронок, тічок, жолобів, лотків, силосів та ємностей транспортних засобів). Кут нахилу до горизонталі поверхонь, по яким стікає даний матеріал, повинен бути більшим за величиною за значення кута природного укосу.

Експериментально кути природного укосу α_{np} та обрушення $\alpha_{обр}$ зернистих матеріалів можуть бути визначення такими методами:

- натіканням з воронки на горизонтальну площину (рис. 3.27а) – кут α_{np} ;
- витіканням з ємності при відкриванні вікна (рис. 3.27б) – кут $\alpha_{обр}$;
- утворенням кратера при витіканні через щілину або отвір (рис. 3.27г) – кут $\alpha_{обр}$;
- обертанням завантаженого барабана із камерою без виступаючих елементів або із лопаттю (рис. 3.27д) – кути α_{np} та $\alpha_{обр}$.

Найпростіший метод визначення кута природного укосу зернистого матеріалу полягає у застосуванні воронки (рис. 3.28).

Досліджуваний зернистий матеріал випускається із воронки 1 на горизонтальну поверхню 2, внаслідок чого на поверхні утворюється конус 3 з матеріалу. Після цього вимірюється кут нахилу α твірної такого конуса до горизонталі, що і буде кутом природного укосу досліджуваного матеріалу.

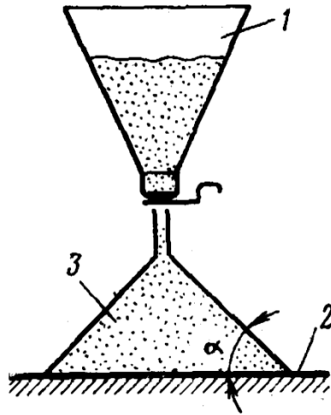


Рис. 3.28. Схема методу визначення кута природного укосу зернистого матеріалу за допомогою воронки: 1 – воронка, 2 – горизонтальна поверхня, 3 – конус із зернистого матеріалу

Для прямого визначення кута природного укосу використовується різновид методу воронки із застосуванням прямого просторового кута, що утворено трьома взаємоперпендикулярними площинами (рис. 3.29).

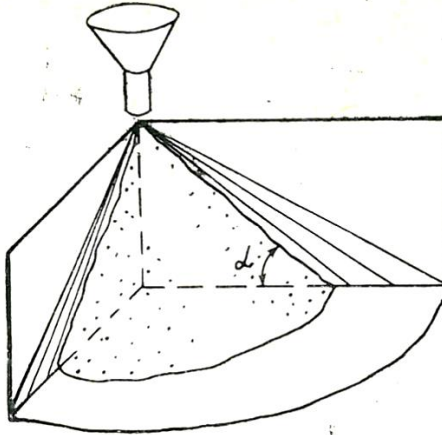


Рис. 3.29. Схема методу визначення кута природного укосу зернистого матеріалу за похилою твірною

Нижня площина, що виконано у вигляді сектора, є основою і має кільцеві риси. Бічні вертикальні площини, що виконано із прозорого матеріалу, мають променеві риси. По лінії перетину вертикальних площин встановлено воронку. При витіканні матеріалу утворюється зернисте тіло у вигляді чверті конуса. Витікання припиняється, коли вершина конуса досягає верхнього краю площин. Кут нахилу укосу α визначається за рисками на вертикальних площинах.

Практично кут природного укосу методом прямого просторового кута визначається за допомогою приладу Меринга-Баранова (рис. 3.30).

У ребрі, що утворено вертикальними стінками 4, є циліндричний канал 3, вісь якого співпадає із перетином внутрішніх площин стінок. У цей канал за допомогою воронки 2 засипається із бункера 1 досліджуваний зернистий матеріал. На бічні стінки 4 та дно 5 нанесено кутомірні шкали. В основу пристрою вмонтовано рівень 7 та штатив (на схемі не показано) для укріплення бункера. Пристрій встановлено горизонтально за рівнем обертанням регулювальних гвинтів 6. Носик воронки встановлено у продовженні каналу. Випускний отвір бункера є співвісним із носиком воронки.

Досліджуваний зернистий матеріал поміщаються у бункер. Засувка бункера відкривається так, щоб матеріал тонким струменем витікав у воронку, а з неї у кут пристрою, поки вершина конуса не досягне верхнього зрізу стінок. Величина кута природного укосу α_{np} визначається за кутомірними шкалами.

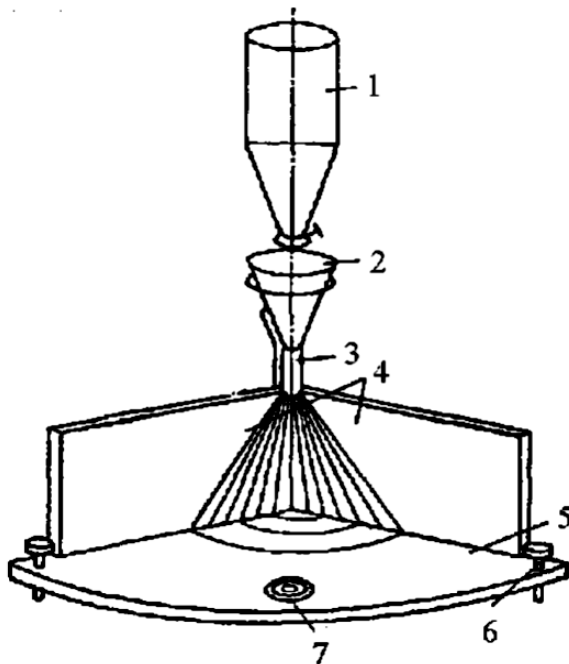


Рис. 3.30. Схема приладу Меринга-Баранова для визначення кута природного укосу зернистого матеріалу: 1 – бункер, 2 – воронка, 3 – циліндричний канал, 4 – вертикальні бічні стінки, 5 – дно, 6 – гвинт, 7 рівень

Визначити кут природного укосу зернистого матеріалу можна, також, за допомогою доволі простого методу бічної засувки (рис. 3.31).

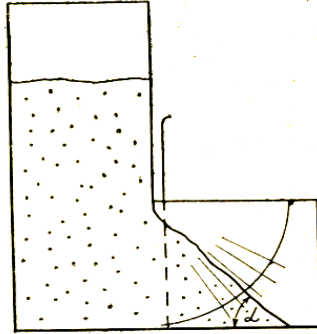


Рис. 3.31. Схема методу визначення кута природного укосу зернистого матеріалу за допомогою бічної засувки

Вертикальна ємність, що заповнюється досліджуваним зернистим матеріалом, у нижній частині бічної стінки має вікно, що закривається вертикальною засувкою. При плавному відкриванні засувки зернистий матеріал витікає із вікна і утворює укіс. Кут нахилу цього укосу α вимірюється за допомогою кутомірної шкали у вигляді променевої рисок, які нанесено на прозорі стінки, що обмежують укіс з боків.

Найпростіший метод визначення кута обрушення зернистих матеріалів полягає у використанні бічної стінки, що видаляється (рис. 3.32).

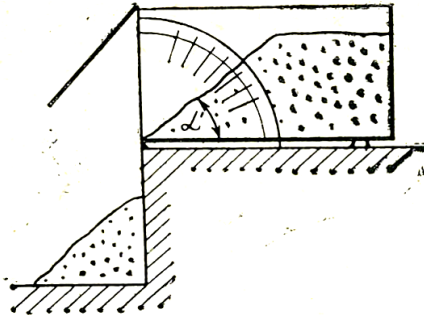


Рис. 3.32. Схема методу визначення кута обрушення зернистого матеріалу за допомогою бічної стінки

Ємність, що має дві вертикальні нерухомі прозорі бічні стінки, заповнюється досліджуваним зернистим матеріалом. Після відкидання вертикальної рухомої бічної стінки, частина матеріалу у вигляді трикутної призми обрушується та сповзає, із утворенням укосу. Кут нахилу цього укосу α вимірюється за допомогою кутомірної шкали у вигляді променевого рисок, які нанесено на нерухомі прозорі бічні стінки, що обмежують укіс з боків.

Пристрій для визначення кута обрушення методом бічної стінки (рис. 3.33) містить посудину 6 та камеру 4. Камера має форму паралелепіпеду із розташованим над нею бункером. Тічка бункера перекивається засувкою 2.

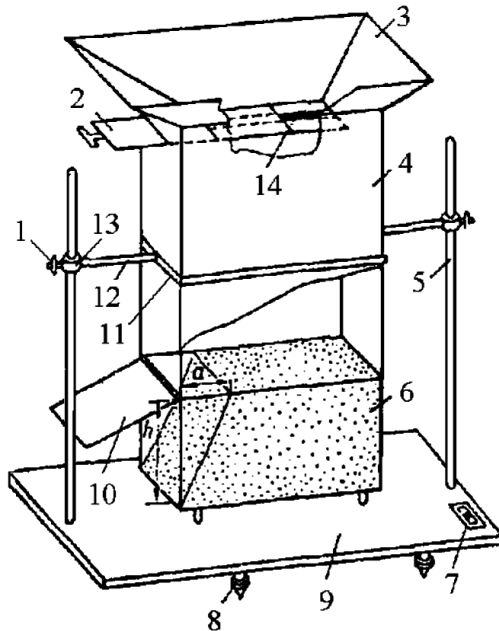


Рис. 33. Схема приладу для визначення кута обрушення зернистого матеріалу методом бічної стінки: 1 – затискний болт, 2 – засувка, 3 – бункер, 4 – камера, 5 – стояк, 6 – вимірювальна посудина, 7 – рівень, 8 – регулювальний гвинт, 9 – основа, 10 – знімна стінка, 11 – хомут, 12 – стержень, 13 – кільце, 14 – щілина

Камеру закріплено на стояках 5 за допомогою хомута 11, стержнів 12 та кілець 13. Висота розташування камери фіксується затискними болтами 1.

Обертанням регулювальних гвинтів 8 камера встановлюється горизонтально за рівнем 7, що вмонтовано в основу 9 пристрою. Вимірювальна посудина 6 встановлюється під камерою. Порція досліджуваного зернистого матеріалу, що дещо перевищує об'єм вимірювальної посудини, через щілину 14 обережно всипається у камеру. Після закінчення засипання засувка на бункері закривається і камера піднімається догори. Зайвий матеріал у вимірювальній посудині зрізується урівень із її кромками. Після цього обережно прибирається знімна стінка 10. Частина матеріалу у вигляді трикутної призми обрушується та сповзає із утворенням укусу. За виміряними значеннями верхньої кромки посудини, що звільнилась, a та висоти h визначається кут обрушення зернистого матеріалу

$$\alpha_{обр} = \arctg \frac{h}{a}.$$

Для одночасного визначення кутів обрушення та природного укусу зернистих матеріалів використовується метод кратера та конуса (рис. 3.34).

Досліджуваний матеріал засипається у короб 1, який на стояках 2 встановлено на основі 3. Горизонтальне положення основи встановлюється за допомогою регулювальних гвинтів 12 за рівнем 11. У вихідному положенні отвір у дні короба закрито пластиною 9. Після висування пластини частина матеріалу витікає із короба з утворенням двох поверхонь обрушення. Чисельні значення кутів обрушення зернистого матеріалу визначаються за кутовими шкалами 10. Після витікання із корбу потік матеріалу формується воронкою 8 та потрапляє на диск 4.

На диску 4 утворюється конус із матеріалу, а його залишки стікають на основу 3. За допомогою рухливого кільця 5 та покажчика 6 за лінійною шкалою 7 визначається висота зрізаного конуса. Кут природного укусу зернистого матеріалу розраховується за виразом

$$\alpha_{np} = \arctg\left(\frac{2h}{D_{\partial} - D_{\kappa}}\right),$$

де h – висота зрізаного конуса зернистого матеріалу, D_{∂} – діаметр диска, D_{κ} – діаметр кільця. Застосування рухливого кільця та визначення висоти зрізаного, а не повного, конуса дозволяє усунути похибки, пов'язані із викривленням поверхні укосу біля вершини конуса у вигляді округлення.

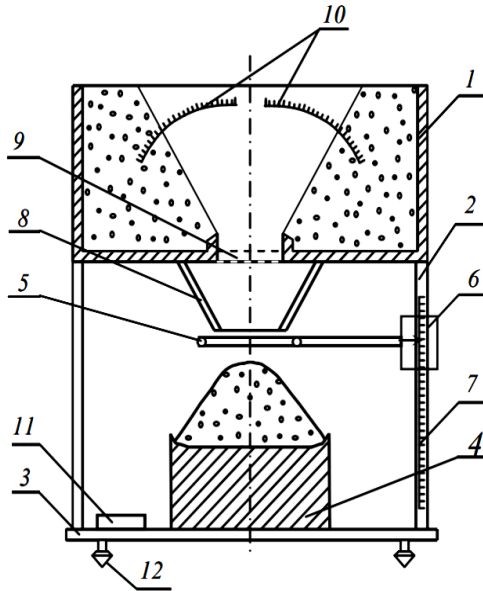


Рис. 3.34. Схема приладу для визначення кутів обрушення та природного укосу зернистого матеріалу методом кратера та конуса:
 1 – короб, 2 – стояк, 3 – основа, 4 – диск, 5 – рухливе кільце,
 6 – показчик, 7 – лінійна шкала, 8 – воронка, 9 – пластина,
 10 – кутова шкала, 11 – рівень, 12 – регулювальний гвинт

Для визначення кутів природного укосу та обрушення зернистих матеріалів використовується метод обертової камери (рис. 3.35).

