

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування

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

02-01-552М

РОЗРАХУНКОВИЙ ПРАКТИКУМ

з 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

Розрахунковий практикум з 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. – 71 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: 02-01-544М

© Ю. В. Науменко, 2024

© НУВГП, 2024

Зміст

Вступ	4
Розрахункова робота 1. Визначення раціональних технологічних параметрів інноваційного робочого процесу відцентрового формування трубчастих виробів із текучого матеріалу.....	7
Розрахункова робота 2. Визначення раціональних технологічних параметрів інноваційного робочого процесу подрібнення в барабанному млині із автоколивним завантаженням та пружним елементом у приводі.....	21
Розрахункова робота 3. Визначення раціональних конструктивних та технологічних параметрів інноваційного робочого процесу зовнішньокамерного багатостадійного подрібнення в помольному агрегаті із барабанними млинами.....	40
Список літератури	53
Додаток Феноменологія швидких зсувних течій зернистих матеріалів.....	55

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.

Розрахункова робота 1

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІННОВАЦІЙНОГО РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ВІДЦЕНТРОВОГО ФОРМУВАННЯ ТРУБЧАСТИХ ВИРОБІВ ІЗ ТЕКУЧОГО МАТЕРІАЛУ

Мета роботи:

1. Визначити раціональні значення швидкості обертання форми для двох етапів розподілення текучого матеріалу в камері при виготовленні трубчастих виробів за допомогою графічного методу.
2. Визначити раціональні значення швидкості обертання форми за допомогою аналітичного методу.
3. Оцінити розбіжність результатів, що отримано за допомогою графічного та аналітичного методів.

1.1. Вихідні дані

Інноваційний робочий процес відцентрового формування трубчастих виробів із текучого матеріалу включає подавання оброблюваного матеріалу у форму, що обертається відносно горизонтальної осі, розподілення матеріалу у два етапи та наступне формування його ущільненням або твердненням після підвищення швидкості обертання або без змінювання цієї швидкості.

На першому етапі розподілення, під час формоутворення, швидкість обертання підтримується не нижче величини ω_1 (рис. 1.1а), яка відповідає переходу циркуляційного режиму течії матеріалу в камері форми у режим пристінкового шару під час прискорення обертання, а на другому етапі розподілення, після закінчення формоутворення, швидкість обертання знижується не нижче величини ω_2 (рис. 1.1б), яка відповідає зворотному переходу цих режимів течії матеріалу під час сповільнення обертання.

Інноваційний робочий процес відцентрового формування дозволяє підвищити продуктивність виготовлення шляхом

скорочення часу формоутворення, а також підвищення якості виробів та зниження енерговитрат і динамічного навантаження шляхом збільшення рівномірності розподілу компонентів матеріалу перед формуванням, зменшення кількості дефектів під час тверднення та досягнення тихохідності процесу розподілення.

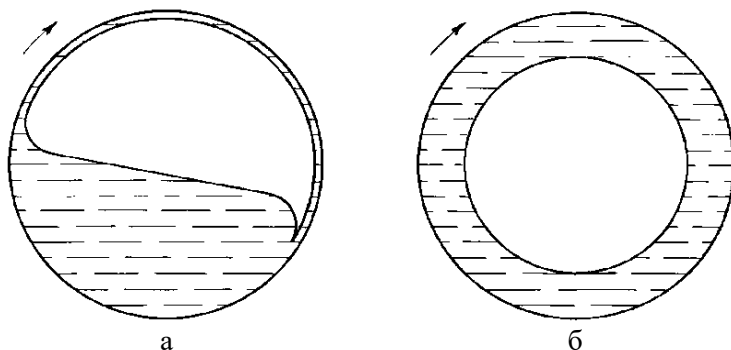


Рис. 1.1. Схеми усталених режимів течії рідини в камері обертового барабана:

а – циркуляційний режим, б – режим пристінкового шару

Значення швидкостей обертання ω_1 і ω_2 визначаються із урахуванням динамічних критеріїв подібності течії матеріалу – числа Рейнольдса Re і числа Фруда Fr на циліндричній поверхні камери форми та ступеня її заповнення оброблюваним матеріалом k .

Під час розподілення в камері обертової форми бетонну суміш та силікатні, шлакові і кам'яні розплави можна вважати однорідними в'язкими рідинами. При обертанні форми навколо горизонтальної осі у її циліндричній камері виникає явище режимного гістерезису в'язкої течії.

Швидкість обертання форми на першому етапі розподілення підтримується не нижче величини ω_{1a} , а на другому етапі розподілення – не нижче величини ω_{2a} , що визначаються за допомогою аналітичного методу зі співвідношень [1]:

$$\omega_{ia} = \sqrt{\frac{10^{lg(Fr_i)} g}{R}},$$

$$lg(Fr_i) = \frac{B_i + \sqrt{B_i^2 - 4A_i C_i}}{-2A_i},$$

$$A_i = \frac{D_i}{4},$$

$$B_i = D_i G + \frac{E_i}{2} - 1,$$

$$C_i = D_i G^2 + E_i G + F_i,$$

$$D_1 = -0,4159\kappa^4 + 1,172\kappa^3 - 1,222\kappa^2 + 0,5545\kappa - 0,1472,$$

$$E_1 = 5\kappa^4 - 13,91\kappa^3 + 14,31\kappa^2 - 6,33\kappa + 1,775,$$

$$F_1 = -13,98\kappa^4 + 38,94\kappa^3 - 40,12\kappa^2 + 18,43\kappa - 3,998,$$

$$D_2 = -0,5943\kappa^4 + 1,538\kappa^3 - 1,546\kappa^2 + 0,6952\kappa - 0,1528,$$

$$E_2 = 6,443\kappa^4 - 17,13\kappa^3 + 17,14\kappa^2 - 7,684\kappa + 1,699,$$

$$F_2 = -15,48\kappa^4 + 41,88\kappa^3 - 42,69\kappa^2 + 19,66\kappa - 3,919,$$

$$G = lg\left(\frac{R^2}{\nu}\right) - \frac{1}{2}lg\left(\frac{R}{g}\right),$$

де ω_{ia} – кутова швидкість обертання форми, 1/с; $i=1$ або 2 – індекс, що відповідає типу переходу режимів течії матеріалу в формі; R – радіус камери форми, м; g – гравітаційне прискорення, м/с²; κ – ступінь заповнення камери форми текучим матеріалом; Fr_i – число Фруда на циліндричній поверхні камери; $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i, G$ – змінні величини; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості текучого матеріалу під час розподілення, м²/с.

1.2. Порядок виконання роботи 1

1. Вибрати за варіантом з табл. 1 вихідні дані роботи: радіус камери форми R , ступінь заповнення камери форми текучим матеріалом κ , кінематичний коефіцієнт в'язкості текучого матеріалу під час розподілення ν .

