



**Міністерство освіти і науки України**  
**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ**  
**УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет мехатроніки та інжинірингу

Кафедра обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**  
**СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ**

Методичні вказівки  
до виконання практичного заняття:  
з дисципліни: «Технологічне обладнання підприємств  
зберігання та переробки зерна»

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
денної та заочної форм навчання за спеціальністю  
181 Харчові технології

Харків  
2024

**Міністерство освіти і науки України**

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет мехатроніки та інжинірингу

Кафедра обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ**

Методичні вказівки  
до виконання практичного заняття:  
з дисципліни: «Технологічне обладнання підприємств  
зберігання та переробки зерна»

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
денної та заочної форм навчання за спеціальністю  
181 Харчові технології

Затверджено  
рішенням Науково-методичної комісії  
факультету мехатроніки та інжинірингу  
Протокол № 2 від 27.12.2023 р.

Харків  
ДБТУ  
2024

УДК 664-492-026.766(072)

Д 74

Схвалено  
на засіданні кафедри обладнання та інжинірингу  
переробних і харчових виробництв  
Протокол № 6 від 23 листопада 2023 р.

Рецензенти:

**В.О. Потапов**, професор кафедри інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування Державного біотехнологічного університету, д-р техн. наук, професор;

**А.Л. Фоцан**, професор кафедри харчових технологій в ресторанній індустрії Державного біотехнологічного університету, д-р техн. наук, доцент.

Д 74            Дослідження основних властивостей сипких матеріалів [Електронне видання]: Методичні вказівки до виконання практичного заняття з дисципліни: «Технологічне обладнання підприємств зберігання та переробки зерна» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 181 Харчові технології / улад. П.В. Гурський, С.Г. Іващенко, Маяк О.А. – Електрон. дані. – Х. : ДБТУ, 2024. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана.

Методичні вказівки призначені для набуття практичних навичок при виконанні практичної роботи з навчальної дисципліни «Технологічне обладнання підприємств зберігання та переробки зерна». Методичні вказівки розраховані для використання в навчальному процесі ДБТУ, а також в інших закладах вищої освіти за умов адаптації під конкретний навчальний план.

Матеріал може бути корисним для широкого кола фахівців, які займаються питаннями зберігання та переробки зерна.

УДК 664-492-026.766(072)

**Відповідальний за випуск: О.В. Богомолв**, завідувач кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв, д-р техн. наук, професор

© Гурський П.В., Іващенко С.Г., Маяк О.А.  
2023

© Державний біотехнологічний університет,  
2023

# ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1

**Тема:** Дослідження основних властивостей сипких матеріалів.

**Мета:** Вивчення й експериментальне визначення основних властивостей сипких матеріалів.

## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

### Класифікація сипких матеріалів

Сипкі матеріали (насипні вантажі) класифікуються в такий спосіб:

- по гранулометричному складу;
- по об'ємній масі;
- по сипкості;
- по вологості.

По співвідношенню між розмірами часток сипкі матеріали підрозділяють на дві категорії:

- рядові;
- сортовані.

До рядових матеріалів відносяться такі, у яких розмір найбільшої частки перевищує розмір найменшої частки більш ніж в 2,5 рази.

Якщо співвідношення вищевказаних розмірів рівно або менше 2,5, то матеріали належать до категорії сортованих.

По крупності часток сипкі матеріали класифікуються в такий спосіб:

- особливо крупношматкові (розмір типової частки  $a' > 400$  мм);
- крупношматкові ( $160 < a' \leq 400$  мм);
- середньошматкові ( $60 < a' \leq 160$  мм);
- дрібношматкові ( $10 < a' \leq 60$  мм);
- грубозернисті ( $2 < a' \leq 10$  мм);
- дрібнозернисті ( $0,5 < a' \leq 2$  мм);
- порошкоподібні ( $0,05 < a' \leq 0,5$  мм);
- пилоподібні ( $a' \leq 0,05$  мм).

Зернисті (грубозернисті й дрібнозернисті), порошкоподібні й пилоподібні матеріали називаються

дрібнофракційних.

По об'ємній масі  $j_m$  сипкі матеріали класифікуються в такий спосіб:

- легкі ( $j_m < 600$  кг/м<sup>3</sup>);
- середні ( $600 < j_m \leq 1100$  кг/м<sup>3</sup>);
- важкі ( $1100 < j_m \leq 2000$  кг/м<sup>3</sup>);
- досить важкі ( $j_m > 2000$  кг/м<sup>3</sup>).

По властивості сипкості матеріали підрозділяють на дві групи:

- добре сипкі;
- погано сипкі (або зв'язані).

Зв'язані матеріали, тобто внутрішні зв'язки, що мають, між частками, утворюють вертикальний укіс обмеженої висоти.

Добре сипкі матеріали вертикального укусу не утворюють.

По ступеню зволоження сипкі матеріали класифікуються в такий спосіб:

- вологі (мокрі, сирі);
- природньої вологості (повітряно-сухі);
- сухі.

### **Основні властивості сипких матеріалів**

Гранулометричний склад (шматкуватість) сипких матеріалів характеризує кількісний розподіл часток по крупності.

Крупність визначається найбільшими лінійними розмірами часток матеріалу (рис. 1). Для визначення гранулометричного складу з маси сипкого матеріалу необхідно взяти пробу в різних частинах насипу; для того, щоб склад проби відповідав усередненому складу матеріалу, зачерпнуті порції необхідно перемішати й скоротити до необхідного обсягу проби.

Порції матеріалу необхідно брати (вичерпувати) із дна ямок (глибиною 0,5 м), отриманих на вільній поверхні насипу сипкого матеріалу й розташованих із кроком, рівним 2 м, по

всій поверхні штабеля уздовж і поперек його. Маса порцій, що вичерпуються, залежить від крупності часток матеріалу й росте зі збільшенням крупності:

- для дрібнофракційних матеріалів маса проби рівна 1 кг;
- для дрібношматкових – 2 кг;
- для середньошматкових – 3...4 кг;
- для крупношматкових – 5 кг.

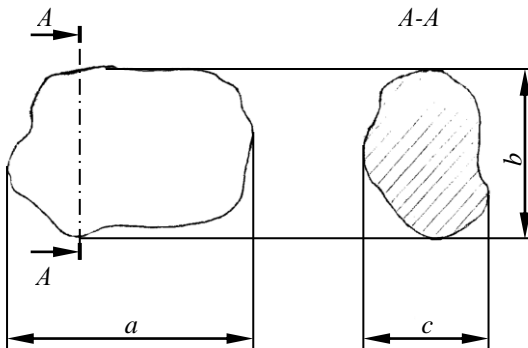


Рис. 1. Розміри частки сипкого матеріалу

Також по розміру порції необхідно брати з потоку, що рухається матеріалу, причому вхідний отвір прийомної посудини повинне повністю охоплювати поперечний переріз потоку.

Відібрані порції сипкого матеріалу необхідно перемішати способом кільцювання (спосіб названий так тому, що спочатку всі порції укладають насипом у вигляді широкого кільця на горизонтальний поміст; потім порції матеріалу переміщують у центр кільця, утворюючи загальний насип конусоподібної форми (при великому обсязі порцій вищенаведена операція може виконуватися одноковшеvim навантажувачем). Матеріал з утвореного насипу конусоподібної форми знову розсовують і формують у вигляді первинного кільця. Процес повторюється не менше трьох (!) раз.

Скорочують пробу квартуванням або вичерпуванням.

При квартуванні утворений насип конусоподібної форми ділять за допомогою дільника на чотири сектори: два

протилежні сектори видаляють, а два, що залишилися з'єднують у насип конусоподібної форми. Процес триває доти, поки не буде досягнутий необхідний обсяг проби.

Спосіб вичерпування застосовується при взятті проби дрібнофракційних матеріалів і полягає в наступному: відібрану пробу розподіляють рівним шаром по горизонтальному настилу й за допомогою ділильної рейки на поверхню шару наносять квадратну сітку, з кожного квадрата беруть невелику порцію матеріалу по всій товщині шару; із цих порцій і складається проба (якщо обсяг проби недостатньо великий, то процес вичерпування повторюють).

Гранулометричний склад узяті проби визначається методом просівання сипкого матеріалу через ряд сит з отворами, що поступово збільшуються. Частина проби, що пройшла через сито, називається виходом знизу; а частина проби, що залишилася на ситі, - виходом зверху. За даними ситового аналізу необхідно побудувати графік, що характеризує склад сипкого матеріалу по крупності часток.