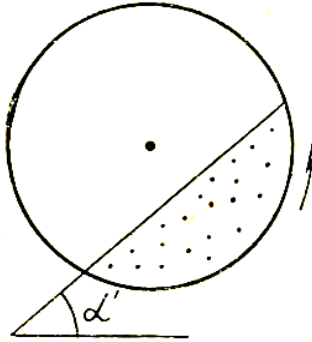


Рис. 3.35. Схема методу визначення кутів природного укосу та обрушення зернистого матеріалу методом обертової камери

Використовується барабан, що може обертатись навколо власної горизонтальної осі. Камера барабана має циліндричну форму із перпендикулярними до осі торцевими стінками. Принаймні одна торцева стінка є прозорою. Поверхня камери є гладкою, без виступаючих елементів. Камера заповнюється, не менш як на 0,25 її об'єму, досліджуваним зернистим матеріалом. Після декількох обертів барабан зупиняється для набуття вільною поверхнею матеріалу горизонтальної плоскої форми. Для визначення характерних кутів матеріалу барабан приводиться у повільне обертання.

При визначенні кута природного укосу зернистого матеріалу, барабан зупиняється у момент завершення осипання вільної поверхні матеріалу. Фіксується мінімальне значення кута нахилу вільної поверхні матеріалу до горизонталі перед його осипанням.

При визначенні кута обрушення зернистого матеріалу, барабан зупиняється у момент, що передує початку осипання вільної поверхні матеріалу. Фіксується максимальне значення кута нахилу вільної поверхні матеріалу до горизонталі до його осипання.

Для підвищення точності визначення кутів природного укосу та обрушення зернистих матеріалів використовується метод обертової камери із лопаттю (рис. 3.36) [8].

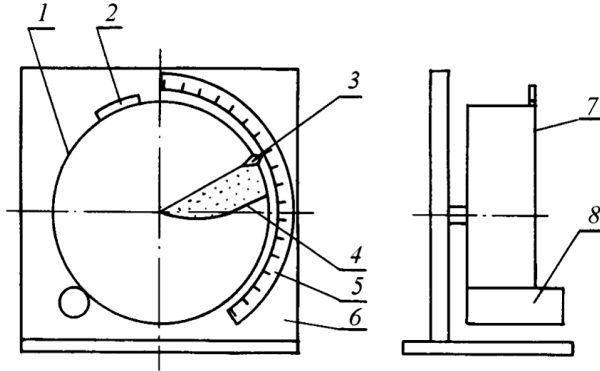


Рис. 3.36. Схема методу визначення кутів природного укосу та обрушення зернистого матеріалу методом обертової камери із лопаттю: 1 – барабан, 2 – завантажувальний люк, 3 – рухомий прапорець, 4 – лопать, 5 – кутова шкала, 6 – основа, 7 – прозора торцева стінка, 8 – привод обертання барабана

Використовується барабан 1 із завантажувальним люком 2. На прозорій торцевій стінці 7 встановлено рухомий прапорець 3, а на основі 6 – кутова шкала 5. Барабан приводиться в обертання приводом 8. Усередині барабана встановлено лопать 4, край якої, що зсипає, співпадає із віссю обертання барабана. Застосування такої лопаті дозволяє встановити куту шкалу 5 на основі 6 та рухомий прапорець 3 на прозорій торцевій стінці 7, що використовуються для фіксації положення вільної поверхні зернистого матеріалу.

3.7.2.2. Реологічні властивості зернистих матеріалів

Характеристики текучості зернистих матеріалів розглядаються *реологією*, як розділом механіки, що вивчає *закономірності деформації та текучості середовища під дією зовнішнього навантаження*. Такі закономірності виявляють *пружні, пластичні та в'язкі властивості* середовищ.

Будь-яка деформація зернистого матеріалу супроводжується зсуванням. Це зсування супроводжується відносним ковзанням частинок або ковзанням частинок по твердій поверхні. На відміну від рідини зернисті матеріали у стані спокою здатні передавати граничні зсуваючі зусилля. Деформація у зернистих матеріалах не настає до тих пір, поки не

буде подолано граничний опір зсуванню. Ці особливості реології зернистих матеріалів зумовлені не лише тертям, але й аутогезією або адгезією. Такий спільний прояв тертя, аутогезії або адгезії не дозволяє залучити пряму аналогію між течією зернистих матеріалів та рідини.

Для описування механічних властивостей зернистих матеріалів може бути застосовано два підходи. Згідно першого, зернисті матеріали розглядаються як суцільне пластичне тіло. Другий підхід базується на дискретності властивостей зернистих матеріалів із урахуванням взаємодії частинок у середовищі цих матеріалів. Саме наявність множини частинок та різноманітність їх розмірів і форм не дозволяє одержати загальний аналітичний розв'язок течії зернистих матеріалів виходячи із строгих теоретичних міркувань.

Тому при вивченні властивостей зернистих матеріалів звичайно застосовується *жорстко-пластична модель*, що базується на припущеннях про виконання таких основних умов:

- зернистий матеріал характеризується граничними напруженнями зсування;
- деформації в зернистому матеріалі не виникають при напруженнях, що є меншими за граничні;
- граничні напруження зсування викликають руйнування зернистого матеріалу;
- у зернистому матеріалі не можуть виникати напруження, що є більшими за граничні значення.

Згідно цієї моделі початок зсування у зернистому матеріалі відповідає рівності зовнішнього зсувного навантаження F та *граничного напруження зсування зернистого матеріалу τ* .

Внутрішній опір зсуванню зернистих матеріалів визначається тертям, що виникає у точках контактів між частинками при взаємному переміщенні, та силами аутогезії, які необхідно подолати для порушення контактів між частинками. Крім того, при зсуванні долається механічне зачеплення, що є характерним для частинок, які мають шорстку поверхню та розгалужену форму, а також для глобулярних частинок при високій щільності їх упаковки. При зсуванні частинки, що зачепились, змінюють своє положення та повертаються до

виходу із зачеплення. Подібна форма взаємодії частинок зводиться також до тертя між ними. Відмінність полягає лише у тому, що процес взаємодії частинок, що переміщуються, розповсюджується від площини ковзання у глибину матеріалу.

Зовнішній опір зсуванню зернистих матеріалів відносно твердої поверхні визначається тертям, що виникає у точках контактів між частинками та поверхнею при взаємному переміщенні, та силами адгезії, які необхідно подолати.

Термін «внутрішній» підкреслює, що розглядається тертя зернистого матеріалу при взаємному зсуванні його шарів, а тертя є внутрішнім по відношенню до зернистого середовища. Термін «зовнішній» підкреслює, що йдеться про тертя зернистого матеріалу при його русі по твердій поверхні, а тертя є зовнішнім по відношенню до зернистого середовища.

Тертя та аутогезія або адгезія залежать від того, із якою силою притискаються один до одного частинки або частинки і тверда поверхня, між якими відбувається зсування.

Закон Кулона, що визначає основний закон руху зернистих матеріалів, формулюється у такий спосіб: *граничний опір зернистого матеріалу зсуванню є пропорційним нормальному тиску на площину ковзання. Нормальний тиск σ_n у свою чергу визначається зовнішнім навантаженням або масою частинок.*

На основі уявлень про зернистий матеріал, як про суцільне середовище, можна вважати, що лінії, які виражають закон Кулона, є геометричним місцем точок, що відповідають границі текучості матеріалу при даних нормальних та зсувних напруженнях. Область течії зернистого матеріалу розташовується вище цієї лінії. У точках, розташованих нижче цієї лінії, зернистий матеріал можна розглядати як жорстке тіло.

Графічно у системі координат τ - σ_n закон тертя Кулона виражається прямою лінією, що є похилою до осі абсцис під кутом φ (рис. 3.37). Лінія, що виражає співвідношення між опором зернистого матеріалу зсуванню τ та нормальним стискаючим навантаженням σ_n називається *лінією границі текучості*.

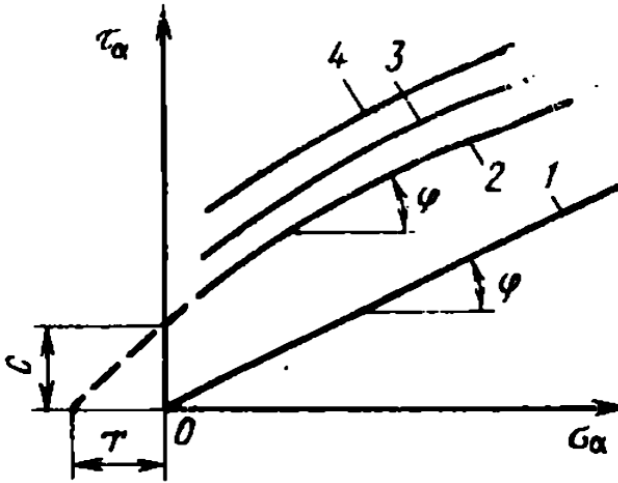


Рис. 3.37. Залежність опору зсуванню τ від нормального напруження у площині зсування σ_n : 1 – для незв’язних зернистих матеріалів; 2, 3 та 4 – для зв’язних зернистих матеріалів при різних ущільнюючих навантаженнях до випробування на приладі, що зсуває

Для крупнозернистих незв’язних матеріалів, де сила аутогезії або адгезії дорівнює нулю, опір зсуванню повністю зумовлено тертям між частинками. За відсутності нормального тиску на площину ковзання σ_n сили тертя, а отже τ , дорівнюють нулю. Для незв’язних матеріалів пряма $\tau=f(\sigma_n)$ проходить через початок координат (рис. 3.37.1), а закон Кулона можна виразити за допомогою рівнянь

$$\tau = f\sigma_n,$$

або

$$\tau = f_{зov}\sigma_n,$$

де f та $f_{зov}$ – коефіцієнти пропорційності, що називаються, відповідно, *коефіцієнтом внутрішнього тертя* та *коефіцієнтом зовнішнього тертя*.

Зі зменшенням розміру частинок та зі збільшенням зв’язності матеріалу сила аутогезії або адгезії зростає і зернистий матеріал набуває додаткової здатності протистояти зсуванню.

Частинки, між якими проходить площина ковзання при

зсуванні, крім нормального тиску σ_n , що притискає їх одна до одної, зазнають ще і взаємного притягання під дією сил аутогезії. Так само, частинки при зсуванні по твердій поверхні, крім нормального тиску σ_n , що притискає їх до поверхні, також зазнають ще і притягання до цієї поверхні під дією сил адгезії. Сили аутогезії у масі зернистого матеріалу, або сили адгезії у зовнішньому контакті зернистого матеріалу із твердою поверхнею, чисельно дорівнюють *міцності на розрив* T . Графічно міцність на розрив виражається довжиною відрізка, що відсікається лінією границі текучості від відємної частини осі абсцис σ_n . Тому сумарне нормальне стискаюче напруження у площині ковзання під дією зовнішнього зусилля та аутогезії або адгезії дорівнює $\sigma_n + T$.

При нульовому значенні нормального тиску σ_n , у площині ковзання продовжує діяти стискаюче напруження, що викликане аутогезією або адгезією та дорівнює за величиною міцності зернистого матеріалу на розрив T . Завдяки цьому напруженню зернистий матеріал чинить опір зсуванню за відсутності нормального тиску на площину ковзання σ_n . Цей опір зсуванню, що називається *зчепленням* C , є внутрішнім або зовнішнім тертям, зумовленим виключно аутогезією або адгезією частинок

$$C = fT,$$

або

$$C = f_{306}T.$$

Закон Кулона для зв'язних, що мають зчеплення, зернистих матеріалів виражається рівнянням

$$\tau = C + f\sigma_n,$$

або

$$\tau = C + f_{306}\sigma_n$$

а при $\sigma_n = 0$

$$\tau = C.$$

Для зв'язних зернистих матеріалів лінія границі текучості в координатах $\tau = f(\sigma_n)$ не проходить через початок координат. Вона відсікає на осі ординат τ відрізок C , що відповідає величині зчеплення (рис. 3.37.2).

Введення поняття про сумарне нормальне навантаження із урахуванням аутогезії або адгезії дозволяє представити закон Кулона у загальному вигляді як для зв'язних, так і для незв'язних зернистих матеріалів

$$\tau = f(\sigma_n + T),$$

або

$$\tau = f_{\text{зоб}}(\sigma_n + T).$$

Таким чином, закон Кулона для зв'язних зернистих матеріалів формулюється у такий спосіб: граничний опір зернистого матеріалу зсуванню є пропорційним нормальному тиску на площину ковзання, а також міцності матеріалу на розрив, що зумовлена аутогезією, або міцності на розрив контакту матеріалу із твердою поверхнею, що зумовлена адгезією.