Таблиця 1

Варіанти вихідних даних до виконання роботи 1

Варіант	R	κ	ν
	м		м ² /с
1	0,075	0,9	10^{-6}
2	0,084	0,9	$1,37 \cdot 10^{-6}$
3	0,094	0,9	$1,89 \cdot 10^{-6}$
4	0,0105	0,9	$2,59 \cdot 10^{-6}$
5	0,118	0,9	$3,56 \cdot 10^{-6}$
6	0,132	0,9	$4,89 \cdot 10^{-6}$
7	0,148	0,7	$6,72 \cdot 10^{-6}$
8	0,166	0,7	$9,24 \cdot 10^{-6}$
9	0,186	0,7	$1,27 \cdot 10^{-5}$
10	0,208	0,7	$1,74 \cdot 10^{-5}$
11	0,233	0,7	$2,4 \cdot 10^{-5}$
12	0,261	0,7	$3,29 \cdot 10^{-5}$
13	0,292	0,5	$4,52 \cdot 10^{-5}$
14	0,327	0,5	$6,21 \cdot 10^{-5}$
15	0,366	0,5	$8,53 \cdot 10^{-5}$
16	0,41	0,5	$1,17 \cdot 10^{-4}$
17	0,46	0,5	$1,61 \cdot 10^{-4}$
18	0,51	0,5	$2,21 \cdot 10^{-4}$
19	0,58	0,3	$3,04 \cdot 10^{-4}$
20	0,64	0,3	$4,18 \cdot 10^{-4}$
21	0,72	0,3	$5,74 \cdot 10^{-4}$
22	0,81	0,3	$7,88 \cdot 10^{-4}$
23	0,91	0,3	$1,08 \cdot 10^{-3}$
24	1,01	0,3	$1,49 \cdot 10^{-3}$
25	1,14	0,1	$2,04 \cdot 10^{-3}$
26	1,27	0,1	$2,81 \cdot 10^{-3}$
27	1,42	0,1	$3,86 \cdot 10^{-3}$
28	1,59	0,1	$5,3 \cdot 10^{-3}$
29	1,79	0,1	$7,28 \cdot 10^{-3}$
30	2	0,1	10^{-2}

2. Визначити, надаючи, для спрощення, кутовій швидкості ω значення $\omega=1$ 1/с, координату допоміжної точки K^* на діаграмі $Re-Fr$ для числа Рейнольдса ($Re^*=(\omega R^2)/\nu$) Re^* :

$$Re^* = \frac{R^2}{\nu}$$

3. Визначити, надаючи, для спрощення, кутовій швидкості ω значення $\omega=1$ 1/с, координату допоміжної точки K^* на діаграмі $Re-Fr$ для числа Фруда ($Fr^*=(\omega^2 R)/g$) Fr^* :

$$Fr^* = \frac{R}{g}$$

де $g=9,81$ м/с² – гравітаційне прискорення.

4. Визначити десяткову логарифмічну координату допоміжної точки K^* для числа Рейнольдса:

$$\lg(Re^*).$$

5. Визначити десяткову логарифмічну координату допоміжної точки K^* для числа Фруда:

$$\lg(Fr^*).$$

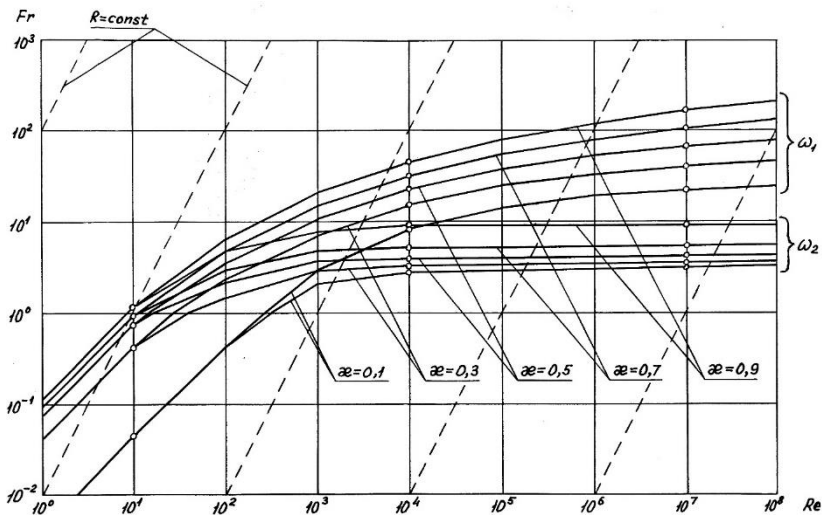


Рис. 1.2. Діаграма $Re-Fr$ меж переходу режимів течії

6. Побудувати на копії діаграми $Re-Fr$ (рис. 1.2) в логарифмічних осях за одержаними логарифмами координат $lg(Re^*)$ та $lg(Fr^*)$ допоміжну точку K^* .

7. Провести на діаграмі $Re-Fr$ (рис. 1.2) через одержану точку K^* допоміжну похилу пряму із кутовим коефіцієнтом 2, яка відповідає умові $R=const$, до перетину в точках K_1 та K_2 із лініями графіків ω_1 та ω_2 для відповідного значення ступеня заповнення камери κ .

8. Виміряти на логарифмічних осях діаграми $Re-Fr$ (рис. 1.2) логарифмічні координати одержаної точки K_1 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_1 :

$$lg(Re_1),$$

$$lg(Fr_1).$$

9. Виміряти на логарифмічних осях діаграми $Re-Fr$ (рис. 1.2) логарифмічні координати одержаної точки K_2 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_2 :

$$lg(Re_2),$$

$$lg(Fr_2).$$

10. Визначити, за одержаними логарифмічними координатами точки K_1 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_1 , її координати Re_1 та Fr_1 :

$$Re_1 = 10^{lg(Re_1)},$$

$$Fr_1 = 10^{lg(Fr_1)}.$$

11. Визначити, за одержаними логарифмічними координатами точки K_2 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_2 , її координати Re_2 та Fr_2 :

$$Re_2 = 10^{lg(Re_2)},$$

$$Fr_2 = 10^{lg(Fr_2)}.$$

12. Визначити значення кутової швидкості обертання форми при прямому переході режимів течії, що встановлено за допомогою графічного методу, $\omega_{1г}$, $1/c$:

$$\omega_{1г} = \frac{\frac{Re_1 v}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_1 g}{R}}}{2}.$$

13. Визначити значення кутової швидкості обертання

форми при зворотному переході режимів течії, що встановлено за допомогою графічного методу, $\omega_{2\Gamma}$, 1/с:

$$\omega_{2\Gamma} = \frac{\frac{Re_2 v}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_2 g}{R}}}{2}.$$

14. Визначити змінну величину G :

$$G = \lg\left(\frac{R^2}{v}\right) - \frac{1}{2} \lg\left(\frac{R}{g}\right).$$

15. Визначити змінну величину F_1 :

$$F_1 = -13,98\kappa^4 + 38,94\kappa^3 - 40,12\kappa^2 + 18,43\kappa - 3,998.$$

16. Визначити змінну величину E_1 :

$$E_1 = 5\kappa^4 - 13,91\kappa^3 + 14,31\kappa^2 - 6,33\kappa + 1,775.$$

17. Визначити змінну величину D_1 :

$$D_1 = -0,4159\kappa^4 + 1,172\kappa^3 - 1,222\kappa^2 + 0,5545\kappa - 0,1472.$$

18. Визначити змінну величину C_1 :

$$C_1 = D_1 G^2 + E_1 G + F_1.$$

19. Визначити змінну величину B_1 :

$$B_1 = D_1 G + \frac{E_1}{2} - 1.$$

20. Визначити змінну величину A_1 :

$$A_1 = \frac{D_1}{4}.$$

21. Визначити змінну величину $\lg(Fr_1)$:

$$\lg(Fr_1) = \frac{B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_1}}{-2A_1}.$$

22. Визначити значення кутової швидкості при прямому переході режимів течії, що встановлено за допомогою аналітичного методу, ω_{1a} , 1/с:

$$\omega_{1a} = \sqrt{\frac{10^{\lg(Fr_1)} g}{R}}.$$

23. Визначити відносну кутову швидкість при прямому переході режимів течії $\psi_{\omega_{1a}}$:

$$\psi_{\omega_{1a}} = \frac{\omega_{1a}}{\omega_{кр}} = \omega_{1a} \sqrt{\frac{R}{g}}$$