На рис. 2 у вигляді суцільної лінії показана крива гранулометричного складу сипкого матеріалу з розмірами:

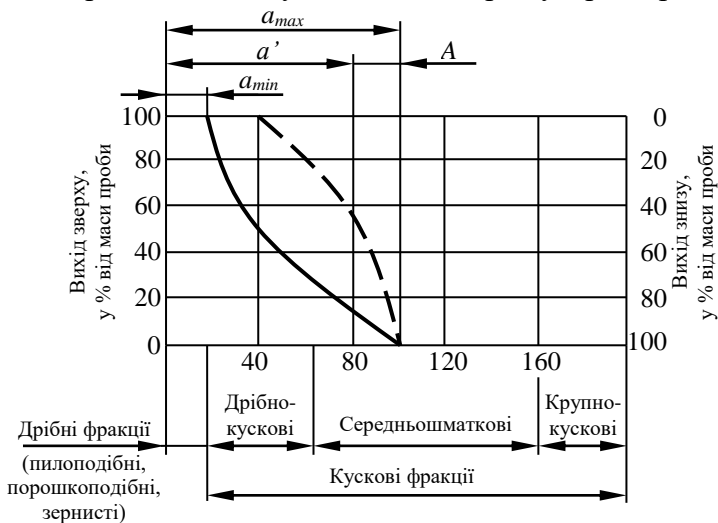


Рис. 2. Графік гранулометричного складу:

- - крива гранулометричного складу сипкого матеріалу;
- - - - крива гранулометричного складу сортованого матеріалу.
- $a_{\max}$  - максимальних часток – 100 мм;
- $a_{\min}$  - мінімальних часток – 10 мм

На графіку гранулометричного складу буквою  $A$  позначена група найбільших часток, тобто частина проби із частками розмірами  $0,8a_{\max} \dots a_{\min}$ . Якщо маса часток цієї групи менше 10 % маси всієї проби матеріалу (а це має місце в розглянутому прикладі), то за розмір типових часток ( $a'$ , мм) із групи найбільших приймають:

$$a' = 0,8a_{\max}, \quad (1)$$

якщо ж маса групи найбільших часток рівна або більше 10 % маси проби, то за розмір типових часток ( $a'$ , мм) приймають:

$$a' = a_{\max}, \quad (2)$$

Крива, показана у вигляді штрихової лінії на графіку, характеризує гранулометричний склад сортованого матеріалу  $\left( \frac{a_{\max}}{a_{\min}} = \frac{100}{40} = 2,5 \right)$ .

Розмір середньої частки ( $a'c$ , мм) сортованого матеріалу визначається по формулі:

$$a'c = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{2}, \quad (3)$$

Об'ємною масою сипкого матеріалу називається маса речовини, що втримується в одиниці об'єму, який займає цей матеріал.

Розрізняють об'ємну масу при вільній насипці й об'ємну масу ущільненого сипкого матеріалу.

При вільній насипці об'ємну масу визначають за допомогою мірної посудини 1 (рис. 3) зі штирем 2, навколо якого може повертатися рамка 3. Висота мірної посудини ( $h$ ) повинна бути рівна двом його внутрішнім діаметрам ( $2d$ ), а висота рамки 3 ( $h_p$ ) – однієї третини висоти мірної посудини 1



$(\frac{h}{3})$ .

При визначенні об'ємної маси шматкових матеріалів діаметр мірної посудини ( $d$ ) повинен не менше ніж в 10 раз перевищувати розмір типових шматків матеріалу ( $d \geq 10a'$ ).

Поворотну рамку 3 необхідно встановити так, щоб її стінки були продовженням стінок мірної посудини 1; потім у мірну посудину 1 необхідно засипати матеріал до верху рамки 3; після цього рамку 3 необхідно повернути навколо штиря 2 (при цьому зрізується надлишок сипкого матеріалу); що залишився в мірній посудині 1 матеріал необхідно зважити на вагах ( $M_1$ , кг) і визначити об'ємну масу сипкого матеріалу при вільній насипці ( $j_m$ , кг/м<sup>3</sup>) по формулі:

$$j_m = \frac{M_1}{V_1}, \quad (4)$$

де  $M_1$  – маса матеріалу, що перебуває в посудині, кг;

$V_1$  – обсяг посудини, м<sup>3</sup>.

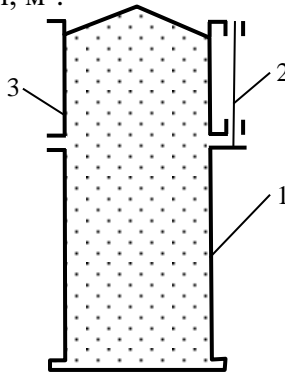



Рис. 3. Схема мірної посудини для визначення об'ємної маси сипкого матеріалу: 1 – мірна посудина; 2 – штир; 3 – рамка (що повертається);  - сипкий матеріал.

Для визначення об'ємної маси динамічно ущільненого сипкого матеріалу ( $j_{mu}$ ) необхідно мірну посудину, заповнену матеріалом до верху рамки, установити на вібраційний стіл.

При включенні вібраційного стола рівень засипаного матеріалу в рамці поступово знижується; у рамку необхідно додавати сипкий матеріал доти, поки зниження рівня матеріалу в рамці не припиниться; після чого вібраційний стіл необхідно відключити й поворотом рамки зрізати надлишок матеріалу.

Далі виконуються вищеописані операції (як і при визначенні об'ємної маси сипкого матеріалу при вільному засипанні).

Відношення об'ємної маси динамічно ущільненого матеріалу ( $j_{my}$ , кг/м<sup>3</sup>) до об'ємної маси при вільній насипці ( $j_m$ , кг/м<sup>3</sup>) називається коефіцієнтом ущільнення  $K_y$ :

$$K_y = \frac{j_{my}}{j_v}, \quad (5)$$

Щільністю сипкого матеріалу ( $\rho_m$ ) називається середня щільність (питома маса) його твердих часток.

Для визначення щільності твердих часток сипкого матеріалу необхідно зважити порцію сипкого матеріалу ( $M_{nm}$ , кг) і змішати її з певною кількістю рідини ( $V_{ж}$ , м<sup>3</sup>), що змочує, але не розчинює матеріал; визначивши обсяг отриманої суспензії ( $V_c$ , м<sup>3</sup>), необхідно визначити щільність твердих часток сипкого матеріалу ( $\rho_m$ , кг/м<sup>3</sup>) по формулі:

$$\rho_m = \frac{M_{nm}}{V_c - V_{ж}}, \quad (6)$$

де  $M_{nm}$  – маса порції сипкого матеріалу, кг;

$V_c$  – обсяг суспензії, отриманої в результаті змішування порції сипкого матеріалу з певною кількістю рідини, м<sup>3</sup>;

$V_{ж}$  – обсяг рідини, що змочує, але не розчинює сипкий матеріал, м<sup>3</sup>.

Сипкість матеріалів характеризується залежностями граничних дотичних напружень від тиску в товщі сипкого матеріалу.

Графік граничних дотичних напружень (наведений на

рис. 4) побудований за результатами випробувань сипких матеріалів на трибометрі, схема якого наведена на рис. 5.

Ринву 1 і рамку 2 необхідно заповнити сипким матеріалом; порцію матеріалу, що перебуває в рамці 2, необхідно пригорнути до матеріалу, який перебуває в ринві 1, за допомогою притискних пластин 3.

Рамку 2, що опирається катками 5 на напрямні 6, з'єднано з вантажною чашкою 4 шнуром 7, перекинутим через відхиляючий блок 8 на вантажну чашку 4 необхідно встановити гирі (наважки), у результаті чого рамка 2 почне рухатися й відбудеться зріз матеріалу.