Багато дрібнозернистих матеріалів та тих, що мають підвищені аутогезійні і адгезійні властивості, не підпорядковуються лінійному закону Кулона. Щільність упаковки таких матеріалів, на відміну від крупнозернистих, значно змінюється зі зміною стискаючого навантаження σ_n , що призводить до збільшення їх міцності на розрив та опору деформаціям. Через це для таких матеріалів графічні залежності ліній границь текучості $\tau=f(\sigma_n)$ виражаються сімейством кривих ліній, опуклих догори, кожна з яких відповідає певному ущільнюючому навантаженню σ_n , що прикладене до матеріалу при випробуванні на зсування (рис. 3.37.2-4). Зі збільшенням ущільнюючого навантаження лінії $\tau=f(\sigma_n)$ зміщуються догори. Такі лінії не є прямими, однак їх при середніх та високих значеннях σ_n можна апроксимувати прямими зі сталим значенням кута ϕ .

Лінії границь текучості $\tau=f(\sigma_n)$ отримуються дослідним шляхом на основі зсувних випробувань. За допомогою таких ліній визначаються характеристики текучості зернистого матеріалу, умови його течії та руйнування, деякі технологічні характеристики, вивчаються вплив різноманітних факторів на поведінку та властивості матеріалу.

3.7.2.3. Коефіцієнти та кути внутрішнього і зовнішнього тертя

Коефіцієнт внутрішнього тертя f зернистого матеріалу є середньостатистичним значенням коефіцієнтів тертя частинок одна об одну та залежить від розмірів частинок, їх форми, твердості, шорсткості поверхні та порожноті шару. Коефіцієнт зовнішнього тертя $f_{зov}$ теж є середньостатистичним значенням коефіцієнтів тертя частинок зернистого матеріалу об тверду поверхню.

Фізичний та геометричний зміст коефіцієнтів внутрішнього f та зовнішнього $f_{зov}$ тертя може бути з'ясованим при розгляді умови рівноваги шару незв'язної зернистої маси на похилій твердій поверхні (рис. 3.38).

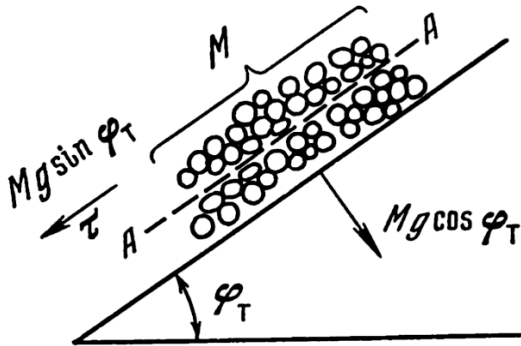


Рис. 3.38. Схема втрати граничної рівноваги незв'язного зернистого матеріалу при виникненні взаємного зсування похилих шарів матеріалу та виникненні зсування матеріалу відносно похилої твердій поверхні

Внаслідок нахилу на деякий кут тертя φ_m , шар незв'язного зернистого матеріалу починає зазнавати дотичного зсувного навантаження F

$$F = Mg \sin \varphi_m,$$

де M – маса шару матеріалу, g – прискорення сили тяжіння.

Крім того, шар зернистого матеріалу починає зазнавати нормального навантаження на опорній поверхні N

$$N = Mg \cos \varphi_m.$$

Дотичне напруження на опорній поверхні шару становить

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{Mg \sin \varphi_m}{S},$$

а нормальне напруження становить

$$\sigma_n = \frac{N}{S} = \frac{Mg \cos \varphi_m}{S},$$

де S – площа опорної поверхні.

Якщо розглядати зсув усередині зернистого матеріалу, то, згідно закону Кулона для незв'язного зернистого матеріалу ($T=0$), гранична рівновага похилого шару матеріалу на поверхні А-А буде порушуватись коли кут тертя φ_m буде дорівнювати куту внутрішнього тертя $\varphi_{вн}$ ($\varphi_m = \varphi_{вн}$), а між напруженнями на поверхні А-А встановиться співвідношення

$$\tau = f \sigma_n,$$

або

$$\frac{Mg \sin \varphi_{вн}}{S} = f \frac{Mg \cos \varphi_{вн}}{S}.$$

Розв'язавши останнє рівняння відносно f , після перетворень можна одержати

$$f = \frac{Mg \sin \varphi_{вн}}{S} \frac{S}{Mg \cos \varphi_{вн}} = \operatorname{tg} \varphi_{вн}.$$

Таким чином коефіцієнт внутрішнього тертя дорівнює тангенсу кута внутрішнього тертя

$$f = \operatorname{tg} \varphi_{вн}.$$

Аналогічно, якщо розглядати зовнішній зсув зернистого тіла відносно поверхні твердої стінки, то, згідно закону Кулона для незв'язного зернистого матеріалу, гранична рівновага зернистого тіла на похилій твердій поверхні буде порушуватись коли кут тертя φ_m буде дорівнювати куту зовнішнього тертя $\varphi_{зов}$ ($\varphi_m = \varphi_{зов}$), а між напруженнями на твердій поверхні встановиться співвідношення

$$\tau = f_{зов} \sigma_n.$$

Тоді, після перетворень, можна показати, що коефіцієнт зовнішнього тертя дорівнює тангенсу кута зовнішнього тертя

$$f_{з\text{ов}} = \text{tg} \varphi_{з\text{ов}}.$$

Визначити коефіцієнти тертя зернистого матеріалу можна за допомогою методу площинного зсування – лінійного або колового. Вимірювання опору зсуванню є найбільш розповсюдженим видом випробувань міцності та реологічних властивостей матеріалів, що пов'язані із характеристиками текучості. Зсувний прилад звичайно є коміркою, що складається з двох частин, із горизонтальною площиною роз'єму (рис. 3.39-3.41). У камері комірки розміщується досліджуваний матеріал, який ущільнюється, під дією стискаючого навантаження σ_n , або перебуває у стані вільного насипання. До одної з частин комірки прикладається навантаження – τ або M_τ , що направлено вздовж площини роз'єму. При зміщенні частин комірки, що заповнена досліджуваним матеріалом, одна відносно іншої, у площині роз'єму виникає зсувне деформування та руйнування зразків.

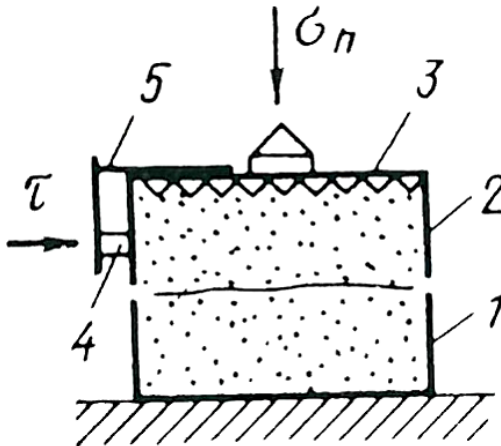


Рис. 3.39. Принципова схема порожнистої роз'ємної комірки:
1 – чаша, 2 – кільце, 3 – ущільнюючий диск, 4 – шток, 5 – кронштейн

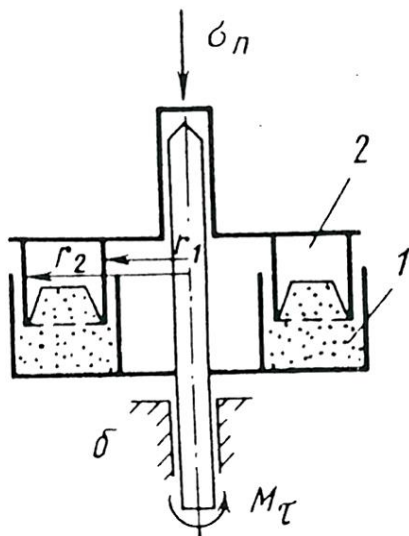


Рис. 3.40. Принципова схема комірки кільцевого зсування:
1 – кільцевий жолоб, 2 – кільцева колодка

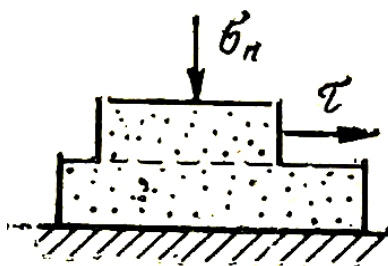


Рис. 3.41. Принципова схема комірки зсування по поверхні шару

Найбільш розповсюдженим пристроєм для отримання характеристик зсування зернистих матеріалів шляхом випробування є *зсувний прилад Дженіке* (рис. 3.42). Цей прилад має такі основні елементи: вимірювальну камеру або комірку зсування, механізм вертикального навантаження, раму та прилад для безперервної реєстрації зусиль зсування.

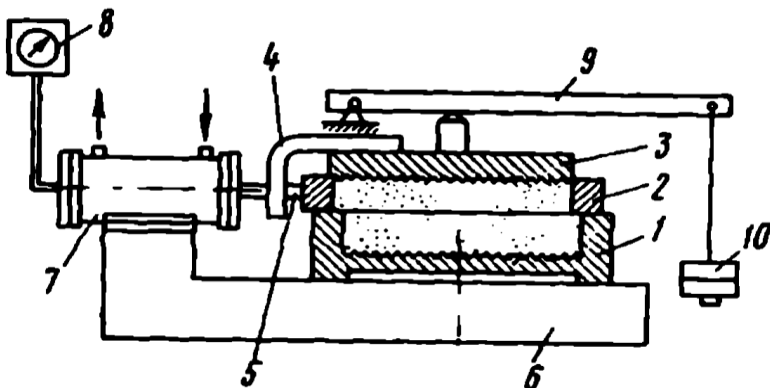


Рис. 3.42. Схема приладу Дженіке для визначення внутрішнього опору зернистих матеріалів прямому зсуванню: 1 – циліндричний корпус, 2 – зсувне кільце, 3 – кришка, 4 – кронштейн, 5 – стержень, 6 – рама, 7 – пневмоциліндр, 8 – самопишучий манометр, 9 – важіль, 10 – вантаж

Вимірювальна камера складається з циліндричного корпусу 1, зсувного кільця 2, кронштейна 4, що закріплено на кришці 3. Внутрішня частина дна корпусу 1 та нижня частина кришки 3 мають насічку для більшого їх зчеплення із зернистим матеріалом. Корпус вимірювальної камери закріплено на рамі 6 приладу.

Механізмом зсування є пневмоциліндр 7, який може створювати на кронштейні необхідну зсувну силу, що безперервно вимірюється самопишучим манометром 8.

Механізм вертикального навантаження складається із важеля 9, що навантажено за допомогою тяг вантажем 10.

Зсувні сили вимірюються за допомогою приладу у такий послідовності. У вимірювальну камеру подається порція досліджуваного матеріалу, що піддається попередньому ущільненню. Вимірювальна камера із надітою кришкою 3 встановлюється на раму 6 приладу. За допомогою вантажів 10 до кришки 3 прикладається вертикальна сила. Після цього, за допомогою пневмоциліндра, зсувному кільцю надається зсувна сила, що деформує зернистий матеріал зі швидкістю $1,5 \cdot 10^{-5}$ м/с. Ця сила розподіляється за допомогою кронштейна 4 та стержня 5

рівномірно між кільцем 2 та кришкою 3. Величина зсувної сили збільшується до утворення у масі зернистого матеріалу площини руйнування. У цей момент значення зсувної сили фіксується самописцем манометра. Після виникнення площини руйнування величина зсувної сили залишається сталою, або навіть дещо знижується.

Граничне дотичне напруження τ визначається за величиною горизонтального зсувного зусилля F_τ , що зафіксовано у момент початку руху кільця 2, а нормальне напруження σ_n – за величиною вертикального стискаючого нормального зусилля F_σ , що прикладене до кришки.

Для незв'язного зернистого матеріалу величина коефіцієнта внутрішнього тертя може бути визначена за виразом

$$f = \frac{\tau}{\sigma_n} = \frac{F_\tau}{F_\sigma},$$

де $\tau = F_\tau/S$, $\sigma_n = F_\sigma/S$, S – площа поперечного перерізу зсувної комірки.

У випадку зв'язного зернистого матеріалу змінюється величина нормального стискаючого зусилля F_σ та за одержаними значеннями зсувного зусилля F_τ будується лінія границі внутрішньої текучості матеріалу $\tau = f(\sigma_n)$ в осях τ - σ_n .

Зсувний прилад Дженіке також може бути використаний для визначення коефіцієнту зовнішнього тертя та границі зовнішньої текучості. Для цього одна половина вимірювальної камери замінюється пластиною із досліджуваного твердого матеріалу (рис. 3.43).