24. Визначити змінну величину F_2 :

$$F_2 = -15,48\kappa^4 + 41,88\kappa^3 - 42,69\kappa^2 + 19,66\kappa - 3,919.$$

25. Визначити змінну величину E_2 :

$$E_2 = 6,443\kappa^4 - 17,13\kappa^3 + 17,14\kappa^2 - 7,684\kappa + 1,699.$$

26. Визначити змінну величину D_2 :

$$D_2 = -0,5943\kappa^4 + 1,538\kappa^3 - 1,546\kappa^2 + 0,6952\kappa - 0,1528.$$

27. Визначити змінну величину C_2 :

$$C_2 = D_2 G^2 + E_2 G + F_2.$$

28. Визначити змінну величину B_2 :

$$B_2 = D_2 G + \frac{E_2}{2} - 1.$$

29. Визначити змінну величину A_2 :

$$A_2 = \frac{D_2}{4}.$$

30. Визначити змінну величину $lg(Fr_2)$:

$$lg(Fr_2) = \frac{B_2 + \sqrt{B_2^2 - 4A_2 C_2}}{-2A_2}.$$

31. Визначити значення кутової швидкості при зворотному переході режимів течії, що встановлено за допомогою аналітичного методу, ω_{2a} , 1/с:

$$\omega_{2a} = \sqrt{\frac{10^{lg(Fr_2)} g}{R}}.$$

32. Визначити відносну кутову швидкість при зворотному переході режимів течії $\psi_{\omega_{2a}}$:

$$\psi_{\omega_{2a}} = \frac{\omega_{2a}}{\omega_{кр}} = \omega_{2a} \sqrt{\frac{R}{g}}$$

33. Визначити розбіжність значень кутової швидкості ω_1 , що отримано за допомогою графічного та аналітичного методів ε_1 , %:

$$\varepsilon_1 = \frac{|\omega_{1г} - \omega_{1а}|}{\omega_{1а}} 100.$$

34. Визначити розбіжність значень кутової швидкості ω_2 , що отримано за допомогою графічного та аналітичного методів, ε_2 , %:

$$\varepsilon_2 = \frac{|\omega_{2г} - \omega_{2а}|}{\omega_{2а}} 100.$$

1.3. Приклад виконання роботи 1

Розрахункова робота 1

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІННОВАЦІЙНОГО РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ВІДЦЕНТРОВОГО ФОРМУВАННЯ ТРУБЧАСТИХ ВИРОБІВ ІЗ ТЕКУЧОГО МАТЕРІАЛУ

Мета роботи:

1. Визначити раціональні значення швидкості обертання форми для двох етапів розподілення текучого матеріалу в камері при виготовленні трубчастих виробів за допомогою графічного методу.

2. Визначити раціональні значення швидкості обертання форми за допомогою аналітичного методу.

3. Оцінити розбіжність результатів, що отримано за допомогою графічного та аналітичного методів.

1. Вихідні дані роботи: радіус камери форми $R=0,39$ м, ступінь заповнення камери форми текучим матеріалом $\kappa=0,5$, кінематичний коефіцієнт в'язкості текучого матеріалу під час розподілення $\nu=1,01 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

2. Координата допоміжної точки K^* на діаграмі $Re-Fr$ для

числа Рейнольдса:

$$Re^* = \frac{R^2}{\nu} = \frac{0,39^2}{1,01 \cdot 10^{-4}} = 1510.$$

3. Координата допоміжної точки K^* на діаграмі $Re-Fr$ для числа Фруда:

$$Fr^* = \frac{R}{g} = \frac{0,39}{9,81} = 0,0398,$$

де $g=9,81 \text{ м/с}^2$ – гравітаційне прискорення.

4. Десяткова логарифмічна координата допоміжної точки K^* для числа Рейнольдса:

$$\lg(Re^*) = \lg(1510) = 3,18.$$

5. Десяткова логарифмічна координата допоміжної точки K^* для числа Фруда:

$$\lg(Fr^*) = \lg(0,0398) = -1,4.$$

6. Виміряні на осях діаграми $Re-Fr$ логарифмічні координати точки K_1 перетину допоміжної прямої із кутовим коефіцієнтом 2, що проходить через допоміжну точку K^* , із лінії графіку ω_1 :

$$\begin{aligned}\lg(Re_1) &= 4,65, \\ \lg(Fr_1) &= 1,52.\end{aligned}$$

7. Виміряні на осях діаграми $Re-Fr$ логарифмічні координати точки K_2 перетину допоміжної прямої із кутовим коефіцієнтом 2, що проходить через допоміжну точку K^* , із лінії графіку ω_2 :

$$\begin{aligned}\lg(Re_2) &= 4,18, \\ \lg(Fr_2) &= 0,565.\end{aligned}$$

8. Координати точки K_1 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_1 :

$$\begin{aligned}Re_1 &= 10^{\lg(Re_1)} = 10^{4,65} = 44700, \\ Fr_1 &= 10^{\lg(Fr_1)} = 10^{1,52} = 33,1.\end{aligned}$$

9. Координатами точки K_2 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_2 :

$$\begin{aligned}Re_2 &= 10^{\lg(Re_2)} = 10^{4,18} = 15100, \\ Fr_2 &= 10^{\lg(Fr_2)} = 10^{0,565} = 3,67.\end{aligned}$$

10. Кутова швидкість обертання форми при прямому

переході режимів течії, що визначено графічним методом:

$$\omega_{1r} = \frac{\frac{Re_1 v}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_1 g}{R}}}{2} =$$

$$= \frac{\frac{44700 \cdot 1,01 \cdot 10^{-4}}{0,39^2} + \sqrt{\frac{33,1 \cdot 9,81}{0,39}}}{2} = 29,7 \text{ 1/с.}$$

11. Кутова швидкості обертання форми при зворотному переході режимів течії, що визначено графічним методом:

$$\omega_{2r} = \frac{\frac{Re_2 v}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_2 g}{R}}}{2} =$$

$$= \frac{\frac{15100 \cdot 1,01 \cdot 10^{-4}}{0,39^2} + \sqrt{\frac{3,67 \cdot 9,81}{0,39}}}{2} = 9,82 \text{ 1/с.}$$

12. Змінна величина:

$$G = \lg\left(\frac{R^2}{v}\right) - \frac{1}{2} \lg\left(\frac{R}{g}\right) =$$

$$= \lg\left(\frac{0,39^2}{1,01 \cdot 10^{-4}}\right) - \frac{1}{2} \cdot \lg\left(\frac{0,39}{9,81}\right) = 3,88.$$