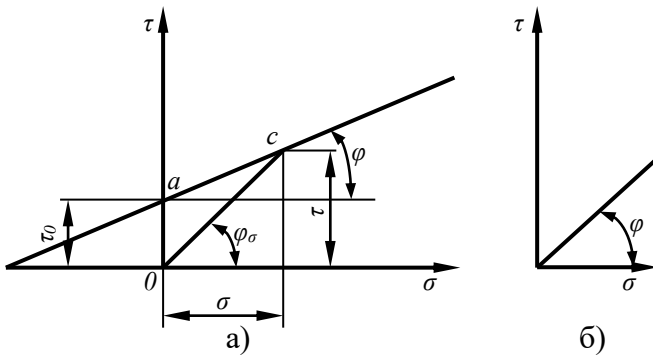


Рис. 4. Графік граничних дотичних напружень: а – для зв'язаних сипких матеріалів; б – для легко- і добре сипких матеріалів

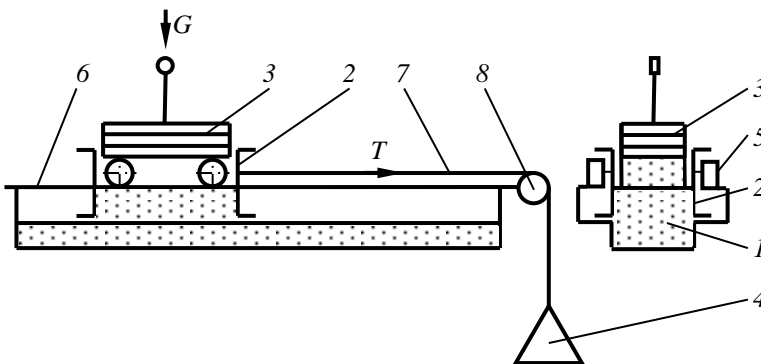


Рис. 5. Схема трибометра: 1 – ринва; 2 – рамка; 3 – притискна пластина; 4 – вантажна чашка; 5 – каток;

6 – напрямна пластина; 7 – шнур; 8 – блок; □- сипкий матеріал

Значення напруг  $\sigma$  (Па) і  $\tau$  (Па), що необхідні для побудови графіка граничних дотичних напружень (рис. 4), визначаються по формулах:

$$\sigma = \frac{G}{F}, \quad (7)$$

де  $G$  – сумарна вага притискних пластин і сипкого матеріалу, що перебуває в рухливій рамці, Н;

$F$  – площа зрізу, м<sup>2</sup>;

$$\tau = \frac{T - T_p}{F}, \quad (8)$$

де  $T$  – сила зрушення, Н;

$T_p$  – сила опору рухливої рамки, Н.

По отриманих експериментальних значеннях  $\sigma$  (Па) і  $\tau$  (Па) необхідно побудувати пряму граничних дотичних напруг ас (рис. 4, а), яка в загальному випадку перетинає вісь координат вище точки 0, що характеризує зв'язуваність матеріалу; відрізок  $Oa$  визначає величину початкового опору зрушенню ( $\tau_0$ , Па). У добре сипких матеріалів  $\tau_0 = 0$  (рис. 4, б).

Кут  $\varphi$  називається кутом внутрішнього тертя, а тангенс цього кута – коефіцієнтом внутрішнього тертя ( $f$ ):

$$tg\varphi = f, \quad (9)$$

Кут внутрішнього зрушення ( $\varphi_\sigma$ ) утворений лінією  $Oc$  із віссю абсцис; тангенс цього кута називається коефіцієнтом внутрішнього зрушення ( $f_\sigma$ ) і визначається по формулі:

$$f_\sigma = tg\varphi_\sigma = f + \frac{\tau}{\sigma}, \quad (10)$$

Сипкі матеріали, у яких пряма граничних дотичних напруг проходить через початок координат 0 (рис. 4, б), називають ідеально сипкими тілами, а відповідні сипкі матеріали – легко- і добре сипкими.

Для ідеально сипких тіл коефіцієнт внутрішнього

зрушення ( $f_\sigma$ ) дорівнює коефіцієнту внутрішнього тертя ( $f$ ), тобто  $f_\sigma = f$ , що безпосередньо впливає з рівняння (10), якщо в нього підставити  $\tau_s = 0$ .

Для добре сипких матеріалів кут внутрішнього тертя ( $\varphi$ ) дорівнює куту природнього укосу ( $\alpha$ ) (рис. 6, а), який може бути визначений способом, показаним на рис. 6, б.

Циліндр 1 необхідно встановити на площину 2 і наповнити сипким матеріалом доверху, потім циліндр необхідно повільно піднімати. При цьому матеріал, що перебуває в циліндрі, витікає й розташовується на площині під кутом  $\alpha$  природнього укосу ( $\alpha_0$ ).

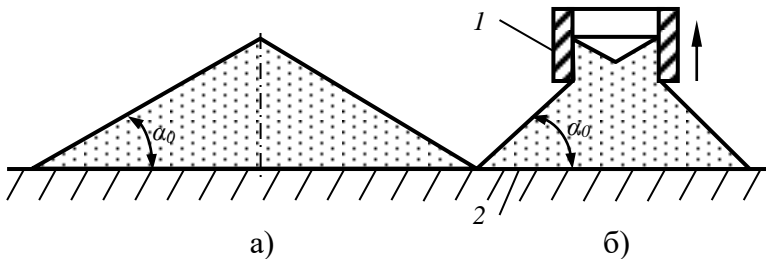


Рис. 6. Кут природнього укосу (а) і спосіб його визначення (б): 1 – циліндр; 2 – площина

Кут природнього укосу ( $\alpha_0$ ), зв'язаних матеріалів більше, ніж кут внутрішнього тертя ( $\varphi$ ), і залежить від способу формування укосу, при насипанні матеріалу зверху утворюється кут насипання  $\alpha_n$  (рис. 7, а), а при обваленні – кут обвалення  $\alpha_{об}$  (рис. 7, б). Величина тангенса кута насипання ( $tg\alpha_{про}$ ) визначаються по формулах:

$$tg\alpha_n = f + \frac{\tau}{h_j} = \frac{f}{2} + \sqrt{\frac{f}{4} + \frac{2\tau}{A \cdot j}}, \quad (11)$$

де  $h$  – висота укосу (показана на рис. 7), м;

$j$  – об'ємна вага сипкого матеріалу ( $j = \rho \cdot g$ ), Н/м<sup>3</sup>;

$Ab$  – підстава трикутного штабеля (рис. 7), м.

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{про}} = \frac{hjf}{hj - 4,7\tau\sqrt{f}}, \quad (12)$$

До кута внутрішнього зрушення близький по величині ефективний кут тертя ( $\delta_e$ ).

Для визначення величини ефективного кута тертя ( $\delta_e$ ) необхідно через точку З (рис. 8) лінії  $O'b$  граничних дотичних напруг зв'язаного сипкого матеріалу побудувати коло Мору. Дотична, проведена з початку координат 0 до кола Мору утворює з віссю абсцис шуканий кут  $\delta_e$ .

З рисунка 8 видно, що ефективний кут тертя ( $\delta_e$ ) по величині близький до кута внутрішнього зрушення ( $\varphi_\delta$ ).

Величина синуса ефективного кута тертя ( $\sin \delta_e$ ) визначається по формулі:

$$\sin \delta_e = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}, \quad (13)$$

де  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$  – величини головних напруг (Па), знайдені графоаналітично (побудовою кола Мору).

Сипкість матеріалу характеризується коефіцієнтом ( $m'$ ), який дорівнює відношенню головних напруг  $\sigma_1$  (Па) і  $\sigma_2$  (Па) (рис. 8), величини яких знаходять графоаналітично побудовою кола Мору, яке стосується лінії граничних напруг  $O'z$ , тобто

$$m' = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \quad (14)$$

Величина коефіцієнта рухливості ідеально сипкого тіла ( $m_i$ ) визначається по формулі:

$$m_i = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}, \quad (15)$$

де  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя, гради;

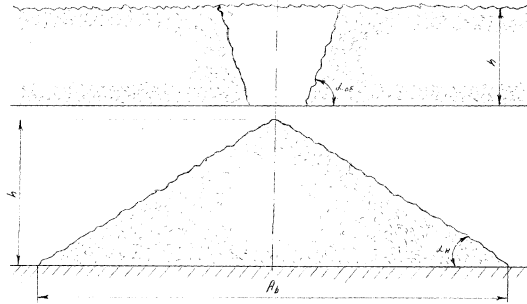


Рис. 7. Кути насипання (а) і обвалення (б)

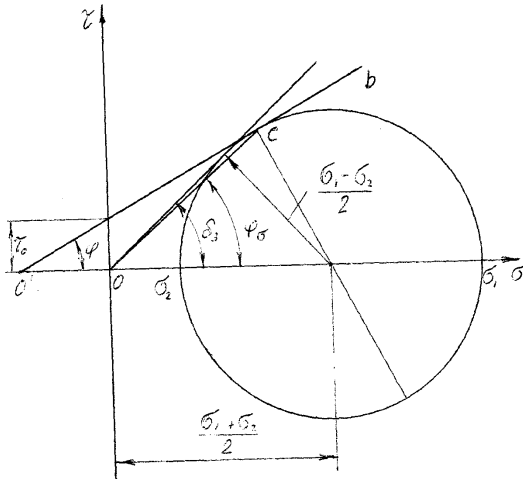


Рис. 8. Коло Мору

Для легко сипких матеріалів величина коефіцієнта рухливості ( $m_i$ ) може бути приблизно визначена по формулі:

$$m_i = \frac{0,18}{f}, \quad (16)$$

Величина коефіцієнта рухливості зв'язаних матеріалів ( $m'$ ) залежить від початкового опору зрушенню ( $\tau_0$ ) і визначається по формулі:

$$m' = m_i - \frac{\tau}{f\sigma}(1 - m_i), \quad (17)$$

де  $m_i$  – коефіцієнт рухливості ідеально сипкого тіла, що має

той же коефіцієнт внутрішнього тертя ( $f$ ), що й розглянутий зв'язний матеріал;

$\sigma_1$  – найбільша головна напруга в розглянутій точці, Па.