Пластина із матеріалу поверхні 5, що обмежує, встановлюється на підставці 6 так, щоб її верхня площина співпадала із віссю штока 1, що навантажує. На пластину встановлюється кільце 4, засипається у нього зернистий матеріал, який дещо ущільнюється. На матеріал встановлюється кришка 3 із кронштейном. На кришку встановлюються вантажі 2, для створення певного нормального навантаження. Потім до кронштейна кришки підводиться шток, що навантажує, та здійснюється зсування зразка по поверхні до встановлення сталого значення зсувного навантаження.

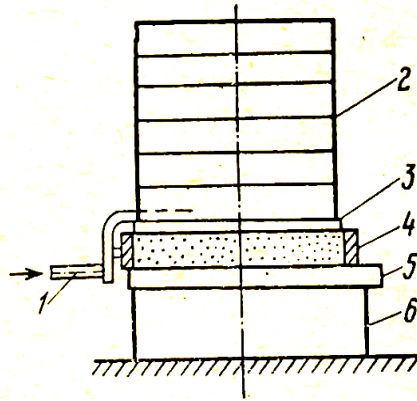


Рис. 3.43. Схема приладу Дженіке для визначення зовнішнього опору зернистих матеріалів зсуванню: 1 – шток, 2 – вантаж, 3 – кришка, 4 – кільце, 5 – пластина із досліджуваного матеріалу, 6 – підставка

Величина коефіцієнта зовнішнього тертя для незв'язного зернистого матеріалу може бути визначена, аналогічно до коефіцієнта внутрішнього тертя, за значеннями зареєстрованого горизонтального зсувного зусилля F_τ та вертикального стискаючого нормального зусилля F_σ

$$f_{зов} = \frac{F_\tau}{F_\sigma}.$$

Істотним недоліком зсувного приладу Дженіке є можливість визначення лише коефіцієнта тертя спокою, який характеризує умови переходу зернистого матеріалу від стану спокою до руху. Неможливість визначення коефіцієнта тертя руху зумовлена зміною площі зсувного контакту між частинами комірки та змінами умов силової взаємодії між частинками поблизу площини зсування, при взаємному зсуванні частин комірки.

Для визначення коефіцієнтів внутрішнього та зовнішнього тертя зернистих матеріалів, як спокою, так і руху, використовуються прилади із обертовими зсувними комірками. У таких приладах, при переміщенні верхньої секції відносно нижньої, площа зсування не змінюється, а також не змінюються

умови контакту між частинками поблизу площини зсування. Зсувне деформування зразка у таких приладах є необмеженим по довжині.

Прилад кільцевого зсування (рис. 3.44) містить кільцевий жолоб 2 та кільцеву колодку 4, що входить у нього. Колодка має знизу виїмку, що розділена на секції вертикальними пластинами.

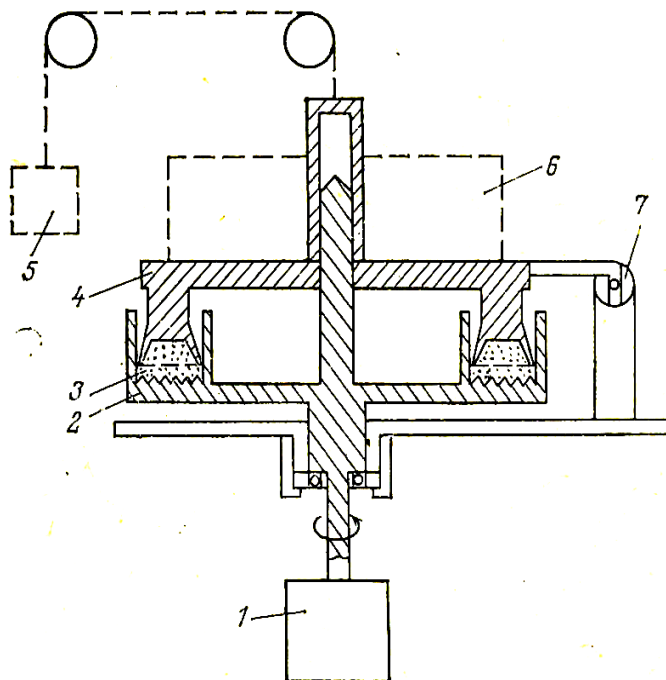


Рис. 3.44. Схема приладу кільцевого зсування: 1 – електродвигун, 2 – кільцевий жолоб, 3 – досліджуваний зернистий матеріал, 4 – кільцева колодка, 5 – протизвага, 6 – вантаж, 7 – вимірювач зусилля

Нормальне навантаження передається на зразок зернистого матеріалу 3 шляхом встановлення вантажу 6 на колодку 4. Для задавання малого стискаючого навантаження, використовується протизвага 5, що сполучено із колодкою за допомогою гнучкого елемента та блоків.

Жолоб приводиться в обертання електродвигуном 1 із кутовою швидкістю $(1,75\dots 2,62) \cdot 10^{-3}$ 1/с. Колодка утримується нерухомо, при цьому безперервно реєструється зусилля, необхідне для утримання колодки. Як вимірювач зусилля 7 використовується калібровані пружні елементи із датчиками переміщення.

Величина напруження зсування визначається за значенням моменту сил M , що діє на колодку, та зовнішнього r_1 та внутрішнього r_2 радіусам колодки (рис. 3.40)

$$\tau = \frac{M}{\frac{2}{3}\pi(r_1^3 - r_2^3)}$$

Нормальне контактне напруження визначається за значенням вертикального стискаючого нормального зусилля F_σ

$$\sigma_n = \frac{F_\sigma}{\pi(r_1^2 - r_2^2)}$$

Коефіцієнти внутрішнього $f = \tau/\sigma_n$ або зовнішнього $f_{\text{зов}} = \tau/\sigma_n$ тертя спокою незв'язного зернистого матеріалу визначаються за максимальними значеннями параметрів, що зареєстровано до початку обертання жолоба приладу кільцевого зсування, а коефіцієнти тертя руху – за середніми значеннями під час обертання жолоба.

Для визначення коефіцієнту внутрішнього тертя спокою та руху незв'язних зернистих матеріалів, що не є ущільненими та перебувають у розсипчастому або розпушеному стані, використовуються, також, *прилади із зсуванням по поверхні шару* (рис. 3.45). Комірки таких приладів мають нижню частину із площею, що значно перевищує площу верхньої частини. Це збільшує довжину можливого зміщення при зсуванні, але не дозволяє точно контролювати щільність матеріалу. У цих приладах також, при переміщенні верхньої секції відносно нижньої, площа зсування не змінюється, а також не змінюються умови контакту між частинками поблизу площини зсування. Зсувне деформування зразка у таких приладах є необмеженим по довжині.

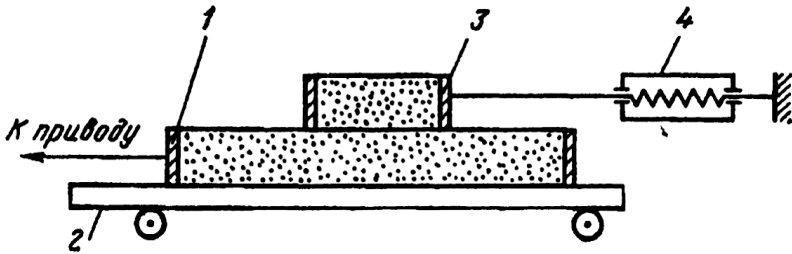


Рис. 3.45. Принципова схема приладу для зсування по поверхні шару зернистого матеріалу у розсипчастому стані:
1 – зсувна комірка, 2 – візок, 3 – матриця, 4 – динамометр

Досліджуваний зернистий матеріал вільно засипається у зсувну комірку 1, що встановлено на візку 2. У матрицю 3, що з'єднано із динамометром 4, засипається певна кількість матеріалу. Після включення приводу при усталеному русі візка фіксуються покази динамометра.

Нормальне напруження у шарі матеріалу розраховується за виразом

$$\sigma_n = \frac{Mg}{S},$$

де M – маса матеріалу у матриці, g – прискорення сили тяжіння, S – площа перерізу матриці. Дотичне напруження – за виразом

$$\sigma_n = \frac{F - F_0}{S},$$

де F – показники динамометра при переміщенні матриці із матеріалом, F_0 – показники динамометра при переміщенні матриці без матеріалу.

Коефіцієнт внутрішнього тертя $f = \tau / \sigma_n$ спокою незв'язного зернистого матеріалу визначається за максимальними значеннями параметрів, що зареєстровано до початку руху візка, а коефіцієнт тертя руху – за середніми значеннями під час руху візка.

Величини коефіцієнтів внутрішнього тертя зернистих матеріалів пов'язані зі значеннями кутів тертя, а ті, у свою чергу,

залежать від величин кутів укусу та обрушення. Для крупнозернистих незв'язних матеріалів кут внутрішнього тертя руху $\varphi_{вн}^{pyx}$ приблизно дорівнює куту природного укусу або динамічному куту природного укусу α_{np} , а кут внутрішнього тертя спокою $\varphi_{вн}^{cn}$ приблизно дорівнює куту обрушення або статичному куту природного укусу $\alpha_{обр}$:

$$\varphi_{вн}^{pyx} \approx \alpha_{np},$$

$$\varphi_{вн}^{cn} \approx \alpha_{обр}.$$

Тому, враховуючи залежності $f^{pyx} = tg \varphi_{вн}^{pyx}$ та $f^{cn} = tg \varphi_{вн}^{cn}$, значення кутів внутрішнього тертя руху та спокою для незв'язних зернистих матеріалів можуть бути наближено визначені у такий простий спосіб

$$f^{pyx} \approx tg \alpha_{np},$$

$$f^{cn} \approx tg \alpha_{обр}.$$

Загалом величина коефіцієнта тертя спокою зернистих матеріалів є більшою за величину коефіцієнта тертя руху. Крім того, для більшості незв'язних зернистих матеріалів, значення коефіцієнта зовнішнього тертя по сталі є меншою за значення коефіцієнта внутрішнього тертя.

Значення кутів укусу і обрушення та кутів і коефіцієнтів внутрішнього та зовнішнього тертя руху і спокою для деяких зернистих матеріалів наведено, для порівняння, у табл. 3.1 [9,10].

Таблиця 3.1

Фрикційні властивості зернистих матеріалів

№ з/п	Зернистий матеріал	Кут						Коефіцієнт			
		природного укосу $\alpha_{\text{пр}}$	обрушення $\alpha_{\text{обр}}$	внутрішнього тертя руху $\varphi_{\text{вн}}^{\text{рх}}$	внутрішнього тертя спокою $\varphi_{\text{вн}}^{\text{сп}}$	зовнішнього тертя руху по сталі $\varphi_{\text{зов}}^{\text{рх}}$	зовнішнього тертя спокою по сталі $\varphi_{\text{зов}}^{\text{сп}}$	внутрішнього тертя руху $f^{\text{рх}}$	внутрішнього тертя спокою $f^{\text{сп}}$	зовнішнього тертя руху по сталі $f_{\text{зов}}^{\text{рх}}$	зовнішнього тертя спокою по сталі $f_{\text{зов}}^{\text{сп}}$
				Град.							
1	Гравій	30	45	35	-	30	45	0,7	-	0,58	1,0
2	Вапняк молотий	35	50	30	52	29	45	0,57	1,26	0,56	1,0
3	Пісок сухий	33	45	39	45	30	39	0,8	1,0	0,58	0,8
4	Крейда	42	45	39	-	37	-	0,81	-	0,76	-
5	Глина молота	35	-	40	45	37	45	0,84	1,0	0,75	1,0
6	Клінкер, шлак	35	50	-	-	35	50	-	-	0,7	1,19
7	Цемент	30	50	27	40	17	33	0,5	0,84	0,3	0,65
8	Вапно гідратне	30	43	29	35	19	30	0,56	0,7	0,35	0,58
9	Гіпс	28	40	30	39	31	38	0,58	0,82	0,61	0,78
10	Вугілля	35	50	34	-	25	45	0,67	-	0,47	1,0

3.8. Рухливість або текучість зернистих матеріалів

Під дією зовнішніх сил частинки зернистого матеріалу можуть переміщуватись відносно одна одної. Ця властивість рухливості матеріалу часто називається *текучістю*. Текучість зернистих матеріалів є складною комплексною характеристикою, що залежить від багатьох факторів: гранулометричного складу, форми та розміру частинок, шорсткості їх поверхні, внутрішнього тертя, ступеня ущільнення та вологості. Текучість або рухливість зернистих матеріалів визначає конструктивні та технологічні особливості камер і ємностей для переробки та зберігання таких матеріалів, зокрема тривалість процесів їх заповнення та випорожнення.

Звичайно оцінка текучості зернистих матеріалів проводиться за вільним витіканням із бункерів або воронок. Текучість характеризується здатністю матеріалу витікати з певною швидкістю із отворів. Прилади для визначення текучості мають конічну воронку із кутом при вершині 60...80°. За допомогою цих приладів текучість визначається за масою або об'єму матеріалу, що пройшов через деякий сталий переріз в одиницю часу.