13. Змінна величина:

$$F_1 = -13,98\kappa^4 + 38,94\kappa^3 - 40,12\kappa^2 + 18,43\kappa - 3,998 =$$

$$= -13,98 \cdot 0,5^4 + 38,94 \cdot 0,5^3 - 40,12 \cdot 0,5^2 +$$

$$+ 18,43 \cdot 0,5 - 3,998 = -0,819.$$

14. Змінна величина:

$$E_1 = 5\kappa^4 - 13,91\kappa^3 + 14,31\kappa^2 - 6,33\kappa + 1,775 =$$

$$= 5 \cdot 0,5^4 - 13,91 \cdot 0,5^3 + 14,31 \cdot 0,5^2 -$$

$$- 6,33 \cdot 0,5 + 1,775 = 0,761.$$

15. Змінна величина:

$$D_1 = -0,4159\kappa^4 + 1,172\kappa^3 - 1,222\kappa^2 + 0,5545\kappa -$$

$$- 0,1472 = -0,4159 \cdot 0,5^4 + 1,172 \cdot 0,5^3 - 1,222 \cdot 0,5^2 +$$

$$+ 0,5545 \cdot 0,5 - 0,1472 = -0,0549.$$

16. Змінна величина:

$$C_1 = D_1 G^2 + E_1 G + F_1 =$$

$$= -0,0549 \cdot 3,88^2 + 0,761 \cdot 3,88 + (-0,819) = 1,31.$$

17. Змінна величина:

$$B_1 = D_1 G + \frac{E_1}{2} - 1 = -0,0549 \cdot 3,88 + \frac{0,761}{2} - 1 =$$

$$= -0,833.$$

18. Змінна величина:

$$A_1 = \frac{D_1}{4} = \frac{-0,0549}{4} = -0,0137.$$

19. Змінна величина:

$$lg(Fr_1) = \frac{B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1C_1}}{-2A_1} =$$

$$= \frac{-0,833 + \sqrt{(-0,833)^2 - 4 \cdot (-0,0137) \cdot 1,31}}{-2 \cdot (-0,0137)} = 1,53.$$

20. Кутова швидкість при прямому переході режимів течії, що визначено аналітичним методом:

$$\omega_{1a} = \sqrt{\frac{10^{lg(Fr_1)} g}{R}} = \sqrt{\frac{10^{1,53} \cdot 9,81}{0,39}} = 29,2 \text{ 1/с.}$$

21. Відносна кутова швидкість при прямому переході режимів теч:

$$\psi_{\omega_{1a}} = \frac{\omega_{1a}}{\omega_{кр}} = \omega_{1a} \sqrt{\frac{R}{g}} = 29,2 \cdot \sqrt{\frac{0,39}{9,81}} = 5,82.$$

22. Змінна величина:

$$F_2 = -15,48\kappa^4 + 41,88\kappa^3 - 42,69\kappa^2 + 19,66\kappa - 3,919 =$$

$$= -15,48 \cdot 0,5^4 + 41,88 \cdot 0,5^3 - 42,69 \cdot 0,5^2 +$$

$$+ 19,66 \cdot 0,5 - 3,919 = -0,494.$$

23. Змінна величина:

$$E_2 = 6,443\kappa^4 - 17,13\kappa^3 + 17,14\kappa^2 - 7,684\kappa + 1,699 =$$

$$= 6,443 \cdot 0,5^4 - 17,13 \cdot 0,5^3 + 17,14 \cdot 0,5^2 -$$

$$- 7,684 \cdot 0,5 + 1,699 = 0,403.$$

24. Змінна величина:

$$D_2 = -0,5943\kappa^4 + 1,538\kappa^3 - 1,546\kappa^2 + 0,6952\kappa - 0,1528 = -0,5943 \cdot 0,5^4 + 1,538 \cdot 0,5^3 - 1,546 \cdot 0,5^2 + 0,6952 \cdot 0,5 - 0,1528 = -0,0366.$$

25. Змінна величина:

$$C_2 = D_2 G^2 + E_2 G + F_2 = (-0,0366) \cdot 3,88^2 + 0,403 \cdot 3,88 + (-0,494) = 0,519.$$

26. Змінна величина:

$$B_2 = D_2 G + \frac{E_2}{2} - 1 = -0,0366 \cdot 3,88 + \frac{0,403}{2} - 1 = -0,941.$$

27. Змінна величина:

$$A_2 = \frac{D_2}{4} = \frac{-0,0366}{4} = -0,00915.$$

28. Змінна величина:

$$\begin{aligned} \lg(Fr_2) &= \frac{B_2 + \sqrt{B_2^2 - 4A_2C_2}}{-2A_2} = \\ &= \frac{-0,941 + \sqrt{(-0,941)^2 - 4 \cdot (-0,00915) \cdot 0,519}}{-2 \cdot (-0,00915)} = 0,549. \end{aligned}$$

29. Кутова швидкість при зворотному переході режимів течії, що визначено аналітичним методом:

$$\omega_{2a} = \sqrt{\frac{10^{\lg(Fr_2)} g}{R}} = \sqrt{\frac{10^{0,549} \cdot 9,81}{0,39}} = 9,44 \text{ 1/с.}$$

30. Відносна кутова швидкість при зворотному переході режимів течії:

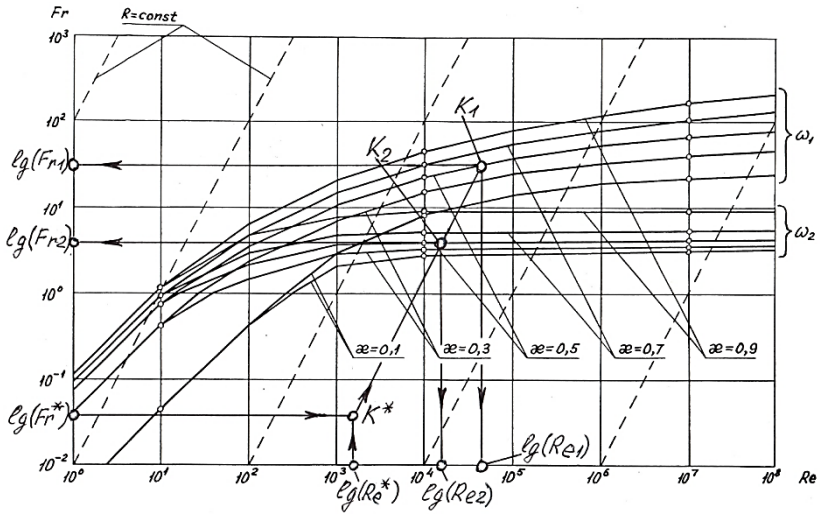
$$\psi_{\omega_{2a}} = \frac{\omega_{2a}}{\omega_{кр}} = \omega_{2a} \sqrt{\frac{R}{g}} = 9,44 \cdot \sqrt{\frac{0,39}{9,81}} = 1,88.$$

31. Розбіжність значень кутової швидкості ω_1 , що отримано графічним та аналітичним методами:

$$\varepsilon_1 = \frac{|\omega_{1г} - \omega_{1а}|}{\omega_{1а}} 100 = \frac{|29,7 - 29,2|}{29,2} \cdot 100 = 1,71 \text{ \%}.$$

32. Розбіжність значень кутової швидкості ω_2 , що отримано графічним та аналітичним методами:

$$\varepsilon_2 = \frac{|\omega_{2r} - \omega_{2a}|}{\omega_{2a}} 100 = \frac{|9,82 - 9,44|}{9,44} \cdot 100 = 4,03 \%$$



Розрахунків геометричних побудов на діаграмі $Re-Fr$

Розрахункова робота 2

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІННОВАЦІЙНОГО РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ В БАРАБАННОМУ МЛИНІ ІЗ АВТОКОЛИВНИМ ЗАВАНТАЖЕННЯМ ТА ПРУЖНИМ ЕЛЕМЕНТОМ У ПРИВОДІ

Мета роботи:

1. Визначити раціональні значення швидкості обертання барабана млина при самозбудженні автоколивень внутрішньокамерного завантаження із максимальним розмахом за допомогою графічного методу.
2. Визначити раціональні значення швидкості обертання барабана млина при самозбудженні автоколивень внутрішньокамерного завантаження із максимальним розмахом за допомогою аналітичного методу.
3. Оцінити розбіжність результатів, що отримано за допомогою графічного та аналітичного методів.
4. Визначити значення кутової жорсткості пружного елемента в приводі обертання барабана.