Початковий опір зрушенню ( $\tau_0$ ) може бути знайдене за допомогою приладів, що визначають максимальну висоту вільно варті вертикальної стінки (рис. 9, а) і максимальний розмір звідотвірної щілини (рис. 9, б).

Прилад для визначення максимальної висоти вільно варті вертикальної стінки (рис. 9, а) складається з посудини 1 з відкидною стінкою 2.

На початку досліду відкидна стінка 2 повинна перебуває у вертикальним положенні. Посудина 1 необхідно наповнити сипким матеріалом так, щоб поверхня насипаного в посудину 1 матеріалу була горизонтальною; потім відкидну стінку 2 необхідно відхилити в напрямку стрілки ( $\curvearrowright$ ) (рис. 9, а): якщо матеріал не обсипає й зберігає вертикальний укіс, то дослід повторюють при збільшеній висоті насипу в посудині 1 доти, поки не буде знайдена максимальна висота ( $h_c$ , м), при перевищенні якої матеріал починає обрушуватись.

Початковий опір зрушенню ( $\tau_0$ , Па) визначається по формулі:

$$\tau_0 = \frac{jh}{4}, \quad (18)$$

Прилад для визначення максимального розміру (ширини  $ac$ ) звідотвірної щілини (рис. 9, б) складається з високої посудини 1 з отвором у днище (довжиною  $b$ ); отвір перекривається засувкою 2.

На початку досліду засувка 2 повинна бути закрита. Посудина 1 необхідно наповнити сипким матеріалом; потім засувку 2 необхідно перемістити, утворивши щілину; після того, як невелика партія матеріалу, що перебуває безпосередньо над щілиною, витече з посудини 1, над щілиною утворюється звід; потім засувку 2 необхідно поступово переміщати доти, поки не буде досягнута максимальна ширина щілини ( $ac$ ), що забезпечує вільне витікання матеріалу без



утворення стійких зводів.

Початковий опір зрушенню ( $\tau_0$ , Па) визначається по формулі:

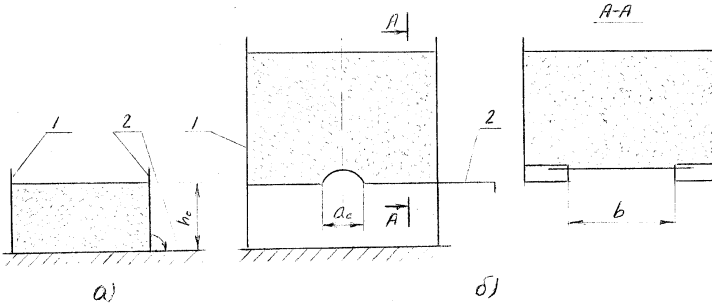


Рис. 9. Схема приладів для визначення максимальної висоти вільно вартюї вертикальної стінки (а) і максимального розміру звідотвірної щілини (б): а) 1 – посудина; 2 – відкидна стінка; б) 1 – засувка; 2- сипкий матеріал.

$$\tau = \frac{bad}{3,2(b+a)}, \quad (19)$$

де  $a_c$  – максимальна ширина звідотвірної щілини, м;

$b$  – довжина звідотвірної щілини, м.

Величина початкового опору зрушенню в того самого сипкого матеріалу може бути різною й залежить від його ущільненості й вологості.

При транспортуванні в контейнерах сипкі продукти ущільнюються й величина початкового опору зрушенню зростає; особливо сильно (в 3...4 рази) зростає величина початкового опору зрушенню в пилоподібних матеріалів (при прискорених коливаннях, близьких до критичних).

Початковий опір зрушенню зростає також при підвищенні плівкової вологості в дрібнофракційних матеріалів, особливо при досягненні верхньої межі плівкової вологості, коли початковий опір зрушенню вологого матеріалу в багато разів більше, ніж початковий опір зрушенню того ж матеріалу в сухому стані.

Добре сипкі матеріали, що містять дрібні фракції, що й мають у сухому стані  $\tau_0 = 0$ , здобувають при зволоженні

початковий опір зрушенню, рівне 150...400 Па й більш. Якщо ж матеріал не містить дрібних фракцій (пилоподібних і порошкоподібних), то зволоження не викликає підвищення зв'язуваності.

Вологість ( $\omega$ ) сипкого матеріалу визначається висушуванням при температурі +105 °С із періодичним зважуванням проб матеріалу; процес сушіння припиняється при досягненні постійної величини маси проби матеріалу, що висушується.

Вологість ( $\omega$ ) визначається по формулі:

$$\omega = \frac{M - M_1}{M_2 - M_1}, \quad (20)$$

де  $M_1$  і  $M_2$  – маса порції проби сипкого матеріалу відповідно до й після висушування, кг (г).

Волога, що видаляється при висушуванні, складається із внутрішньої, що усмоктується частками сипкого матеріалу з навколишнього повітря (атмосфери) (гігроскопічна волога), і зовнішня, що перебуває на поверхні часток сипкого матеріалу у вигляді плівок (покриваючих частки) (плівкова або молекулярна волога) пори, що й заповнює, між частками матеріалу (гравітаційна (або вільна) волога).

Повітряно-сухі сипкі матеріали (природної вологості) не містять зовнішньої вологи.

Сирі сипкі матеріали містять плівкову вологу, а мокрі – гравітаційну (вільну).

Зовнішнє тертя. Опір сипких матеріалів переміщенню щодо поверхні твердих тіл, викликуване силою тертя, характеризується коефіцієнтом зовнішнього тертя ( $f_1$ ), який визначається за допомогою трибометра (рис. 5).

На поверхню  $ab$  необхідно встановити смугу, виготовлену із твердого матеріалу (наприклад: сталь, дерево, гума й т.п.); потім над цією смугою необхідно встановити рамку 2 і заповнити її досліджуваним матеріалом.

Подальші випробування проводяться також, як і при визначенні сил внутрішнього тертя.

Коефіцієнт зовнішнього тертя ( $f_1$ ) визначається по формулі:

$$f_1 = \frac{T - T_1}{G}, \quad (21)$$

де  $T_1$  – сила тертя сипкого матеріалу (у рухливій рамці) щодо поверхонь твердих матеріалів, Н.

При виконанні інженерних розрахунків бункерів можна орієнтовно користуватися наступним наближеним співвідношенням:

$$f_{1s} : f_{1a} : f_{1p} : f \approx 15 : 16 : 17 : 20, \quad (22)$$

де  $f_{1s}$ ,  $f_{1a}$ ,  $f_{1p}$  – коефіцієнти тертя сипкого матеріалу відповідно по сталі, дереву, гумі;

$f$  – коефіцієнт внутрішнього тертя сипкого матеріалу, до якого приблизно прирівнюється коефіцієнт тертя по бетонній поверхні.

Коефіцієнт зовнішнього тертя у відносному русі менше коефіцієнта тертя спокою на 10...30 %.

Кут тертя сипкого матеріалу про стінки силосу є функцією кута внутрішнього тертя ( $\varphi$ ), розміру часток матеріалу ( $a'$ ) і режиму роботи силосу.