Текучість зернистих матеріалів може характеризуватись *коефіцієнтом текучості K*

$$K = \frac{t \cdot r^{2,58}}{m},$$

де t – тривалість витікання порції матеріалу із воронки; r – радіус отвору воронки; m – маса матеріалу, що засипано у воронку.

Прилад (рис. 3.46) для визначення коефіцієнта текучості K зернистих матеріалів містить конусну скляну тарировану воронку 1, що закріплено на стояку 2, який спирається на підставку 5. Трубка воронки закривається засувкою 3.

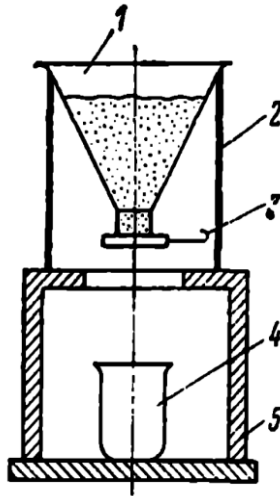


Рис. 3.46. Схема приладу для визначення текучості зернистих матеріалів: 1 – конусна скляна воронка, 2 – стояк, 3 – засувка, 4 – колба, 5 – підставка

У воронку, при закритій засувки, засипається порція досліджуваного матеріалу. Відкривається засувка та одночасно включається секундомір. Вимірюється тривалість витікання із воронки порції матеріалу у колбу 4. Розраховується значення коефіцієнта текучості K . Чим більшою є величина K , тим менш рухливим є матеріал, і тим повільніше він витікає із отворів.

Зв'язні зернисті матеріали можуть за певних умов і не витікати із отворів. Це відбувається у тому випадку, коли над отвором утворюється склепіння із матеріалу.

Текучість зернистих матеріалів може характеризуватись, також, різними опосередкованими показниками.

Ступінь текучості, як комплексної характеристики здатності зернистого матеріалу утворювати дискретно-неперервний стійкий потік, може бути оцінена узагальненою характеристикою за такими показниками: кут природного укосу, кут обрушення та ущільнюваність (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Комплексна оцінка текучості зернистих матеріалів

Бальна оцінка ступеня текучості	Характеристика текучості	Робоча характеристика процесу та обладнання	Кут природного укошу	Кут обрушення	Ущільнюваність У
			$\alpha_{пр}$ град.	$\alpha_{обр}$ град.	
90-100	Дуже хороша	Матеріал не залегає. Допоміжного обладнання не потрібно	25-30	25-31	0,05-0,1
80-80	Хороша	Матеріал не залегає. Допоміжного обладнання не потрібно	31-35	32-38	0,11-0,15
70-79	Задовільна	Зависання виникають за особливих умов. Допоміжного обладнання звичайно не потрібно	36-40	39-45	0,16-0,2
60-69	Допустима	Матеріал може зависати. Іноді є потреба у допоміжному обладнанні	41-45	46-60	0,21-0,25
40-59	Незадовільна	Необхідним є допоміжне обладнання, вібрування	46-55	61-75	0,26-0,31
20-39	Погана	Необхідним є більш потужне допоміжне обладнання	56-65	76-90	0,32-0,37
0-19	Дуже погана	Потрібним є спеціальне обладнання для примусового руху або кондиціонування матеріалу	66-90	91-100	0,38-0,45

Текучість або рухливість зернистого матеріалу може бути оцінена також його *обрушуваністю*, що характеризується схильністю до утворення псевдозрідженої системи із нестійким лавиноподібним витіканням.

Ступінь обрушуваності, як комплексної характеристики зернистого матеріалу, може бути оцінена узагальненою характеристикою за такими показниками: кут падіння, кут різниці та бальна оцінка ступеня текучості (табл. 3.3).

Таблиця 3.3
Комплексна оцінка обрушуваності зернистих матеріалів

Характеристика обрушуваності	Робоча характеристика процесу та обладнання	Кут падіння	Кут різниці	Бальна оцінка ступеня текучості (за табл. 2)
		$\alpha_{пад}$ град.	$\alpha_{різ}$ ($\alpha_{пр}-\alpha_{пад}$) град.	
Висока	Матеріал легко обрушується. Необхідним є шлюзовий затвор	10-25	24-30	49-60
Значна	Матеріал обрушується. Необхідним є шлюзовий затвор	26-40	15-23	39-48
Помірна	Матеріал є схильним до обрушування. Бажаним є встановлення шлюзового затвору	41-50	10-14	33-38
Незначна	Матеріал іноді обрушується. Може виникнути потреба у шлюзовому затворі у залежності від швидкості падіння матеріалу	51-57	7-9	28-32
Низька	Матеріал не обрушується. Шлюзовий затвор не є потрібним	58-64	0-6	23-27

Кутом падіння $\alpha_{пад}$ є кут природного укосу насипаної порції зернистого матеріалу після стабілізації методом п'ятиразового ударного струшування основи, на якій утворено природний насип матеріалу. Розтікання порції матеріалу при струшуванні пов'язано із руйнуванням його структури у момент ударної дії та відображає ступінь обрушуваності. Зі збільшенням кута падіння знижуються обрушуваність та рухливість матеріалу.

Кутом різниці $\alpha_{риз}$ є різниця між кутом природного укосу та кутом падіння. Зі збільшенням кута різниці зростає обрушуваність та рухливість матеріалу.

3.9. Вологість зернистих матеріалів

Вологість зернистих матеріалів є змінною величиною і може коливатись у широких межах в залежності від природи матеріалу, гранулометричного складу, температури та атмосферного тиску. Вологість є важливою характеристикою стану зернистих матеріалів та впливає на багато їх властивостей – текучість, внутрішнє і зовнішнє тертя, аутогезію і адгезію, склепоутворення та щільність.

Вологість зернистого матеріалу визначає рухливість його частинок. Збільшення вологості звичайно погіршує характеристику витікання матеріалу. Зернистий матеріал із підвищеною вологістю має більші сили зчеплення частинок, що сприяє утворенню грудок та статичних склепінь над отвором воронки бункера. Витікання такого матеріалу із отвору ємності вкрай утруднено.

Зв'язок вологи із матеріалом може бути механічним, фізико-хімічним та хімічним. Волога, що знаходиться між частинками матеріалу та на їх поверхні, має механічний зв'язок із матеріалом. Фізико-механічний зв'язок із матеріалом має волога, що проникає у пори частинок за рахунок адсорбції або дифузії. Хімічно зв'язаною є гідратна або кристалізаційна волога.

Простим тепловим висушуванням можна видалити механічно зв'язану та частково фізико-хімічну вологу. Ця волога, що видаляється, називається *вільною*, а волога, що залишається при цьому у матеріалі, називається *гігроскопічною*, яка не може бути повністю видаленою із матеріалу простим нагріванням.

Кількості вологи, що міститься у твердих тілах, характеризується поняттям *масової вологості* w , яка відповідає відношенню маси вологи, що міститься у зернистому матеріалі, до маси вологого матеріалу

$$w = \frac{m_g - m_c}{m_g},$$

де m_g – маса вологого матеріалу, m_c – маса абсолютно сухого матеріалу.

Методи визначення вологості зернистих матеріалів поділяються на прямі та опосередковані.

Прямі методи базуються на безпосередньому вимірюванні маси вологи та маси сухої речовини у порції. До прямих методів відносяться:

- метод висушування, що полягає у повітряно-тепловому сушінні порції та вимірюванні її маси до та після сушіння;

- екстракційний метод, при якому волога витягується із матеріалу рідиною, що поглинає воду, із наступним визначенням вмісту вологи у екстракторі;

- карбідний метод, який базується на витягуванні вологи за допомогою карбіду кальцію, що змішується із зернистим матеріалом та вступає з нею у реакцію із утворенням ацетилену, за об'ємом якого роблять висновок щодо маси вологи.

Опосередковані методи дозволяють робити висновок щодо вологості шляхом вимірювання функціонально зв'язаних із нею величини. До них відносяться такі методи:

- електричні, при яких вимірюються електрофізичні характеристики зернистого матеріалу, що змінюються у залежності від вологості – електричну провідність та ємність;

- механічні, що базуються на вимірюванні механічних характеристик зернистих матеріалів, які мають відповідний функціональний зв'язок із вологістю;

- оптичні, при яких роблять висновок про вологість за величиною світла, що відбивається від поверхні зернистого матеріалу;

- калориметричний, що базується на вимірюванні теплоємності матеріалу у залежності від його вологості;

- ультразвуковий, що базується на здатності зернистих матеріалів знижувати швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль.

Серед зазначених методів найбільшого розповсюдження набув метод висушування, як найточніший. Однак вимірювання вологості зернистого матеріалу цим методом потребує тривалого часу, тому його не можна використовувати для безперервного контролю матеріалу у потоці.

3.10. Гранулярна температура зернистих (дисперсних) матеріалів

Як фізичний параметр, що характеризує енергію взаємних переміщень зернистих (дисперсних) частинок застосовується гранулярна температура (*granular temperature*). Ця характеристика течії зрідженого зернистого середовища є давно і добре відомою, пройшла широку прикладну апробацію та засвідчила високу ефективність застосування для чисельного і експериментального моделювання. У аналітичному огляді [13] розглянуто застосування концепції гранулярної температури для побудови кінетичних і, на їх основі, гідродинамічних теорій для зернистих середовищ. Вважається, що концепцію гранулярної температури, як міри флуктуацій швидкості в псевдозрідженій зернистій системі, вперше було висунуто Огавою ще у 1978 році [14, 15]. Поняття гранулярної температури успішно використовується незалежно від розміру частинок та щільності зернистих потоків в області гранулярних газів (*granular gases*) [16] та гранулярних рідин (*granular fluids*) [18]. Характерно, що у підрозділі 5.5 [13], як поширене помилкове уявлення, наведено твердження про те, що поняття гранулярної температури не застосовується до щільних гранулярних газів. Натомість в [13] показано, що гранулярну температуру було використано для помірно щільних та успішно застосовано навіть для дуже щільних гранулярних газів [19-20]. Зокрема, в [18] застосовано гранулярну температуру для аналітичного дослідження спричиненої зсувом кристалізації у дуже щільному швидкому

зернистому потоці із монодисперсними непружними твердими сферичними частинками. Чисельний аналіз дуже щільного швидкого зернистого потоку жорстких дисків, що непружно зштовхуються, зі застосуванням гранулярної температури наведено в [19]. В [20] із використання гранулярної температури аналітично визначено параметри руху щільного зернистого потоку твердих сферичних частинок вниз по похилій площині.

Незважаючи на відсутність прямого методу вимірювання гранулярної температури, її наслідки є вимірними та доволі важливими. Температуру зернистої системи можна знайти або шляхом детального вимірювання швидкостей частинок при чисельному моделюванні, або експериментально, або опосередковано через її наслідки [13]. Аналітичне та експериментальне визначення гранулярної температури широко застосовується при моделюванні поведінки зернистого завантаження камер машин барабанного типу, у тому числі барабанних млинів.

У роботі [21] за допомогою чисельного моделювання із використанням алгоритму молекулярної динаміки отримано картину розподілу гранулярної температури у зсувному шарі монозернистого завантаження (рис. 3.47).

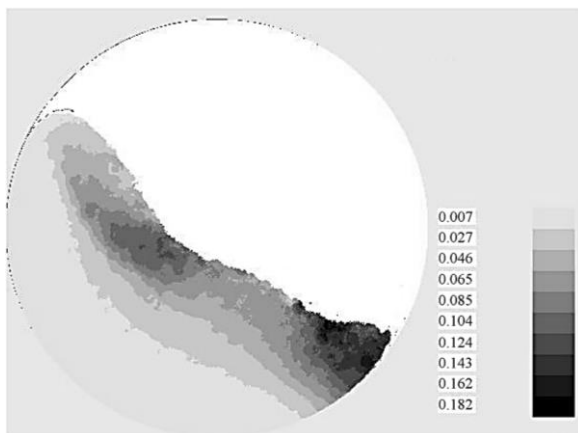


Рис. 3.47. Результати чисельного визначення розподілу гранулярної температури у зсувному шарі завантаження (за [21])
Чисельне моделювання методом кінцевих елементів DEM

дозволило встановити розподіл гранулярної температури при тривимірному русі двофракційного завантаження (рис. 3.48) [22].