2.1. Вихідні дані

Інноваційний робочий процес подрібнення в барабанному млині із автоколивним завантаженням включає подавання подрібнюваного матеріалу в камеру барабана, що обертається відносно горизонтальної осі зі сталою швидкістю, та дію на нього мольольним завантаженням, якому надають пульсуючого руху в поперечному перерізі камери.

В приводі барабанного млина застосовано кутовий пружний елемент, який розміщено між передачею та барабаном. Значення кутової жорсткості пружного елемента спричинює наближення колової частоти власних кутових коливень завантаженого барабана із пружним елементом до кутової швидкості обертання барабана в режимі самозбудження автоколивень завантаження.

Такий процес забезпечує самозбудження автоколивань завантаження в поперечному перерізі камери із максимальним розмахом при виникненні явища резонансу (рис. 2.1). Це збільшує інтенсивність подрібнюючої дії на матеріал, підвищує продуктивність та тонину помелу, а також знижує динамічних навантажень на привод від автоколивань завантаженого барабана.

Значення швидкостей обертання для нижнього та верхнього біфуркаційного значення швидкості обертання завантаженого барабана ω_1 і ω_2 визначаються із урахуванням критеріїв подібності руху зернистого завантаження – числа Рейнольдса Re і числа Фруда Fr на циліндричній поверхні камери та ступеня її заповнення завантаженням κ .

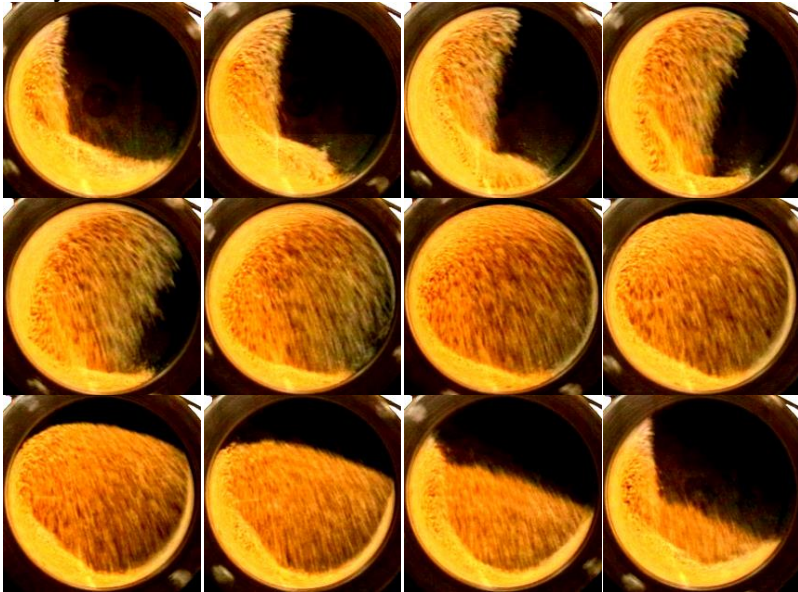


Рис. 2.1. Послідовні картини руху зернистого завантаження для одного періоду автоколивань із максимальним розмахом при ступені заповнення камери $\kappa=0,25$

За такої умови значення кутової жорсткості пружного елемента приймається не нижче величини c_2 та не вище величини

c_i , які визначаються із співвідношень [2]:

$$c_i = \frac{I\omega_i^2}{M_i^2},$$

$$\omega_{ia} = \sqrt{\frac{10^{lg(Fr_i)}g}{R}},$$

$$lg(Fr_i) = \frac{B_i + \sqrt{B_i^2 - 4A_iC_i}}{-2A_i},$$

$$A_i = \frac{D_i}{4},$$

$$B_i = D_iG + \frac{E_i}{2} - 1,$$

$$C_i = D_iG^2 + E_iG + F_i,$$

$$D_1 = -0,0273\kappa^2 + 0,01176\kappa - 0,001889,$$

$$E_1 = 0,1793\kappa^2 - 0,09029\kappa + 0,06483,$$

$$F_1 = -0,4186\kappa^2 - 0,01727\kappa + 0,1605,$$

$$D_2 = 0,001078\kappa^2 - 0,0008604\kappa + 0,001772,$$

$$E_2 = 0,008163\kappa^2 - 0,02245\kappa + 0,04668,$$

$$F_2 = 0,05714\kappa^2 - 0,2386\kappa + 0,23,$$

$$G = lg(R^2) - \frac{1}{2}lg\left(\frac{R}{g}\right),$$

$$R = R_6 - \frac{d}{2},$$

де c_i – кутова жорсткість пружного елемента, Нм/рад.; $i=1$ або 2 – індекс; I – осьовий момент інерції зернистого завантаженого барабана, кг·м²; ω_1 та ω_2 – нижнє та верхнє біфуркаційні значення швидкості обертання завантаженого барабана, рад./с; $M_1 < 1$ та $M_2 > 1$ – задані співвідношення між кутовою швидкістю обертання барабана та коловою частотою власних кутових коливань завантаженого барабана із пружним елементом; Fr_i – число Фруда; g – гравітаційне прискорення, м/с²; R – розрахунковий радіус камери барабана, м; R_6 – радіус камери барабана, м; d –

середній діаметр молольного тіла в камері барабана, m ; A_i , B_i , C_i , D_i , E_i , F_i , G – змінні величини; κ – ступінь заповнення камери барабана завантаженням.

Привод барабанного млина із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням (рис. 2.2) містить приводний двигун 1, передачу 2, пружний кутовий елемент 3 із жорсткістю c та завантажений барабан 4, що обертається із кутовою швидкістю ω і має осьовий момент інерції I . Передача 2 може складатись зі швидкохідного 5, проміжного 6 та тихохідного ступеня 7. Пружний кутовий елемент 3 разом із тихохідним ступенем 7 може бути виконаним у вигляді пасової передачі, що виконує функції тихохідного ступеня 7 передачі 2.

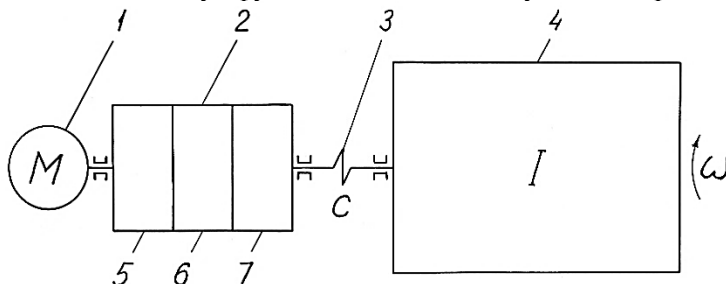


Рис. 2.2. Схема приводу барабанного млина

із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням:

- 1 – приводний двигун, 2 – передача, 3 – пружний кутовий елемент,
- 4 – завантажений барабан, 5 – швидкохідний ступінь передачі,
- 6 – проміжний ступінь передачі, 7 – тихохідний ступінь передачі

Приведення в обертання та збудження автоколивань зернистого завантаження барабана за допомогою зазначеного приводу здійснюється у такий спосіб. Завантажений барабан 4 приводять у обертання зі швидкістю ω від двигуна 1 за допомогою ступенів 5-7 передачі 2 та пружного елемента 3. Значення кутової швидкості ω підтримують у межах діапазону біфуркаційних значень. Внаслідок втрати стійкості самозбуджуються автоколивань завантаженого барабана із частотою, близькою до значення ω . Завдяки наближенню величини колової частоти власних кутових коливань завантаженого барабана 4 із пружним елементом 3 до величини

кутової швидкості ω , виникає явище резонансу. При цьому амплітуда автоколивень внутрішньокамерного завантаження набуває максимального значення, що спричинює збільшення інтенсивності подрібнюючої дії молоткових тіл на частинки зернистого матеріалу.