Кут зовнішнього тертя ( $\varphi_1$ , гради) визначається по формулі:

$$\varphi_1 = \varepsilon' \varphi, \quad (23)$$

де  $\varepsilon'$  – коефіцієнт, значення якого наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Значення коефіцієнта  $\varepsilon'$  залежно від розміру часток сипкого матеріалу й виду виконуваної операції**

| Розмір часток сипкого матеріалу, $a'$ , мм | Значення коефіцієнта $\varepsilon'$ |                   |
|--|-------------------------------------|-------------------|
|  | при завантаженні                    | при розвантаженні |
| $a' \leq 0,06$                             | 1                                   | 1                 |
| $0,06 \leq a' \leq 0,20$                   | $1,11 - 1,78a'$                     | $1,17 - 2,85a'$   |
| $a' \geq 0,20$                             | 0,75                                | 0,6               |

Основні механічні властивості сипких матеріалів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

| Сипкий матеріал | Коефіцієнт внутрішнього тертя, $f$ | Твердий матеріал | Коефіцієнт зовнішнього тертя, $f_1$ | Коефіцієнт динамічного ушлінення, $K_y$ | Початковий опір зрушення, $\tau_{об}$ , Па |
|-----------------|------------------------------------|------------------|-------------------------------------|---|--|
| 1а              | 2а                                 | 3а               | 4а                                  | 5а                                      | 6а   |
| 1. Гречка       | 0,47...0,49                        | Сталь            | 0,30...0,52                         | 1,15                                    |  |
| 2. Гречка       | 0,70                               | Дерево           | 0,37...0,56                         |   |  |
|                 |                                    | Гума             | 0,40...0,59                         |   |  |
| 3. Зерно-сухе   |                                    | Сталь            | 0,58                                |   |  |
| 4. Крупа-манна  | 0,58...0,70                        | Сталь            | 0,65                                |   |  |
| 5. Борошно      | 0,57...1,16                        | Сталь            | 0,49...0,65                         | 1,03...1,13                             | 50   |
|                 |                                    | Гума             | 0,85...0,95                         |   |  |
|                 |                                    | Бельгінг         | 0,57...0,85                         |   |  |
|                 |                                    | Бетон            | 0,60                                |   |  |
|                 | 1,44...1,60                        | Сталь            | 1,20...1,60                         | 1,30                                    | 30   |
| 6. Вівіскі      | 0,57...0,84                        | Гума             | 1,20                                |   |  |
|                 |                                    | Сталь            | 0,32...0,80                         | 1,16...1,20                             |  |
|                 |                                    | Гума             | 0,46...0,56                         |   |  |
| 7. Пісок        |                                    | Бельгінг         | 0,47...0,80                         |   |  |
|                 |                                    | Бетон            | 0,58...0,84                         |   |  |
|                 | 0,41...0,43                        | Сталь            | 0,31                                | 1,08                                    |  |
|                 |                                    | Дерево           | 0,30...0,35                         |   |  |
| 8. Просо        |                                    | Гума             | 0,36...0,40                         |   |  |
| 9. Рис          | 0,84                               |                  |                                     |   |  |
| 10. Жито        | 0,47...0,76                        | Сталь            | 0,32...0,58                         | 1,05...1,13                             |  |
|                 |                                    | Дерево           | 0,37...0,78                         |   |  |

Продовження таблиці 2

| 1                        | 2           | 3        | 4           | 5           | 6      |
|--------------------------|-------------|----------|-------------|-------------|--------|
| 11.Цукровий-пісок        | 1,19        | Гума     | 0,45        |             |        |
| 12.Насіння-кличі-провини |             | Сталь    | 0,85...1,00 |             |        |
| 13.Насіння-конопель      | 0,60...0,78 | Сталь    | 0,29...0,38 |             |        |
| 14.Насіння-льону         | 0,46...0,66 | Дерево   | 0,36        |             |        |
|                          |             |          |             |             |        |
| 15.Насіння-соняшника     |             | Сталь    | 0,25...0,45 |             |        |
| 16.Насіння-буряка        | 0,78        | Дерево   | 0,31...0,48 |             |        |
| 17.Насіння-суріпки       | 0,42        | Сталь    | 0,34...0,35 |             |        |
|                          |             | Дерево   | 0,31...0,66 |             |        |
| 18.Сода                  | 0,71...1,02 | Гума     | 0,40...0,45 |             |        |
|                          |             | Бетон    | 0,41        |             |        |
|                          |             | Сталь    | 0,32...0,49 |             |        |
|                          |             | Дерево   | 0,36...0,58 |             |        |
|                          |             |          |             |             |        |
|                          |             | Дерево   |             |             |        |
|                          |             |          |             |             |        |
|                          |             | Дерево   | 0,36        |             |        |
|                          |             |          |             |             |        |
|                          |             | Сталь    | 0,30...0,70 | 1,08...1,17 | До 100 |
|                          |             | Дерево   | 0,48        |             |        |
|                          |             | Гума     | 0,44...0,68 |             |        |
|                          |             | Бельтинг | 0,67        |             |        |
|                          |             | Бетон    | 0,50        |             |        |
| 19.Солод                 | 0,41...1,20 | Сталь    | 0,49...1,20 |             |        |
| 20.Сіль-кухонна          | 0,57...1,20 | Гума     | 0,633       | 1,11...1,14 |        |
|                          |             | Бельтинг | 0,49        |             |        |

Сипким матеріалам також властиві наступні властивості:

Сипким матеріалам також властиві наступні властивості:

- гігроскопічність: сипкі матеріали, схильні усмоктувати атмосферну вологу (наприклад: сіль поварена, цукровий пісок, цукрова пудра), називаються гігроскопічними;

- липкість: вологі дрібнофракційні матеріали прилипають до стінок бункерів у результаті молекулярної взаємодії плівок рідини, що перебуває на поверхні часток сипкого матеріалу, з матеріалом стінок бункера (властивістю липкості мають також і деякі сухі сипкі матеріали);

- злежуваність: матеріали, що втрачають рухливість часток при тривалім зберіганні, називаються, що злежуються (наприклад, при підвищеній вологості особливо схильні до злежування цукровий пісок, кам'яна сіль) (зберігання протягом декількох доби зв'язних матеріалів викликає збільшення початкового опору зрушенню).

- абразивність: сипкі матеріали, що стирають поверхні спускних лотків і бункерів, робочі органи затворів і живильників, називають абразивними (наприклад, зерно відносять до помірковано абразивних); неабразивні матеріали (наприклад, чиста картоплю) можуть придбати властивості абразивності при забрудненні їх абразивними (мінеральними) домішками (наприклад, піском).

- крихкість: до тендітних відносяться матеріали, частки яких легко зазнають руйнуванню (дробленню) у процесі переміщення, навантаження й вивантаження (наприклад, насінне зерно);

- вибухонебезпечність: крім властиво вибухових речовин, до вибухонебезпечних відносяться сипкі матеріали, що містять, що й виділяють пил, здатну вибухнути (наприклад: крохмаль, борошно, зерно), а також сипкі матеріали, що утворюють вибухові суміші з іншими матеріалами;

- отруйність: крім отруйних сипких матеріалів (наприклад, насіння рицини), до шкідливих для здоров'я відносяться, що порожать" матеріали, здатні викликати захворювання очей, органів подиху й нервової системи;

- самозаймистість – властивість деяких сипких матеріалів займатися під впливом тепла, що виділяється при протіканні в них хімічних процесів.

Звідоутворення. Злежали й матеріали, що змерзлись, утворюючи моноліт, закупорюють отвори бункерів, перешкоджаючи їх спорожнюванню: закупорка отворів бункерів відбувається в результаті звідоутворення шматкових (рис. 10, а) або зв'язкових матеріалів (рис. 10, б).

У випадку, коли висота зводів стає порівнянною із глибиною бункера, виникає явище трубоутворення (рис. 11): над отвором витікання утворюється порожня труба, і подальший рух матеріалу припиняється.

Трубоутворення можливо у випадку, коли висота труби ( $h$ ) (рис. 11) менше, ніж висота вільно варті вертикальної стінки ( $h_0$ ).

Для усунення звідоутворення добре сипких матеріалів величина поперечного розміру випускного отвору ( $A$ , мм) повинна перебувати в межах:

$$A \geq (3...6)a', \quad (24)$$

причому менші значення необхідно ухвалювати для рядових матеріалів, а більші – для сортованих (рис. 10); небезпека звідоутворення збільшується, якщо

$$\frac{A}{a} \leq 4,35...5,9, \quad (25)$$

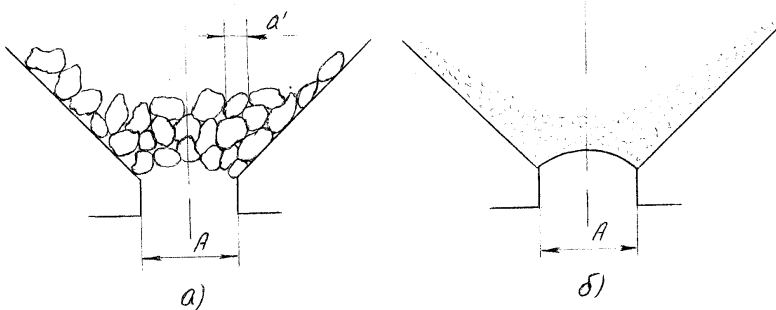


Рис. 10. Звідоутворення висновки матеріалів (а) і зв'язкових матеріалів (б):

☐ – зв'язні матеріали; ☉ – кускові матеріали;

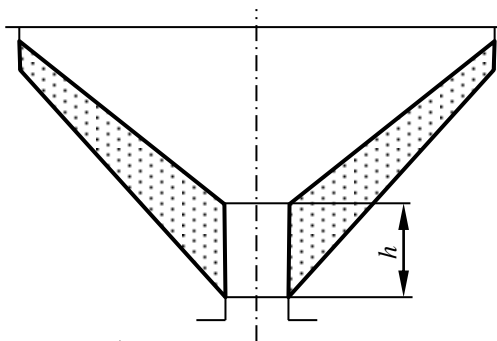


Рис. 11. Трубоутворення:  
1 – сипкий матеріал.