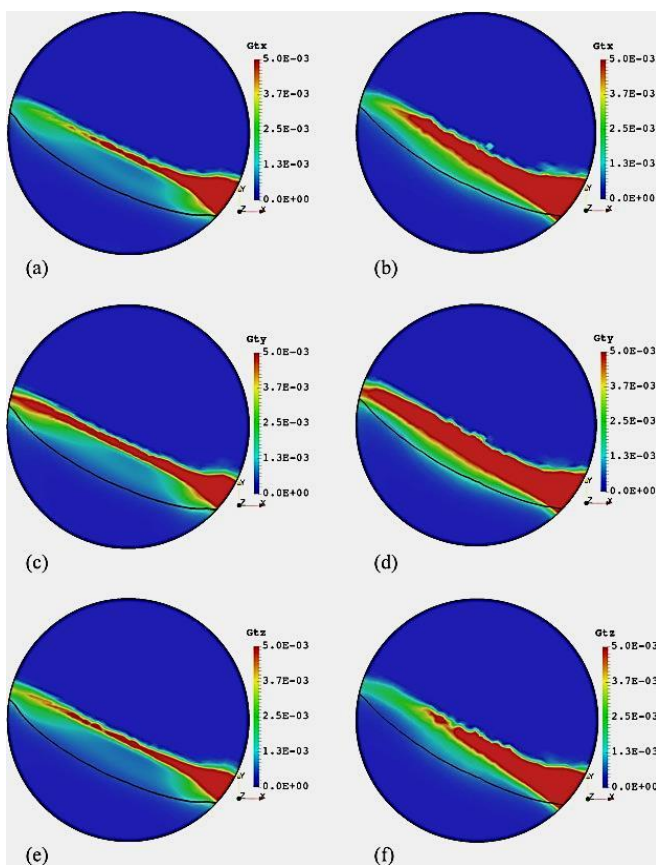
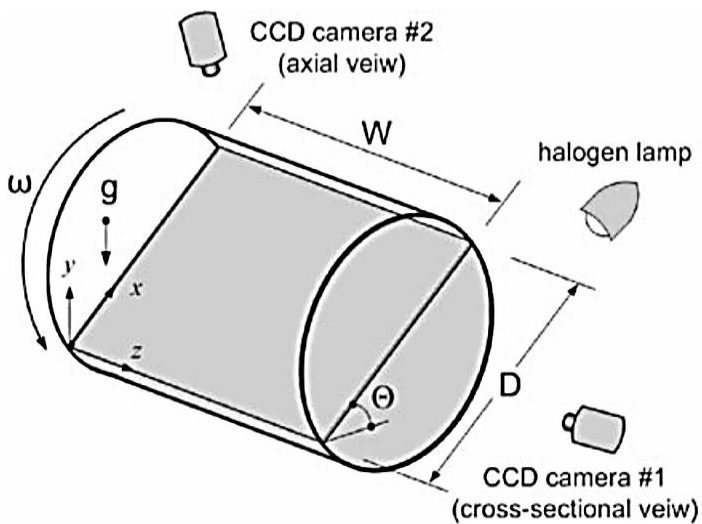


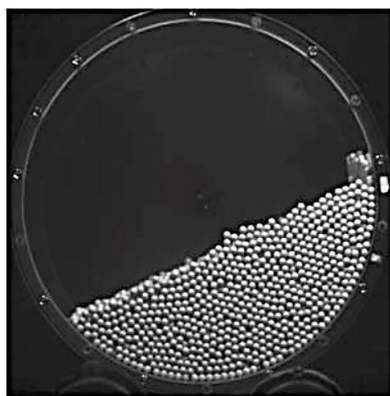
Рис. 3.48. Результати чисельного визначення розподілу усередненої за часом гранулярної температури завантаження: а – складова вздовж вільної поверхні в центральному перерізі камери; б – складова вздовж вільної поверхні в пристінному перерізі; с – перпендикулярна до вільної поверхні складова в центральному перерізі; d – перпендикулярна до вільної поверхні складова в пристінному перерізі; е – осьова складова в центральному перерізі; f – осьова складова в пристінному перерізі (за [22])

У [23] було використано відеофіксацію (рис. 3.49) для експериментального визначення гранулярної температури при

усталеному режимі руху зернистого завантаження (рис. 3.50).



(a)



(b)

Рис. 3.49. Схема відеофіксації гранулярної температури завантаження:
а – експериментальна установка;
б – отримана картина руху завантаження (за [23])

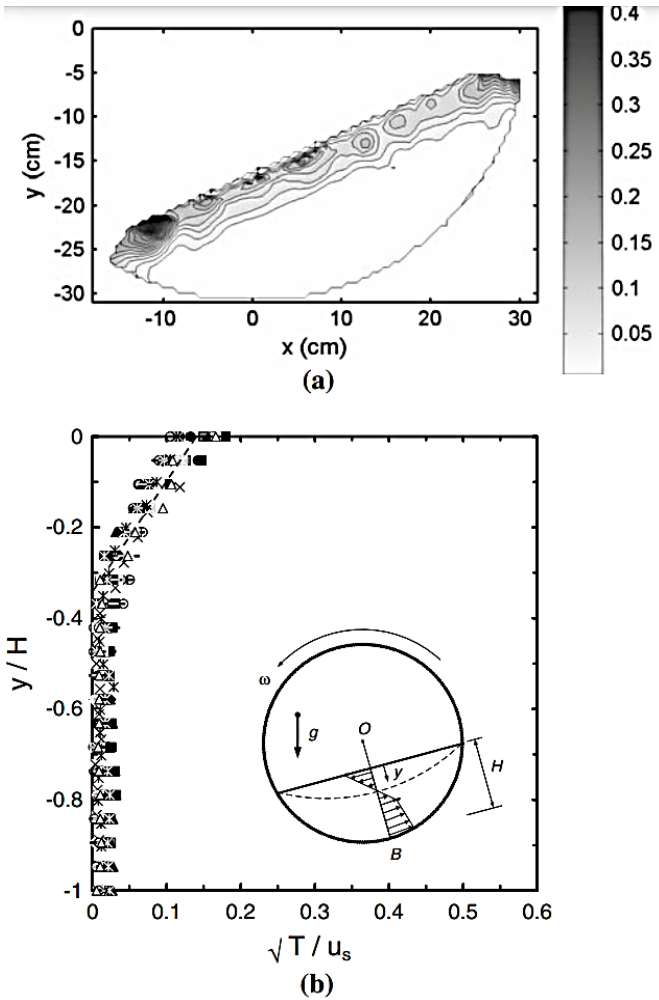


Рис. 3.50. Результати експериментального визначення розподілу гранулярної температури завантаження: а – двовимірна картина; б – значення на центральній лінії перерізу (за [23])

Експериментальний метод рентгеноскопії руху частинок SVS застосовано для визначення гранулярної температури обрушення зернистої лавини на вільній поверхні зсувного шару завантаження повільно обертового барабан (рис. 3.51) [24].

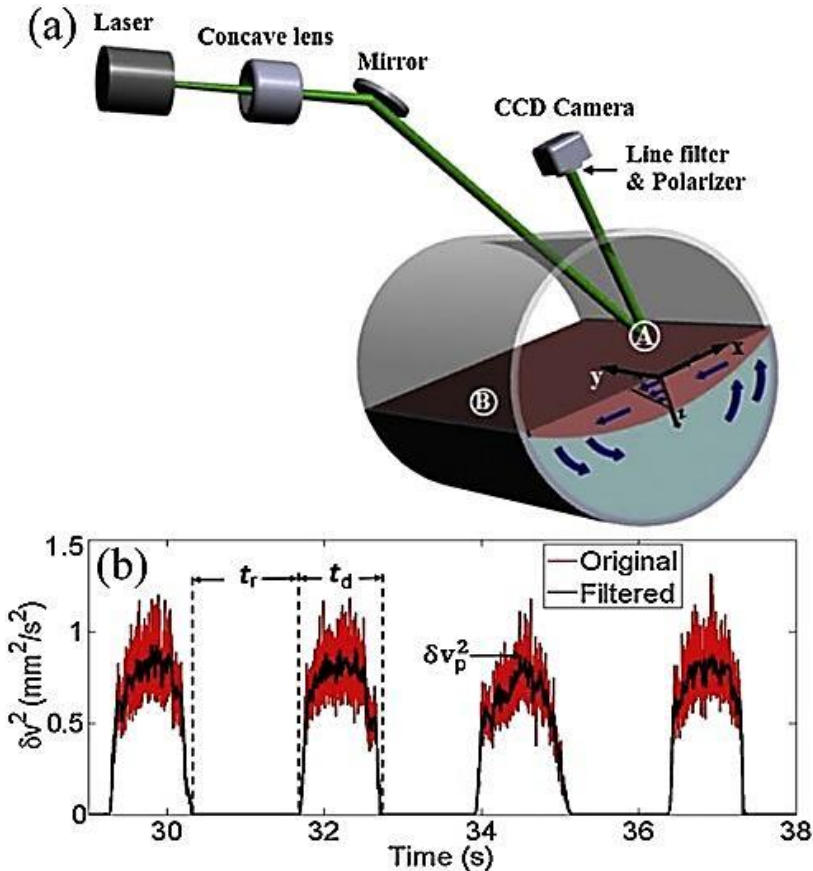


Рис. 3.51. Вимірювання зміни гранулярної температури при обрушенні лавини на вільній поверхні зсувного шару зернистого завантаження за допомогою методу спекл-видимої спектроскопії SVS:
 а – схема експериментальної установки;
 б – отриманий графік зміни температури за часом (за [24])

Отже гранулярна температура є термодинамічною аналогією із тепловим рухом молекул, що характеризує питому кінетичну енергію коливань зернистих (дисперсних) частинок у зсувному потоці. Чинниками гранулярної температури можуть бути флуктуації, зсування та поперечне взаємне переміщення частинок [25].

Питання та завдання для самоконтролю

1. Дайте класифікацію робочих середовищ технологічних машин.
2. Що є основною властивістю рідини?
3. Що є в'язкістю та границею текучості рідини?
4. Дайте класифікацію рідин.
5. Дайте класифікацію суспензій.
6. У чому полягає відмінність між рідкоподібними та твердоподібними рідинами?
7. У чому полягає відмінність між ньютонівською та нелінійною в'язкою рідиною?
8. Які властивості мають в'язкопластичні рідини?
9. Як можна визначити поняття зернистого (дисперсного) матеріалу?
10. Дайте класифікацію зернистих матеріалів.
11. Дайте класифікацію властивостей зернистих матеріалів.
12. Дайте класифікацію геометричних властивостей зернистих матеріалів.
13. У чому полягає та як визначається гранулометричний склад зернистого матеріалу?
14. Які є основні типи упаковки сферичних елементів?
15. Якими параметрами характеризується зміна об'єму зернистого матеріалу?
16. Дайте класифікацію та способи визначення густини зернистих матеріалів.
17. У чому полягає відмінність між зв'язними та фрикційними властивостями зернистих матеріалів?
18. У чому полягає відмінність між аутогезією та адгезією зернистих матеріалів?
19. Як проявляється злежуваність зернистих матеріалів?
20. Якими параметрами характеризуються фрикційні властивості зернистих матеріалів?
21. У чому полягає відмінність між кутом природного укоосу та кутом обрушення зернистого матеріалу?
22. У який спосіб визначаються кути природного укоосу та

кути обрушення зернистих матеріалів?

23. Як можна визначити кути природного укосу та кути обрушення зернистих матеріалів методом обертової камери?

24. На яких припущеннях базується жорстко-пластична модель зернистих матеріалів?

25. Дайте визначення закону Кулона для незв'язного та зв'язного зернистого матеріалу.

26. У чому полягає зв'язок між коефіцієнтом та кутом тертя зернистого матеріалу?

27. У чому полягає відмінність між кутом природного укосу та кутом обрушення зернистого матеріалу?

28. У чому полягає відмінність між внутрішнім та зовнішнім тертям зернистого матеріалу?

29. У який спосіб визначаються коефіцієнти внутрішнього та зовнішнього тертя зернистого матеріалу?

30. У чому полягає зв'язок між значеннями кутів внутрішнього і зовнішнього тертя, з одного боку, та кутів природного укосу і обрушення, з іншого, для незв'язних зернистих матеріалів?

31. Яким параметром характеризується текучість зернистого матеріалу?

32. У чому полягає та як визначається вологість зернистого матеріалу?