Виконання пружного елемента 3 разом із тихохідним ступенем 7 передачі 2 у вигляді пасової передачі дозволяє спростити конструкцію та підвищити надійність приводу, а також полегшити забезпечення виникнення явища резонансу та збільшити амплітуду автоколивень, що самозбуджуються.

Для підвищення продуктивності та тонини помелу шляхом самозбудження кутових коливень барабана та автоколивного руху завантаження в камері барабана, які збільшують інтенсивність подрібнюючої дії на матеріал, доцільно здійснювати керування процесом помелу. Воно полягає у вимірювання та змінювання кутової швидкості обертання барабана до досягнення амплітуди крутильних коливень пружного кутового елемента в приводі барабана максимального можливого значення [3].

Вихідна сировина за допомогою вантажного пристрою 1 подається в робочу камеру барабана 2 (рис. 2.3). Подрібнений матеріал за допомогою розвантажного пристрою 3 видаляється з камери. Завантажений барабан 2 приводиться в обертання за допомогою електродвигуна 4, передачі 5 та пружного крутильного елемента 6.

Амплітуда крутильних коливень пружного елемента 6 контролюється датчиком 7, що зв'язаний із блоком контролю 8, блоком аналогових сигналів 9, перетворювачем 10, погоджувачем 11 та комп'ютером 12. Швидкість обертання передачі 5 контролюється тахогенератором 13, що зв'язаний із подільником напружень 14. Швидкість обертання електродвигуна регулюється блоком перетворювача 15.

Керування швидкістю обертання завантаженого барабана здійснюється у такий спосіб. При роботі млина барабан приводиться в обертання зі швидкістю, величина якої вибирається у межах діапазону біфуркаційних значень. Через втрату стійкості руху самозбуджуються пульсації завантаженого

барабана 2, що спричинює крутильні коливання пружного елемента 6. Внаслідок варіації вмісту та складу молоткових тіл, вмісту та властивостей подрібнюваного матеріалу, а також величини швидкості обертання, амплітуда коливань елемента 6 може змінюватись.

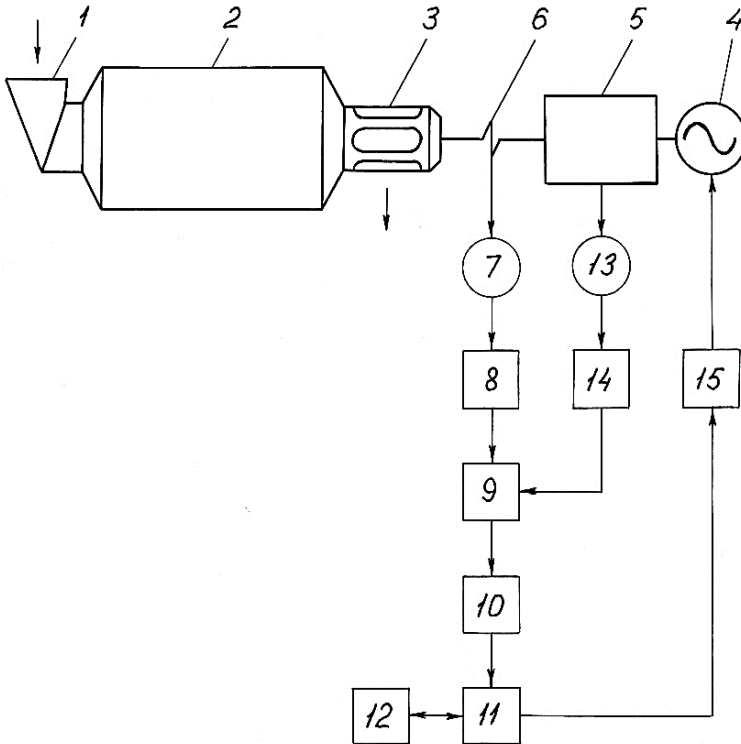


Рис. 2.3. Функціональна схема автоматичної системи керування процесом подрібнення в барабанному млині із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням:

- 1 – пристрій для завантаження вихідної сировини,
- 2 – барабан, 3 – пристрій для розвантаження продукту подрібнення,
- 4 – приводний електродвигун, 5 – передача,
- 6 – пружний кутовий елемент, 7 – датчик крутильних коливань,
- 8 – блок контролю крутильних коливань, 9 – блок аналогових сигналів,
- 10 – перетворювач, 11 – погоджувач керуючого сигналу,
- 12 – комп’ютер, 13 – тахогенератор, 14 – подільник напружень,
- 15 – блок перетворювача для регулювання швидкості обертання

Сигнал, пропорційний амплітуді крутильних коливань пружного елемента 6, з датчика 7 передається на блок 8, з якого через блок 9, перетворювач 10 та погоджувач 11 передається на комп'ютер 12. Одночасно сигнал, пропорційний швидкості обертання передачі 5, з тахогенератора 13 через подільник 14 надходить на блок 9, і далі, аналогічно до сигналу амплітуди коливань, також передається на комп'ютер 12. Комп'ютер, на основі отриманої інформації про амплітуду коливань елемента та швидкість обертання завантаженого барабана, визначає знак приросту амплітуди коливань та реалізує алгоритм безперервного пошуку функції якості залежності амплітуди від швидкості обертання. При цьому напрям регулювання швидкості обертання визначається знаком приросту амплітуди, а величина впливу задається пропорційним цьому приросту. Керуючий сигнал по швидкості від комп'ютера 12 через погоджувач 11 надходить до блоку 15, який регулює швидкість обертання млина.

2.2. Порядок виконання роботи 2

1. Вибрати за варіантом з табл. 2 вихідні дані роботи: радіус камери барабана R_0 , середній діаметр молоткового тіла в камері барабана d , ступінь заповнення камери барабана завантаженням κ , осьовий момент інерції завантаженого барабана I , співвідношення між кутовою швидкістю обертання барабана та коловою частотою власних кутових коливань завантаженого барабана із пружним елементом M_1 та M_2 .