Для усунення звідоутворення зв'язкових сипких матеріалів гідравлічний радіус випускного отвору бункера повинен перевищувати гідравлічний радіус найбільшого звідотвірного отвору ( $R_{ce}$ , м) визначається по формулі:

$$R_{ce} = \frac{\tau(1 + \sin \varphi)}{j}, \quad (26)$$

де  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя, град.

### ХІД РОБОТИ:

1. Інструктаж з безпеки праці на робочому місці.
2. Ознайомитися методичними рекомендаціями до роботи.
3. Вивчити класифікацією й основні властивості сипких матеріалів.
4. Виконати дослідження сипких матеріалів.
5. Побудувати графічні залежності сипких матеріалів, проаналізувати отримані результати і зробити висновок.

### ЗАВДАННЯ:

На підставі набутих знань про основні властивості сипких матеріалів виконати дослідження, обробку експериментальних даних і побудувати графічні залежності, виконати аналіз отриманих результатів і зробити висновок.



## ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1. Визначення гранулометричного складу сипких матеріалів.

Гранулометричний склад попередньо взятої й зваженої проби сипкого матеріалу ( $\sum q_i$ , кг (г)) визначається методом просівання матеріалу через ряд сит з розмірами, що поступово збільшуються, отворів ( $d_i$ , мм); для цього необхідно:

- визначити масу матеріалу на кожному ситі після просівання ( $q_i$ , кг (г));
- визначити процентний вміст матеріалу кожної фракції ( $q'_i$ , % (мас));
- визначити сумарний залишок (вихід зверху по ситах) ( $\sum q'_i$ , %).

Отримані експериментальні дані й результати ситового аналізу обраних сипких матеріалів заносяться в таблицю 3.

За результатами ситового аналізу (таблиця 3) необхідно побудувати графіки гранулометричного складу досліджуваних сипких матеріалів, користуючись при цьому формулами (1) і (2), необхідно визначити розмір типових часток для досліджуваних сипких матеріалів ( $a'$ , мм).

### 2. Визначення об'ємної маси сипких матеріалів.

Для визначення об'ємної маси сипких матеріалів при вільній насипці ( $j_m$ , кг/м<sup>3</sup>) необхідно в мірну посудину (рис. 3) засипати матеріал до верху рамки 3, після чого рамку 3 необхідно повернути (при цьому зрізується надлишок сипкого матеріалу), що залишився в мірній посудині 1 матеріал ( $V_1$ , м<sup>3</sup>) необхідно зважити на вагах ( $M_1$ , кг) і визначити об'ємну масу сипкого матеріалу при вільній насипці по формулі (4).

Для визначення об'ємної маси динамічно ущільненого сипкого матеріалу ( $j_{му}$ , кг/м<sup>3</sup>) необхідно мірну посудину, заповнену матеріалом до верху рамки 3, установити на вібраційний стіл.

Таблиця 3

## Результати ситового аналізу сипких матеріалів

| Досліджувані сипкі матеріали |   |   |                  |                |   |   |                  |                |   |   |                  |
|------------------------------|---|---|------------------|----------------|---|---|------------------|----------------|---|---|------------------|
| Отвору сит                   | Ситовий аналіз сипкого матеріалу                  |   |                  | Отвори сит     | Ситовий аналіз сипкого матеріалу                  |   |                  | Отвори сит     | Ситовий аналіз сипкого матеріалу                  |   |                  |
|                              | маса матеріалу на кожну му ситі після просіювання | відсоток отримання матеріалу (вихід кожної фракції) | Σ q <sub>i</sub> |                | маса матеріалу на кожну му ситі після просіювання | відсоток отримання матеріалу (вихід кожної фракції) | Σ q <sub>i</sub> |                | маса матеріалу на кожну му ситі після просіювання | відсоток отримання матеріалу (вихід кожної фракції) | Σ q <sub>i</sub> |
| d <sub>i</sub>               | q <sub>i</sub>                                    | q <sub>i</sub> %                                    | Σ q <sub>i</sub> | d <sub>i</sub> | q <sub>i</sub>                                    | q <sub>i</sub> %                                    | Σ q <sub>i</sub> | d <sub>i</sub> | q <sub>i</sub>                                    | q <sub>i</sub> %                                    | Σ q <sub>i</sub> |
| мм                           | кг  | г   | % (мас)          | мм             | кг  | г   | % (мас)          | мм             | кг  | г   | % (мас)          |
| 1                            | 2   | 3   | 4                | 5              | 6   | 7   | 8                | 9              | 10  | 11  | 12               |
| ...                          | ...   | ...   | ...              | ...            | ...   | ...   | ...              | ...            | ...   | ...   | ...              |
| n                            | ...   | ...   | 100              | ...            | ...   | ...   | 100              | ...            | ...   | ...   | 100              |
| Усього                       | ...   | 100   | ...              | Усього         | ...   | 100   | ...              | Усього         | ...   | 100   | ...              |

Примітка: Кількість сит (n) для проведення ситового аналізу матеріалу й розмір отворів сит (d<sub>i</sub>, мм) залежать від досліджуваного сипкого матеріалу (природи матеріалу, його структури, хімічного складу і т.д.)

При включенні вібраційного стола рівень засипаного матеріалу в рамці буде поступово знижуватися, тому в рамку 3 необхідно додавати сипкий матеріал доти, поки зниження рівня матеріалу в рамці не припиниться, після чого вібраційний стіл необхідно відключити й поворотом рамки 3 зрізати надлишок сипкого матеріалу. Далі необхідно виконати вищенаведені операції (як і при визначенні об'ємної маси сипкого матеріалу при вільній насипці).

Коефіцієнт ущільнення ( $K_y$ ) сипкого матеріалу визначається по формулі (5).

Для визначення щільності (питомої маси) твердих часток сипкого матеріалу необхідно зважити порцію сипкого матеріалу ( $M_{nm}$ , кг), змішати її з певною кількістю рідини ( $V_{ж}$ , м<sup>3</sup>), що змочує, але не розчинюючої матеріалу (наприклад, вода, спиртової розчин), і визначити обсяг отриманої суспензії ( $V_c$ , м<sup>3</sup>), щільність твердих часток сипкого матеріалу ( $\rho_m$ , кг/м<sup>3</sup>) визначається по формулі (6).

Отримані експериментальні дані й результати розрахунків по визначенню об'ємної маси й щільності досліджуваних сипких матеріалів заносяться в таблицю 4.

Таблиця 4

Результати визначення об'ємної маси й щільності сипких матеріалів

| Показники  | Позначення, одиниці виміру                                | Значення                     |  |  |
|--|---|------------------------------|--|--|
|  |   | Досліджувані сипкі матеріали |  |  |
|  |   |                              |  |  |
| 1. Обсяг мірної посудини ( для визначення об'ємної маси сипкого матеріалу)             | $V_1$ , м <sup>3</sup>                                    |                              |  |  |
| 2. Маса сипкого матеріалу, що перебуває в мірній посудині                              | $M_1$ , кг  |                              |  |  |
| 3. Об'ємна маса:<br>- при вільній насипці<br>- динамічно ущільненого сипкого матеріалу | $j_m$ , кг/м <sup>3</sup><br>$j_{my}$ , кг/м <sup>3</sup> |                              |  |  |
| 4. Коефіцієнт ущільнення сипкого матеріалу   | $K_y$   |                              |  |  |

|  |                         |  |  |  |
|--|-------------------------|--|--|--|
| 5. Маса порції сипкого матеріалу ( для визначення щільності твердих часток сипкого матеріалу)            | $M_{пм}, \text{кг}$     |  |  |  |
| 6. Обсяг рідини, що змочує, але не розчинюючої сипкий матеріал   | $V_{жс}, \text{м}^3$    |  |  |  |
| 7. Обсяг суспензії, отриманої в результаті змішування порції сипкого матеріалу з певною кількістю рідини | $V_c, \text{м}^3$       |  |  |  |
| 8. Щільність (питома маса) твердих часток сипкого матеріалу  | $\rho_m, \text{кг/м}^3$ |  |  |  |
| Висновок   |                         |  |  |  |

### 3. Визначення основних параметрів, що характеризують сипкість матеріалів.

Для визначення основних параметрів, що характеризують сипкість матеріалів, проводяться випробування сипких матеріалів на трибометрі (рис. 5); для цього необхідно:

- ринва 1 заповнити сипким матеріалом; рамку 2 заповнити попередньо зваженим сипким матеріалом; на поверхню матеріалу, що перебуває в рамці 2, установити також попередньо зважені притискні пластини, після чого визначити сумарна вага притискних пластин і сипкого матеріалу в рухливій рамці ( $G, \text{Н}$ );

- на вантажну чашку 4 установити важки, під вагою яких рамка 2 почне рухатися ( $T$ ) (відбувається зріз матеріалу) (величину сили зрушення ( $T, \text{Н}$ ) можна також визначити за допомогою динамометра);

- попередньо визначивши силу опору рухливої рамки ( $T_p, \text{Н}$ ) одним з вищевказаних способів і визначивши площу зрізу ( $F, \text{м}^2$ ), обчислити величини напруг  $\sigma$  (Па) ( по формулі 7) і  $\tau$  (Па) (по формулі 8), необхідні для побудови графіка граничних дотичних напружень (рис. 4);

- по отриманих експериментальних значеннях  $\sigma$  (Па) і  $\tau$  (Па) побудувати пряму граничних дотичних напруг і визначити:

- величину початкового опору зрушенню ( $\tau_{про}, \text{Па}$ );

- величину кута внутрішнього тертя ( $\varphi$ , гради);
- величину кута внутрішнього зрушення ( $\varphi_s$ , гради);
- після чого визначити величину коефіцієнта внутрішнього тертя ( $f$ ) по формулі (9) і величину коефіцієнта внутрішнього зрушення ( $f_s$ ) по формулі (10).

Величина кута природнього укосу сипкого матеріалу ( $\alpha_0$ ) визначається способом, показаним на рис. 6, б:

- на площину два встановити циліндр 1;
- циліндр 1 наповнити сипким матеріалом доверху;
- потім циліндр 1 необхідно повільно піднімати, при цьому матеріал, що перебуває в циліндрі, впливає й розташовується на площині під кутом природнього укосу ( $\alpha_0$ ), величину якого необхідно визначити за допомогою кутоміра.

Величина тангенса кута насипання ( $tg\alpha_n$ ) сипкого матеріалу визначається по формулі (11), після чого визначається величина кута насипання ( $\alpha_n$ , град) (рис. 7, а).

Величина тангенса кута обвалення ( $tg\alpha_{on}$ ) сипкого матеріалу визначається по формулі (11), після чого визначається величина кута обвалення ( $\alpha_{on}$ , град) (рис. 7, б).

Для визначення величини ефективного кута тертя ( $\delta_s$ ) необхідно на графіку граничних дотичних напружень провести коло Мору (рис. 8): графоаналітично визначивши величини головних напруг  $\sigma_1$  (Па) і  $\sigma_2$  (Па), визначити величину синуса ефективного кута тертя ( $\sin \delta_s$ ) по формулі (13), після чого визначити величину ефективного кута тертя ( $\delta_s$ , гради).

Величина коефіцієнта рухливості сипкого матеріалу ( $m'$ ) визначається по формулі (14), беручи до уваги величини головних напруг  $\sigma_1$  (Па) і  $\sigma_2$  (Па), певних графоаналітично (побудовою кола Мору (рис. 8)).

Величина коефіцієнта рухливості визначається:

- для ідеально сипкого тіла ( $m_i$ ) – по формулі (15);
- для легкосипких матеріалів ( $m_i$ ) – по формулі (16);

- для зв'язних матеріалів ( $m'$ ) – по формулі (17), беручи до уваги величину коефіцієнта рухливості ідеально сипкого тіла ( $m_i$ ), що має той же коефіцієнт внутрішнього тертя ( $f$ ), що й розглянутий зв'язний матеріал, і величину найбільшої головної напруги в розглянутій крапці ( $\sigma_1$ , Па), обумовлену графоаналітично (побудовою кола Мору (рис. 8)).

Початковий опір зрушенню ( $\tau_0$ ) сипкого матеріалу визначається за допомогою приладу для визначення максимальної висоти вільно вартої вертикальної стінки (рис. 9, а); для цього необхідно:

- посудина 1 наповнити сипким матеріалом так, щоб поверхня насипаного в посудину матеріалу була горизонтальною (при цьому відкидна стінка 2 повинна перебувати у вертикальному положенні);

- відкидну стінку 2 відхилити в напрямку стрілки ( $\curvearrowright$ ) (рис. 9, а): якщо матеріал не обсипає й зберігає вертикальний укіс, то досвід повторюється вже при збільшеній висоті насипу в посудині доти, поки не буде знайдена максимальна висота ( $L_0$ , м), при перевищенні якої зерновий матеріал починає обрушуватись;

- величина початкового опору зрушенню ( $\tau_{on}$ , Па) сипкого матеріалу визначається по формулі (18).

Початковий опір зрушенню ( $\tau_0$ ) сипкого матеріалу визначається також за допомогою приладу для визначення максимального розміру (ширини  $ac$ ) звідотвірної щілини (рис. 9, б); для цього необхідно:

- посудина 1 наповнити сипким матеріалом (при цьому засувка 2 повинна бути закрита);

- засувку 2 перемістити, утворивши щілину (після того, як невелика партія матеріалу, що перебуває над щілиною, витече з посудини 1, над щілиною утворюється звід);

- після утвору зводу над щілиною засувку 2 плавно переміщати доти, поки не буде досягнута максимальна ширина щілини ( $ac$ , м), що забезпечує вільне витікання без утвору стійких зводів;

- попередньо вимірявши довжину звідотвірної щілини ( $b$ , м), визначити величину початкового опору зрушенню ( $\tau_{он}$ , Па) сипкого матеріалу по формулі (9).

Отримані експериментальні дані й результати розрахунків по визначенню основних параметрів, що характеризують сипкість досліджуваних матеріалів заносяться в таблицю 5.

Таблиця 5

Результати досліджень основних параметрів сипких матеріалів

| Найменування показників  | Позначення, одиниці виміру  | Значення                     |   |   |
|--|-----------------------------|------------------------------|---|---|
|  |                             | Досліджувані сипкі матеріали |   |   |
| 1  | 2                           | 3                            | 4 | 5 |
| 1. Сумарна вага притискних пластин і сипкого матеріалу до притискної рамки       | $G$ , Н                     |                              |   |   |
| 2. Сила зрушення   | $T$ , Н                     |                              |   |   |
| 3. Сила опору рухливої рамки   | $T_p$ , Н                   |                              |   |   |
| 4. Площа зрізу   | $F$ , м <sup>2</sup>        |                              |   |   |
| 5. Величини напруг, необхідних для побудови графіка граничних дотичних напружень | $\sigma$ , Па               |                              |   |   |
|  | $\tau$ , Па                 |                              |   |   |
| 6. Початковий опір зрушенню  | $\tau_{про}$ , Па           |                              |   |   |
| 7. Кут внутрішнього тертя  | $\varphi$ , град            |                              |   |   |
| 8. Кут внутрішнього зрушення   | $\varphi_{\epsilon}$ , град |                              |   |   |
| 9. Коефіцієнт внутрішнього тертя   | $f$                         |                              |   |   |
| 10. Коефіцієнт внутрішнього зрушення   | $f_{\epsilon}$              |                              |   |   |
| 11. Кут природнього укусу  | $\alpha_0$                  |                              |   |   |
| 12. Кут насипання  | $\alpha_n$ , град           |                              |   |   |
| 13. Кут обвалення  | $\alpha_{он}$ , град        |                              |   |   |
| 14. Величини головних напруг, знайдені графоаналітично (побудовою кола Мору)     | $\sigma_1$ , Па             |                              |   |   |
|  | $\sigma_2$ , Па             |                              |   |   |

## Продовження таблиці 5

| 1  | 2                | 3 | 4 | 5 |
|--|------------------|---|---|---|
| 15.Ефективний кут тертя                                | $\delta_3$       |   |   |   |
| 16.Коефіцієнт рухливості                               | $m'$             |   |   |   |
| 17.Максимальна висота вільно варті вертикальної стінки | $L_0$ , м        |   |   |   |
| 18.Початковий опір зрушенню                            | $\tau_{on}$ , Па |   |   |   |
| 19.Довжина звідотвірної щілини                         | $b$ , м          |   |   |   |
| 20.Максимальна ширина звідотвірної щілини              | $ac$             |   |   |   |
| 21.Початковий опір зрушенню                            | $\tau_{on}$ , Па |   |   |   |
| Висновок   |                  |   |   |   |

#### 4. Визначення вологості сипких матеріалів.

Для визначення вологості сипкого матеріалу необхідно зважити на лабораторних технічних вагах порцію проби сипкого матеріалу ( $M_1$ , кг (г)) і помістити її в попередньо зважені бюкси, після чого встановити бюкси в розігріту сушильну шафу. Висушувати при температурі  $+105^\circ\text{C}$ , періодично зважуючи порцію проби сипкого матеріалу: процес сушіння припиняється при досягненні постійної величини маси порції проби матеріалу, що висушується ( $M_2 = const$ ).