Список літератури

1. Jaeger H. M., Nagel S. R., Behringer R. P. Granular solids, liquids, and gases. *Reviews of modern physics*. 1996. Vol. 68(4). No 1259. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.68.1259>
2. Forterre Y., Pouliquen O. Flows of dense granular media. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2008. Vol. 40. P. 1-24. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102142>
3. Forterre Y., Pouliquen O. Granular flows. *In Glasses and Grains: Poincaré Seminar 2009 (pp. 77-109)*. 2011, April. Basel: Springer Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0084-6_4
4. Теорія обертових машин : підруч. / Сівко В. Й., Науменко Ю. В., Кузьмінець М. П., Дейнека К. Ю. Київ, Рівне : НУВГП, 2015. 527 с. <http://ep3.nuwm.edu.ua/4034/1/V20.pdf>
5. Науменко Ю. В., Дейнека К. Ю., Теоретичні основи робочих процесів машин барабанного типу : монографія. Рівне : НУВГП, 2014. 531 с.
6. Науменко Ю. В. Основи теорії робочих процесів барабанних млинів : монографія. Рівне : НУВГП, 2014. 336 с.
7. Науменко Ю. В. Основи теорії режимів роботи барабанних млинів : монографія. Рівне: Видавництво СПД Зелент О. І., 2009. 282 с.
8. Науменко Ю. В. Рекомендації до розрахунку, проектування та експлуатації барабанних млинів багатостадійного подрібнення. Рівне : Видавництво СПД Зелент О. І., 2009. 88 с.
9. Методичні рекомендації до вивчення розділу «Властивості робочих середовищ барабанних машин» навчальної дисципліни «Робочі процеси машин барабанного типу» (02-01-404) [Електронне видання] / Науменко Ю. В. Рівне : НУВГП, 2017. 95 с. <https://ep3.nuwm.edu.ua/6554/1/02-01-404.pdf>
10. Розрахунковий практикум з навчальної дисципліни «Робочі процеси машин барабанного типу» (02-01-544М) [Електронне видання] / Науменко Ю. В. Рівне : НУВГП, 2023. 49 с. <https://ep3.nuwm.edu.ua/28053/1/02-01-544M.pdf>
11. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни «Робочі процеси машин барабанного типу» (02-01-396)

[Електронне видання] / Науменко Ю. В. Рівне : НУВГП, 2017. 128 с. <http://ep3.nuwm.edu.ua/6552/1/02-01-396.pdf>

12. Розрахунковий практикум з навчальної дисципліни «Робочі процеси машин барабанного типу» (02-01-397) [Електронне видання] / Науменко Ю. В. Рівне : НУВГП, 2017. 130 с. <http://ep3.nuwm.edu.ua/6608/1/02-01-397.pdf>

13. Goldhirsch I. Introduction to granular temperature. *Powder Technology*. 2008. Vol. 182(2). P. 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.12.002>

14. Ogawa S. Multitemperature theory of granular materials. *Proc. of the US-Japan Seminar on Continuum Mechanical and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials*. 1978. P. 208-217. Gakajutsu Bunken Fukyu-Kai.

15. Ogawa S., Umemura A. Oshima N. On the equations of fully fluidized granular materials. *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)*. 1980. Vol. 31. P. 483-493. <https://doi.org/10.1007/BF01590859>

16. Goldhirsch I. Granular gases: probing the boundaries of hydrodynamics. In *Granular gases* (pp. 79-99). 2001. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

17. Goldhirsch I. Rapid granular flows. *Annual review of fluid mechanics*. 2003. Vol. 35(1). P. 267-293. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161114>

18. Khain E., Meerson B. Shear-induced crystallization of a dense rapid granular flow: hydrodynamics beyond the melting point. *Physical Review E*. 2006. Vol. 73(6). No 061301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.061301>

19. Khain E. Hydrodynamics of fluid-solid coexistence in dense shear granular flow. *Physical Review E*. 2007. Vol. 75(5). No 051310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.051310>

20. Kumaran V. The constitutive relation for the granular flow of rough particles, and its application to the flow down an inclined plane. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006. Vol. 561. P. 1-42. <https://doi.org/10.1017/S0022112006000279>

21. Li S., Yao Q., Chen B., Zhang X., Ding Y. L. Molecular dynamics simulation and continuum modelling of granular surface flow in rotating drums. *Chinese Science Bulletin*. 2007. Vol. 52(5). P.

692-700. <https://doi.org/10.1007/s11434-007-0069-4>

22. Yang, S., Sun, Y., Zhang, L., Chew, J. W. (2017). Segregation dynamics of a binary-size mixture in a three-dimensional rotating drum. *Chemical Engineering Science*, 172, 652-666. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.07.019>

23. Chou H. T., Lee C. F. Cross-sectional and axial flow characteristics of dry granular material in rotating drums. *Granular Matter*. 2009. Vol. 11. P. 13-32. <https://doi.org/10.1007/s10035-008-0118-y>

24. Yang H., Zhu Y., Li R., Sun Q. Kinetic granular temperature and its measurement using speckle visibility spectroscopy. *Particuology*. 2020. Vol. 48. P. 160-169. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.07.011>

25. Dolgunin V. N., Ivanov O. O., Akopyan S. A. Quasithermal effects during rapid gravity flow of a granular medium. *Advanced Materials and Technologies*. 2020. Vol. 3(19). P. 47-55. <https://doi.org/10.17277/amt.2020.03.pp.047-055>

Додаток
ГРАВІТАЦІЙНІ ТЕЧІЇ
ЗЕРНИСТИХ (ДИСПЕРСНИХ) МАТЕРІАЛІВ

Обсяги використання твердих матеріалів у гранульованому та порошкоподібному стані зростануть рік у рік. Це пояснюється тим, що процеси переробки матеріалів у дисперсному стані різко інтенсифікуються. При цьому необхідне за технологією переміщення зернистих матеріалів у процесах їх переробки, а також при транспортуванні та зберіганні може здійснюватися під дією різних сил: гравітаційних, сил тиску повітряного або рідинного потоків, механічних впливів тощо. Гравітаційні течії зернистих матеріалів у процесах їх технологічної переробки є найпоширенішими.

Гравітаційні течії в природних явищах
та технологічних процесах

Гравітаційні течії зернистих матеріалів – це переміщення частинок під дією сил тяжіння по будь-якому схилу. Гравітаційні течії зернистих матеріалів поширені як у природних явищах, так у численних технологічних процесах.

У природі такі течії зернистих матеріалів спостерігаються у випадках потокового їх стікання вниз по схилу. При цьому кут нахилу схилу або дуже близький до кута сухого тертя, або вище за нього. Одним із прикладів гравітаційного руху сипких середовищ у природі може служити рух піску в режимі обвалення по крутому схилу дюн. Для такого руху характерне переміщення частинок піску стосовно сусіднім, тобто рух є зсувним.

Один із перших дослідників закономірностей швидкої гравітаційної течії Бегнолд спостерігав рух гравію, що має приблизно рівний розмір частинок, вздовж схилу полонини. Кут нахилу при цьому не перевищував кількох градусів.

У природних явищах гравітаційні течії зернистих середовищ протікають, як правило, в режимі обвалення, за активної взаємодії частинок. Рух зернистих середовищ при цьому залежить від сукупності фізико-механічних властивостей частинок, фракційного складу середовища, а також умов, при

яких відбувається обвалення, наприклад, від об'єму, кута та висоти обвалення.

Після обвалення більшість природних матеріалів різної дисперсності утворюють відкоси, які незалежно від їхньої довжини мають увігнуту поверхню. При обваленні відбувається розділення частинок середовища за обсягом, тобто зернисте середовище ділиться на фракції. Як правило, фракції, що утворюються, істотно різняться за рівнем зв'язності частинок, що впливає плинність середовища, і характеризуються різними кутами природного укосу. В результаті взаємодії фракцій при їх русі по укосу біля його основи займає місце фракція, що здатна до утворення більш пологих укосів.

У багатьох випадках гравітаційна течія зернистих середовищ у режимі обвалення суттєво впливає на розвиток природних явищ. Одним із таких прикладів є рух пісків барханів та дюн, швидкість поширення яких сягає кількох сотень метрів на рік. Піски переміщуються в напрямку троянди вітрів з утворенням гребнів, висота яких досягає 200 м. По навтряній поверхні, відносно пологої сторони вітер накидає пісок до вершини гребня, який виростає до деякого критичного значення, після чого відбувається його обвалення. Обвалення супроводжується утворенням відносно крутого укосу, що має увігнуту форму з підвітряної сторони гребня.

У різних галузях промисловості перспективним методом переробки дисперсних матеріалів є використання їх гравітаційного тонкошарового руху та розрідженого стану. Основна перевага таких рухів полягає в тому, що перебіг тепломасообмінних та гідромеханічних процесів у розріджених потоках зернистих матеріалів і тонких шарах відбувається з найбільш розвинутою поверхнею контакту фаз.

У багатьох випадках для прояву специфічних особливостей руху сипких матеріалів у переробних машинах або допоміжному обладнанні першорядне значення має механізм генерування напруження. До таких специфічних випадків відносяться, наприклад, потоки гранульованого матеріалу в силосах і хімічних реакторах, зсувні потоки середовищ під час роботи землерийних машин (орання, засипка, вирівнювання ґрунту) та інші течії.

У процесі переробки сипучого матеріалу в технологічному обладнанні година, що рухаються, можуть бути в різному стані. У зв'язку з цим при аналізі руху сипких матеріалів виділяють три режими: зв'язний, перехідний і незв'язний. Межа між зв'язними і незв'язними потоками характеризують кутом внутрішнього тертя. Відповідно до зазначених режимів всі сипучі матеріали можна умовно розділити на три групи: незв'язні, зв'язнатекучі та зв'язні. Зв'язний стан характеризується наявністю стійких зав'язків між частинками сипучого середовища під час процесу його переробки. Такий стан можна спостерігати при пресуванні порошків, впровадженні твердих тіл у ґрунти, а також під час руху в бункерах. Для опису зв'язного стану зернистих матеріалів в даний час використовують, в основному, моделі механіки ґрунтів, зі залученням умови граничної рівноваги у всьому обсязі сипучого середовища. Однак дана умова задовільно виконується лише при русі матеріалу на стінки бункера. Модель суцільного пластично деформованого середовища не повною мірою відображає дійсний механізм деформації зернистого середовища. Результати експериментальних досліджень свідчать, що деформації в шарі відбуваються у вигляді переривчастих зсувних агрегатів частинок, кожен з яких у період свого існування відіграє роль структурного елемента. Однак, моделі зв'язкового стану неможливо застосовувати для опису потоків сипких матеріалів з високою порозністю.

Часто для опису поведінки зв'язних матеріалів використовується гідромеханічна модель, у якій зернисте середовище розглядається з позицій механіки суцільного середовища. Методи механіки суцільного середовища характеризуються низкою понять, що однозначно визначають рух суцільного середовища: поля швидкостей, тисків, температур, густин тощо. При цьому одним із методів дослідження поведінки матеріальних середовищ є статистичний метод, в якому застосовується ймовірнісний підхід і вводяться середні за великою кількістю частинок характеристики. Статистичні методи завжди пов'язані з введенням додаткових гіпотез про взаємодію частинок і спрямовані на їхнє суттєве спрощення.

Ще одним методом підходу до дослідження руху матеріальних тіл є побудова феноменологічної макроскопічної моделі, заснованої на загальних гіпотезах та емпіричних закономірностях. Основною гіпотезою в цьому підході є гіпотеза суцільності, згідно якої всі тіла складаються з окремих частинок, але їх багато в будь-якому суттєвому обсязі, тому тіло можна наближено розглядати як середовище, що заповнює простір суцільним чином. Головним недоліком даного підходу є неможливість аналізу руху окремих частинок у потоці зернистого середовища.

Незв'язний стан характеризується короткочасними контактами частинок, швидким порушенням зв'язків між ними, наявністю інтенсивного переміщення відносно один одного. Такий режим спостерігається в системах пневмотранспорту, швидкої зсувної течії, а також у стані розвиненого псевдозрідженого шару.

У деяких випадках поведінка сипких матеріалів при їх переробці є проміжною між пружно-пластичним (зв'язним) та рідкотекучим. Такий стан сипких матеріалів спостерігається в режимах його псевдозрідження або пневмотранспорту, а також при русі досить тонких шарів сипких матеріалів із вільною поверхнею по робочих органах змішувального та іншого обладнання. При цьому, як правило, має місце градієнтний (зсувний) рух зернистих матеріалів.

Гравітаційні течії незв'язних гранульованих матеріалів широко застосовуються в гірничопереробних виробництвах, різних галузях хімічної та фармацевтичної промисловості. Найбільш поширеним, і можливо найбільш раннім, прикладом застосування гравітаційної течії гранульованого матеріалу є пісочний годинник.

Такого роду течії мають місце в бункерах, воронках, лотках, каналах, конвеєрах та змішувачах, а також при русі зерна в елеваторах, рудних матеріалів у рудоспусках, твердого зернистого палива в тепловидільних елементах деяких конструкцій ядерних реакторів та багатьох інших випадках реалізації технологічних процесів, що супроводжуються взаємним переміщенням частинок сипучих матеріалів. Все це

свідчить про широке поширення гравітаційних течій дисперсних середовищ у технологічних процесах. У зв'язку з широким технологічним застосуванням гравітаційних течій зернистих матеріалів надзвичайно корисними є результати дослідження особливостей таких течій. Вивчення динаміки поведінки зернистого матеріалу дуже важливе при вирішенні широкого кола проблем, пов'язаних з питаннями транспортування (наприклад, суспензій) та руху таких матеріалів як ґрунти, піски, гранули та порошки.

Однак, механіка швидких гравітаційних течій гранульованих матеріалів або сипких твердих частинок досі ще погано вивчена. Незважаючи на широке застосування такого роду течій у різних галузях промисловості, прогнозування їх закономірностей до теперішнього часу представляє серйозну проблему, вирішення якої передбачає проведення великих фундаментальних досліджень. Глибоке розуміння механіки гравітаційних течій зернистих середовищ є особливо корисно, наприклад, при конструюванні та експлуатації такого обладнання для зберігання та переміщення матеріалу як бункери, воронки, лотки, канали, конвеєри та змішувачі.