Таблиця 2

Варіанти вихідних даних до виконання роботи 2

Варіант	R_0	d	κ	I	M_1	M_2
	M			(кг·м ²)		
1	0,025	0,001	0,5	$5 \cdot 10^{-4}$	0,95	1,05
2	0,05	0,002	0,5	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,94	1,06
3	0,1	0,004	0,5	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,93	1,07
4	0,2	0,008	0,5	$5,4 \cdot 10^{-3}$	0,92	1,08
5	0,4	0,016	0,5	$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,91	1,09
6	0,6	0,024	0,5	$2,6 \cdot 10^{-2}$	0,9	1,1
7	0,7	0,028	0,5	$5,9 \cdot 10^{-2}$	0,89	1,11
8	0,8	0,032	0,5	$1,3 \cdot 10^{-1}$	0,88	1,12
9	0,9	0,036	0,5	$2,9 \cdot 10^{-1}$	0,87	1,13
10	1	0,04	0,5	$6,3 \cdot 10^{-1}$	0,86	1,14
11	1,1	0,044	0,325	1,4	0,85	1,15
12	1,2	0,048	0,325	3,1	0,84	1,16
13	1,3	0,052	0,325	6,9	0,83	1,17
14	1,4	0,056	0,325	15	0,82	1,18
15	1,5	0,06	0,325	34	0,81	1,19
16	1,6	0,064	0,325	74	0,8	1,2
17	1,7	0,068	0,325	$1,6 \cdot 10^2$	0,79	1,21
18	1,8	0,072	0,325	$3,6 \cdot 10^2$	0,78	1,22
19	1,9	0,076	0,325	$8,1 \cdot 10^2$	0,77	1,23
20	2	0,08	0,325	$1,8 \cdot 10^3$	0,76	1,24
21	2,1	0,084	0,15	$3,9 \cdot 10^3$	0,75	1,25
22	2,2	0,088	0,15	$8,7 \cdot 10^3$	0,74	1,26
23	2,3	0,092	0,15	$1,9 \cdot 10^4$	0,73	1,27
24	2,4	0,096	0,15	$4,3 \cdot 10^4$	0,72	1,28
25	2,5	0,1	0,15	$9,4 \cdot 10^4$	0,71	1,29
26	2,6	0,104	0,15	$2,1 \cdot 10^5$	0,7	1,3
27	2,7	0,108	0,15	$4,6 \cdot 10^5$	0,69	1,31
28	2,8	0,112	0,15	10^6	0,68	1,32
29	2,9	0,116	0,15	$2,3 \cdot 10^6$	0,67	1,33
30	3	0,12	0,15	$5 \cdot 10^6$	0,66	1,34

2. Визначити розрахунковий радіус камери барабана R , м:

$$R = R_6 - \frac{d}{2}.$$

3. Визначити, надаючи, для спрощення, кутовій швидкості ω значення $\omega=1$ 1/с, координату допоміжної точки K^* на діаграмі $Re-Fr$ для числа Рейнольдса ($Re^*=(\omega R^2)/\nu$), Re^* :

$$Re^* = \frac{R^2}{\nu},$$

де $\nu \approx 10^{-3}$ м²/с – аналог кінематичної в'язкості зернистого завантаження.

4. Визначити, надаючи, для спрощення, кутовій швидкості ω значення $\omega=1$ 1/с, координату допоміжної точки K^* на діаграмі $Re-Fr$ для числа Фруда ($Fr^*=(\omega^2 R)/g$) Fr^* :

$$Fr^* = \frac{R}{g},$$

де $g=9,81$ м/с² – гравітаційне прискорення.

5. Визначити десяткову логарифмічну координату допоміжної точки K^* для числа Рейнольдса:

$$lg(Re^*).$$

6. Визначити десяткову логарифмічну координату допоміжної точки K^* для числа Фруда:

$$lg(Fr^*).$$

7. Побудувати на копії діаграми $Re-Fr$ (рис. 2.4) в логарифмічних осях за одержаними логарифмами координат $lg(Re^*)$ та $lg(Fr^*)$ допоміжну точку K^* .

8. Провести на діаграмі $Re-Fr$ (рис. 2.4) через одержану точку K^* допоміжну похилу пряму із кутовим коефіцієнтом 2, яка відповідає умові $R=const$, до перетину в точках K_1 та K_2 із лініями графіків ω_1 та ω_2 для відповідного значення ступеня заповнення камери k .

9. Виміряти на логарифмічних осях діаграми $Re-Fr$ (рис. 2.4) логарифмічні координати одержаної точки K_1 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_1 :

$$lg(Re_1), lg(Fr_1).$$

10. Виміряти на логарифмічних осях діаграми $Re-Fr$ (рис.

2.4) логарифмічні координати одержаної точки K_2 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_2 :
 $lg(Re_2), lg(Fr_2)$.

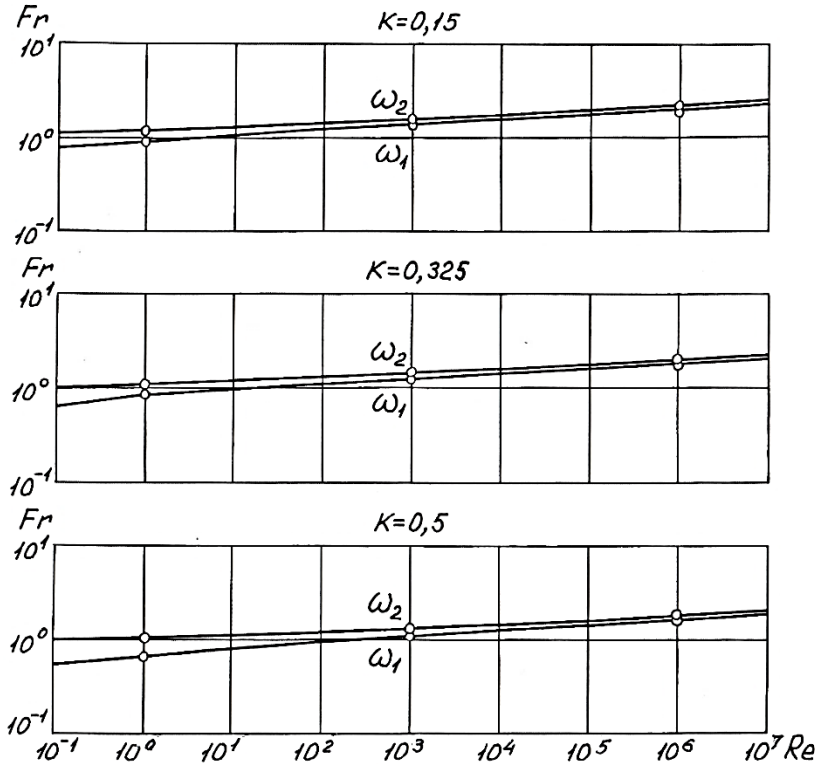


Рис. 2.4. Діаграма Re - Fr біфуркаційних швидкостей обертання
 завантаженого зернистим заповненням барабана

11. Визначити, за одержаними логарифмічними координатами точки K_1 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_1 , її координати Re_1 та Fr_1 :

$$Re_1 = 10^{lg(Re_1)}, Fr_1 = 10^{lg(Fr_1)}.$$

12. Визначити, за одержаними логарифмічними координатами точки K_2 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_2 , її координати Re_2 та Fr_2 :

$$Re_2 = 10^{lg(Re_2)}, Fr_2 = 10^{lg(Fr_2)}.$$

13. Визначити значення кутової швидкості обертання форми при прямому переході режимів течії, що встановлено за допомогою графічного методу, $\omega_{1г}$, 1/с:

$$\omega_{1г} = \frac{\frac{Re_1 v}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_1 g}{R}}}{2}.$$

14. Визначити значення кутової швидкості обертання форми при зворотному переході режимів течії, що встановлено за допомогою графічного методу, $\omega_{2г}$, 1/с:

$$\omega_{2г} = \frac{\frac{Re_2 v}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_2 g}{R}}}{2}.$$