Вологість ( $\omega$ ) сипкого матеріалу визначається по формулі (20).

Отримані експериментальні дані й результати розрахунків по визначенню вологості досліджуваних сипких матеріалів заносяться в таблицю 6.

#### 5. Визначення коефіцієнта зовнішнього тертя сипких матеріалів.

Для визначення коефіцієнта зовнішнього тертя сипких матеріалів проводяться випробування сипких матеріалів на трибометрі (рис. 5); для цього необхідно:

- на поверхню  $ab$  ринви 1 установити смугу, виготовлену із твердого матеріалу (наприклад: сталь, дерево, гума);



Таблиця 6

## Результати досліджень вологості сипких матеріалів

| Показники   | Позначення, одиниці виміру | Значення                     |  |  |
|---|----------------------------|------------------------------|--|--|
|   |                            | Досліджувані сипкі матеріали |  |  |
| 1. Маса порції проби сипкого матеріалу:<br>- до висушування | $M_1$ , кг (г)             |                              |  |  |
|   | $M_2$ , кг (г)             |                              |  |  |
| - після висушування   |                            |                              |  |  |
| 2. Вологість сипкого матеріалу                              | $\omega$                   |                              |  |  |
| Висновок  |                            |                              |  |  |

- над смугою встановити рамку 2 і заповнити її попередньо зваженим сипким матеріалом; на поверхню матеріалу, що перебуває в рамці 2, установити також попередньо зважені притискні пластини, після чого визначити сумарна вага притискних пластин і сипкого матеріалу в рухливій рамці ( $G$ , Н);

- на вантажну чашку 4 установити важки, під вагою яких рамка 2 почне рухатися ( $T_{13}$ ,  $T_{1a}$ ,  $T_{1p}$ , Н) (відбувається переміщення сипкого матеріалу щодо поверхні твердого матеріалу (сталь, дерево, гума)) (величини сил тертя ( $T_{13}$ ,  $T_{1a}$ ,  $T_{1p}$ , Н) можна також визначити за допомогою динамометра);

- попередньо визначивши силу опору рухливої рамки ( $T_p$ , Н) одним з вищевказаних способів, обчислити величину коефіцієнта зовнішнього тертя ( $f_{13}$ ,  $f_{1a}$ ,  $f_{1p}$ ) сипкого матеріалу по формулі (21).

Отримані експериментальні дані й результати розрахунків по визначенню коефіцієнта зовнішнього тертя досліджуваних сипких матеріалів заносяться в таблицю 7.

Таблиця 7

## Результати визначення коефіцієнта зовнішнього тертя сипких матеріалів

| Найменування показників   | Позначення, одиниці виміру | Значення                     |   |   |
|---|----------------------------|------------------------------|---|---|
|   |                            | Досліджувані сипкі матеріали |   |   |
|   |                            | 3                            | 4 | 5 |
| 1   | 2                          | 3                            | 4 | 5 |
| 1. Сумарна вага притискних пластин і сипкого матеріалу в притискній рамці                           | $G$ , Н                    |                              |   |   |
| 2. Сила опору рухливої рамки  | $T_p$ , Н                  |                              |   |   |
| 3. Сила тертя сипкого матеріалу (у рухливій рамці) щодо поверхонь:<br>- сталі<br>- дерева<br>- гуми | $T_{1з}$ , Н               |                              |   |   |
|   | $T_{1а}$ , Н               |                              |   |   |
|   | $T_{1р}$ , Н               |                              |   |   |
| 4. Коефіцієнт зовнішнього тертя сипкого матеріалу:<br>- по сталі<br>- по дереву<br>- по гумі        | $f_{1з}$ , Н               |                              |   |   |
|   | $f_{1а}$ , Н               |                              |   |   |
|   | $f_{1р}$ , Н               |                              |   |   |
| Висновок  |                            |                              |   |   |

Для визначення величини кута зовнішнього тертя ( $\varphi_1$ ) сипких матеріалів необхідно, попередньо визначивши за допомогою побудованого графіка гранулометричного складу (рис. 3) (користуючись при цьому формулами (1) і (2)) розмір часток сипкого матеріалу ( $a'$ , мм), вибрати значення коефіцієнта  $\varepsilon'$  по таблиці 1 (залежно від виду виконуваної операції).

Величина кута зовнішнього тертя ( $\varphi_1$ , град) визначається по формулі (23), беручи до уваги, що величина кута внутрішнього тертя ( $\varphi$ ) визначається графоаналітично (побудовою прямих граничних дотичних напруг (рис. 4; таблиця 5)).

Отримані експериментальні дані й результати розрахунків по визначенню величини кута зовнішнього тертя досліджуваних сипких матеріалів заносяться в таблицю 8.

Результати визначення величини кута зовнішнього тертя  
сипких матеріалів

| Найменування показників  | Позначення,<br>одиниці<br>виміру | Значення                     |  |  |
|--|----------------------------------|------------------------------|--|--|
|  |                                  | Досліджувані сипкі матеріали |  |  |
|  |                                  |                              |  |  |
| 1. Розмір часток сипкого матеріалу                                     | $a'$ , мм                        |                              |  |  |
| 2. Величина коефіцієнта:<br>- при завантаженні<br>- при розвантаженні  | $\varepsilon'$                   |                              |  |  |
|  | $\varepsilon'$                   |                              |  |  |
| 3. Кут внутрішнього тертя  | $\varphi$ , град                 |                              |  |  |
| 4. Кут зовнішнього тертя:<br>- при завантаженні<br>- при розвантаженні | $\varphi_1$ , град               |                              |  |  |
|  | $\varphi_1$ , град               |                              |  |  |
| Висновок   |                                  |                              |  |  |

По закінченню проведення роботи проаналізувати отримані результати й зробити висновок.  
Зробити висновки по роботі.

### ЗМІСТ ЗВІТУ:

1. Тема роботи. 2. Мета роботи. 3. Табличні дані лабораторних досліджень. 4. Графічні залежності сипких матеріалів. 5. Аналіз отриманих результатів роботи і висновок.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ:

1. Класифікація сипких матеріалів.
2. Основні властивості сипких матеріалів.
3. Як визначити гранулометричний склад сипких матеріалів?
4. Як визначити об'ємну масу й щільність сипких матеріалів?
5. Як визначити основні параметри, що характеризують сипкість матеріалів?
6. Як визначити вологість сипких матеріалів?
7. Як визначити коефіцієнт зовнішнього тертя сипких

матеріалів?

8. Як визначити величину кута зовнішнього тертя сипких матеріалів?

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Переработка продукции растительного и животного происхождения. / Под ред. А.В. Богомолова и Ф.В. Перцевого. С.-Пб.: ГИОРД, 2001, 336 с.

2. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості / І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлов та ін. За ред. академіка УААН Гулого І.С. – Вінниця : Нова книга, 2001 – 576 с.

3. Технологічне устаткування хлібопекарських, макаронних і кондитерських виробництв / В.Ф. Петько, О.І. Гапонюк, Є.В. Петько. К.:2007. – 432 с.

4. Лісовенко О.Т., Руденко-Грицюк О.А., Літовченко І.М. та ін. «Технологічне обладнання хлібопекарських і макаронних виробництв»./ За редакцією академіка АНУкраїни О.Т. Лісовенка. К.: Наукова думка, 2000.

5. Камінський М.Д., Бабіч М.Б. Переробка та зберігання сільськогосподарської продукції. Навчальний посібник для вузів. Одеса: Аспект, 2000. – 460 с.

6. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості / І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлова та ін. Вінниця: Нова Книга, 2001. – 576 с.

7. Шутенко, Є. І. Технологія круп'яного виробництва : навч. посібник / Є. І. Шутенко, С. М. Соц. – Київ : Освіта України, 2010. – 272 с.

Навчальне електронне видання комбінованого використання  
Можна використовувати в локальному та мережному режимах

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ**

Методичні вказівки  
до виконання практичного заняття:  
з дисципліни: «Технологічне обладнання підприємств  
зберігання та переробки зерна»

Укладачі:  
**Гурський Петро Васильович**  
**Іващенко Сергій Григорович**  
**Маяк Ольга Анатоліївна**

---

Підп. до друку 27.12.2023 р. Один електронний оптичний диск (CD-ROM); супровідна документація. Об'єм даних 3,5 Мб. Тираж 10 прим.

---

Державний біотехнологічний університет  
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44