Експериментальні дослідження гравітаційних течій зернистих матеріалів орієнтовані, як правило, на два напрямки:

- 1) у прикладанні до певних технологічних застосувань;
- 2) глибшого розуміння механіки течії.

Так, наприклад, гравітаційний рух твердих гранульованих частинок при їх течії з бункерів цікавить дослідників з таких причин:

- 1) вплив геометрії бункера на форму і розміри застійних зон при перебігу, що встановився, зернистого середовища;
- 2) вплив геометрії бункера, тертя на стінці та середнього розміру частинок на формується поле течії;
- 3) дослідження профілю швидкості руху гранульованого матеріалу з метою визначення оптимальних режимів його витікання з бункера;
- 4) необхідність створення різних методів прогнозування напружень на стінках.

Крім того, важливе значення має застосування накопичених знань про поведінку зернистих середовищ при гравітаційній течії для прогнозування стихійних природних явищ, таких як каменепади, селі, снігові лавини та оползні.

Режими гравітаційної течії.

Швидкі гравітаційні течії та його технологічні аспекти

У механіці сипучих середовищ відомо два ідеалізовані режими течії сипучих матеріалів: швидка зсувна течія та «повільний» зсув.

Для режиму повільної або пластичної течії характерно те, що частинки середовища рухаються за деякими певними траєкторіями, перебуваючи в тривалому контакті один з одним, що відбувається ще в режимі ковзання, або перекочування. При цьому внутрішні напруження в зернистому середовищі багато у чому підпорядковуються закону сухого кулонівського тертя. У зв'язку з цим при помірних швидкостях зсуву напруження лише малою мірою залежить від швидкості зсуву.

У статичному випадку щільної упаковки, що характеризується постійним взаємним контактом гранул, частинки поведуться подібно до деформованого твердого тіла. Однак, Рейнольдс встановив, що прикладені зсувні напруження викликають тенденцію до збільшення об'єму шару матеріалу. Якщо це збільшення об'єму обмежено нормальними стискаючими напруженнями, то відношення дотичного і нормального напружень приблизно дорівнює одиниці.

У другому режимі, що називається режимом швидкого руху, течія зернистих середовищ характеризується великими відносними швидкостями частинок, розділених поверхнею зсуву. При цьому швидкості зсуву досягають великих величин (більше 10 c^{-1}) і частинки середовища рухаються хаотично, по- подібно молекулам у щільному газі або в рідині. Внутрішнє напруження в зернистому середовищі виникає внаслідок перенесення імпульсу аналогічно тому, як це відбувається в рідині та газі. Такий механізм виникнення напружень призводить до суттєвої залежності їх від швидкості зсуву. Виявляється, що поведінка матеріалу при швидкій течії схожа на поведінку в'язкої рідини в

аналогічних умовах. У зв'язку з цим поведінка гранульованого матеріалу в режимі швидкого руху принципово відрізняється від поведінки при пластичному течії.

Отримані результати дослідження цих течій свідчать про те, що при швидких течіях сухих гранульованих середовищ виникають «в'язкі» ефекти. Це пояснюється тим, що при «макрорусі» зсувного потоку в поздовжньому напрямку виникають переміщення частинок у поперечному напрямку, які передають з шару в шар додаткові кількості руху і тим самим викликають появу додаткових «в'язких» дотичних напружень, пов'язаних складною залежністю зі швидкістю зсуву та порозністю середовища. Переконливої ілюстрації цієї сказаного є результати дослідження, опубліковані Севіджем (рис. 1).

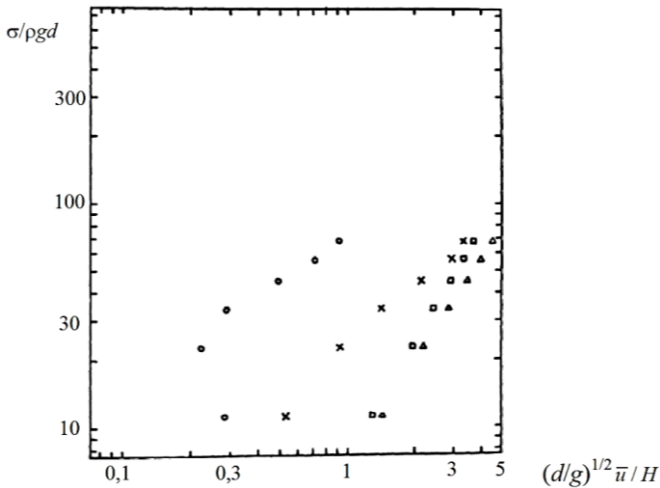


Рис. 1. Залежність безрозмірного напруження від безрозмірної швидкості зсуву:

○ – $v = 0,542$; □ – $v = 0,524$; Δ – $v = 0,512$; × – $v = 0,498$

Севідж встановив, що зсувні та нормальні напруження суттєво залежать від концентрації твердої фази (порозності) та швидкості зсуву. Причому отримані залежності мають загальну тенденцію: при низьких концентраціях напруження змінюється пропорційно квадрату швидкості зсуву, а при вищих концентраціях ступінь впливу швидкості зсуву зменшується.

Швидкі гравітаційні течії відносяться до класу швидких зсувних течій, що є найбільш загальною формою руху зернистих середовищ і супроводжуються інтенсивною взаємодією частинок.

Сформований на основі багатьох робіт самостійний науковий напрямок отримав назву «Теорія швидких рухів гранульованих середовищ». Ця теорія істотно відрізняється від класичної механіки сипучих середовищ.

Експериментальні дослідження показують, що багато процесів, у тому числі процес сегрегації, найбільш активно протікають у режимі швидких зсувних течій зернистих середовищ. Для нього характерно активна взаємодія частинок, яку необхідно враховувати при розрахунку та проектуванні змішувачів, грануляторів та іншого обладнання для обробки зернистих матеріалів. Швидкі гравітаційні течії можна розглядати як одну з найбільш загальних форм руху зернистих середовищ.

Швидкі гравітаційні течії часто називають інерційними течіями зернистих матеріалів, оскільки швидкість руху частинок за таких умов визначається їх інерційними властивостями і змінюється при їх зіткненні. При досягненні досить високих швидкостей зсуву контакти частинок дисперсного середовища стають короткочасними та близькими до точкових. Внаслідок такої взаємодії частинок при швидкому зсуві зернистого середовища напруження генеруються переважно за рахунок передачі ударних імпульсів і поперечного масопереносу, викликаного зустрічним переміщенням мас, що рухаються через поверхню зсуву. У режимі розвиненої швидкої гравітаційної течії незв'язних нееластичних сферичних частинок напруження є пропорційними квадрату швидкості зсуву, що пояснюється одночасним, пропорційним зростанням величини ударних імпульсів та їх числа в одиницю часу зі збільшенням швидкості зсуву. У подібних потоках частинки крім поступальної швидкості руху в напрямку зсуву набувають розподілену в просторі компоненту швидкості хаотичних переміщень (швидкості флуктуації), модуль якої має той самий порядок, як і модуль відносної швидкості поступального переміщення частинок.

Усталені швидкі гравітаційні течії існують при кутах скочування, близьких куту природного укосу матеріалу. Найчастіше практично режим швидкої течії здійснюється при гравітаційному русі гранульованого матеріалу в похилих жолобах і каналах, обертових барабанах та трубах.

Параметри гравітаційної течії зернистих середовищ суттєво залежить від кута нахилу скату. Ішида залежно від кута нахилу скату спостерігав три види течії гранул:

- 1) нерозвинене ковзне;
- 2) ковзне;
- 3) що розплескується.

Нерозвинена ковзна течія спостерігається при кутах нахилу скату дещо менших або близьких за кут природного укосу матеріалу. При цьому може існувати стаціонарний шар верхньої частині підкладки, товстіший вгорі потоку, ніж внизу. Ефективна поверхня підкладки утворюється усередині самого матеріалу. Швидкості частинок поблизу основи є низькими, а профіль швидкості має увігнуту форму.

Ковзна течія має місце при невеликому збільшенні кута нахилу скату щодо кута спокою матеріалу. Для нього характерним збільшення швидкості матеріалу; всі частинки знаходяться в русі; зникає область застійної течії. Профіль швидкості частинок набуває трикутної форми.

Подальше збільшення кута нахилу скату супроводжується більш високою швидкістю зсуву навколо основи потоку порівняно з поверхнею. Профіль швидкості частинок по глибині потоку стає більш гладким. Рух частинок характеризується активним викиданням окремих частинок, внаслідок чого верхня частина потоку складається з «хмари» частинок трохи меншої щільності, ніж у основна частина потоку. Рух частинок, що викидаються, і частинок у верхніх шарах потоку визначається взаємодією з повітрям, яке гальмує вплив і обмежує швидкості частинок. Такий вид течії зернистого матеріалу називається течією, що розплескується.

Однак, необхідно зазначити, що закономірності, що спостерігаються, характерні для гравітаційних потоків

незв'язних зернистих матеріалів із досить великою висотою шару.

Швидкі гравітаційні течії як об'єкт дослідження

Швидкі гравітаційні течії зернистих середовищ займають особливе місце в технологічних процесах, що відбуваються за участю зернистих матеріалів. Це пов'язано не тільки з широким поширенням такого виду течій, викликаних природними причинами, але й з активною взаємодією частинок середовища при швидкому зсуві. Ця взаємодія є причиною інтенсивного перебігу процесів перенесення в швидких гравітаційних потоках зернистих матеріалів, внаслідок чого підвищується ефективність відповідних технологічних процесів. У зв'язку з цим цілком правомірним є інтерес до дослідження та теоретичного прогнозування структурних та кінематичних характеристик швидких гравітаційних течій зернистих матеріалів. Вивченню закономірностей швидких зсувних гравітаційних течій присвячений спеціальний розділ неklasичної механіки сипучих середовищ.

При дослідженні такого роду течій виникають значні труднощі. Гравітаційні потоки сипких матеріалів, що рухаються по похилій площині, незважаючи на їх зовнішню простоту надзвичайно складні для експериментального вивчення. Основні експериментальні труднощі виникають внаслідок високої чутливості гравітаційних потоків внутрішнього зондування і наявності граничних ефектів, що перешкоджають використанню візуальних методів дослідження.

Висока чутливість гравітаційних течій зернистих матеріалів до різноманітних зовнішніх впливам пояснюється значними порушеннями в надзвичайно складному характері взаємодій частинок, що рухаються внаслідок прояву локальних граничних ефектів. Поведінку матеріалів при їх гравітаційній течії можна порівняти з поведінкою в'язкої рідини аналогічних умов. Причому подібна поведінка сипких матеріалів принципово відрізняється від передбачень теорій, заснованих на класичних підходах Кулона, що обумовлено складною залежністю зсувних напружень від концентрації твердої фази і швидкості зсуву.

Труднощі експериментальних та аналітичних досліджень швидких гравітаційних течій обумовлені, крім перерахованих вище, численними чинниками. Так, наприклад, для швидких гравітаційних течій гранульованих середовищ характерно виникнення різноманітних «в'язких» ефектів, що ускладнюють характер течії гранул. Це пояснюється тим, що при швидкій зсувній гравітаційній течії, крім поздовжнього, має місце також переміщення частинок у поперечному напрямі. Такі частинки передають з шару в шар додаткові кількості руху і тим самим викликають появу додаткових «в'язких» дотичних напружень. Крім цього, поперечна неоднорідність тиску призводить до неоднорідного розподілу концентрації твердої фази по висоті гравітаційного потоку.

Відповідно до теорії швидких гравітаційних течій частинки елементарного шару внаслідок зіткнень з навколишніми частинками набувають коливальних рухів. Кожна частка переміщується зі швидкістю, що визначається швидкістю зсуву, і має, крім того, складову швидкість коливального руху.

Реальні частинки мають суттєву шорсткість. Внаслідок цього в стиснених умовах при зіткненнях частинок виникають значні сили тертя. В результаті дії сил тертя напрям контактних сил відрізняється від напрямку нормалі до поверхні в точках контакту. Очевидно, що в залежності від умов контакту частинок при зсуві змінюється внесок ефектів тертя у формування зсувного напруження, внаслідок чого суттєво ускладнюється прогнозування останнього.

Розробці адекватного аналітичного опису закономірностей швидких гравітаційних течій перешкоджає брак знань про механізми генерування напружень, що є складною функцією порозності та швидкості зсуву. Особливу проблему для процесу аналітичного опису швидких гравітаційних течій на шорсткому схилі представляє формулювання граничних умов, які суттєво впливають на характеристики потоку. Крім того, для швидких гравітаційних течій гранульованих середовищ характерна висока неоднорідність швидкості зсуву і концентрації твердої фази, особливо при невеликій товщині шару. Все це разом ускладнює

проблему експериментального та аналітичного дослідження швидких гравітаційних течій зернистих середовищ.

Очевидно у зв'язку з цим дотепер не створено достатньо адекватних математичних моделей швидких зсувних гравітаційних течій незважаючи на значну їхню загальну кількість.