15. Визначити змінну величину G :

$$G = lg(R^2) - \frac{1}{2} lg\left(\frac{R}{g}\right).$$

16. Визначити змінну величину F_1 :

$$F_1 = -0,4186\kappa^2 - 0,01727\kappa + 0,1605,$$

17. Визначити змінну величину E_1 :

$$E_1 = 0,1793\kappa^2 - 0,09029\kappa + 0,06483,$$

18. Визначити змінну величину D_1 :

$$D_1 = -0,0273\kappa^2 + 0,01176\kappa - 0,001889,$$

19. Визначити змінну величину C_1 :

$$C_1 = D_1 G^2 + E_1 G + F_1.$$

20. Визначити змінну величину B_1 :

$$B_1 = D_1 G + \frac{E_1}{2} - 1.$$

21. Визначити змінну величину A_1 :

$$A_1 = \frac{D_1}{4}.$$

22. Визначити змінну величину $lg(Fr_1)$:

$$lg(Fr_1) = \frac{B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_1}}{-2A_1}.$$

23. Визначити значення кутової швидкості при прямому переході режимів течії, що встановлено за допомогою аналітичного методу, ω_{1a} , 1/с:

$$\omega_{1a} = \sqrt{\frac{10^{lg(Fr_1)} g}{R}}.$$

24. Визначити відносну кутову швидкість при прямому переході режимів течії $\psi_{\omega_{1a}}$:

$$\psi_{\omega_{1a}} = \frac{\omega_{1a}}{\omega_{кр}} = \omega_{1a} \sqrt{\frac{R}{g}}.$$

25. Визначити змінну величину F_2 :

$$F_2 = 0,05714\kappa^2 - 0,2386\kappa + 0,23,$$

26. Визначити змінну величину E_2 :

$$E_2 = 0,008163\kappa^2 - 0,02245\kappa + 0,04668,$$

27. Визначити змінну величину D_2 :

$$D_2 = 0,001078\kappa^2 - 0,0008604\kappa + 0,001772,$$

28. Визначити змінну величину C_2 :

$$C_2 = D_2 G^2 + E_2 G + F_2.$$

29. Визначити змінну величину B_2 :

$$B_2 = D_2 G + \frac{E_2}{2} - 1.$$

30. Визначити змінну величину A_2 :

$$A_2 = \frac{D_2}{4}.$$

31. Визначити змінну величину $lg(Fr_2)$:

$$lg(Fr_2) = \frac{B_2 + \sqrt{B_2^2 - 4A_2 C_2}}{-2A_2}.$$

32. Визначити значення кутової швидкості при зворотному переході режимів течії, що встановлено за допомогою аналітичного методу, ω_{2a} , 1/с:

$$\omega_{2a} = \sqrt{\frac{10^{lg(Fr_2)} g}{R}}.$$

33. Визначити відносну кутову швидкість при зворотному переході режимів течії $\psi_{\omega_{2a}}$:

$$\psi_{\omega_{2a}} = \frac{\omega_{2a}}{\omega_{кр}} = \omega_{2a} \sqrt{\frac{R}{g}}$$

34. Визначити розбіжність значень кутової швидкості ω_1 , що отримано за допомогою графічного та аналітичного методів ε_1 , %:

$$\varepsilon_1 = \frac{|\omega_{1г} - \omega_{1a}|}{\omega_{1a}} 100.$$

35. Визначити розбіжність значень кутової швидкості ω_2 , що отримано за допомогою графічного та аналітичного методів, ε_2 , %:

$$\varepsilon_2 = \frac{|\omega_{2г} - \omega_{2a}|}{\omega_{2a}} 100.$$

36. Визначити кутову жорсткість пружного елемента c_1 , Нм/рад.:

$$c_1 = \frac{I\omega_{1a}^2}{M_1^2}.$$

37. Визначити кутову жорсткість пружного елемента c_2 , Нм/рад.:

$$c_2 = \frac{I\omega_{2a}^2}{M_2^2}.$$

38. Визначити середнє значення кутової жорсткості пружного елемента c , Нм/рад.:

$$c = \frac{I \left(\frac{\omega_{1a} + \omega_{2a}}{2} \right)^2}{\left(\frac{M_1 + M_2}{2} \right)^2}$$

2.3. Приклад виконання роботи 2

Розрахункова робота 2

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІННОВАЦІЙНОГО РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ В БАРАБАННОМУ МЛИНІ ІЗ АВТОКОЛИВНИМ ЗАВАНТАЖЕННЯМ ТА ПРУЖНИМ ЕЛЕМЕНТОМ У ПРИВОДІ

Мета роботи:

1. Визначити раціональні значення швидкості обертання барабана млина при самозбудженні автоколиваний внутрішньокамерного завантаження із максимальним розмахом за допомогою графічного методу.

2. Визначити раціональні значення швидкості обертання барабана млина при самозбудженні автоколиваний внутрішньокамерного завантаження із максимальним розмахом за допомогою аналітичного методу.

3. Оцінити розбіжність результатів, що отримано за допомогою графічного та аналітичного методів.

4. Визначити значення кутової жорсткості пружного елемента в приводі обертання барабана.

1. Вихідні дані роботи: радіус камери барабана $R_6=0,65$ м, середній діаметр молоткового тіла в камері барабана $d=0,026$ м, ступінь заповнення камери барабана завантаженням $\kappa=0,325$, осьовий момент інерції завантаженого барабана $I=4,2 \cdot 10^{-2}$ кг·м², співвідношення між кутовою швидкістю обертання барабана та коловою частотою власних кутових коливань завантаженого барабана із пружним елементом $M_1=0,89$ та $M_2=1,11$.

2. Розрахунковий радіус камери барабана:

$$R = R_6 - \frac{d}{2} = 0,65 - \frac{0,026}{2} = 0,637 \text{ м.}$$

3. Координата допоміжної точки K^* на діаграмі $Re-Fr$ для числа Рейнольдса:

$$Re^* = \frac{R^2}{\nu} = \frac{0,637^2}{10^{-3}} = 406,$$

де $\nu \approx 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ – аналог кінематичної в'язкості зернистого завантаження.

4. Координата допоміжної точки K^* на діаграмі $Re-Fr$ для числа Фруда:

$$Fr^* = \frac{R}{g} = \frac{0,637}{9,81} = 0,0649,$$

де $g=9,81 \text{ м/с}^2$ – гравітаційне прискорення.

5. Десяткова логарифмічна координата допоміжної точки K^* для числа Рейнольдса:

$$lg(Re^*) = lg(406) = 2,61.$$

6. Десяткова логарифмічна координата допоміжної точки K^* для числа Фруда:

$$lg(Fr^*) = lg(0,0649) = -1,19.$$

9. Виміряні на логарифмічних осях діаграми $Re-Fr$ логарифмічні координати одержаної точки K_1 перетину допоміжної прямої із лінії графіку ω_1 :

$$\begin{aligned} lg(Re_1) &= 3,25, \\ lg(Fr_1) &= 0,106. \end{aligned}$$

10. Виміряні на логарифмічних осях діаграми $Re-Fr$ логарифмічні координати одержаної точки K_2 перетину допоміжної прямої із лінії графіку ω_2 :

$$\begin{aligned} lg(Re_2) &= 3,3, \\ lg(Fr_2) &= 0,17. \end{aligned}$$

11. Координати точки K_1 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_1 :

$$\begin{aligned} Re_1 &= 10^{lg(Re_1)} = 10^{3,25} = 1780, \\ Fr_1 &= 10^{lg(Fr_1)} = 10^{0,106} = 1,28. \end{aligned}$$

12. Координати точки K_2 перетину допоміжної прямої із лінією графіку ω_2 :

$$\begin{aligned} Re_2 &= 10^{lg(Re_2)} = 10^{3,3} = 2000, \\ Fr_2 &= 10^{lg(Fr_2)} = 10^{0,17} = 1,48. \end{aligned}$$

13. Кутова швидкість обертання форми при прямому переході режимів течії, що визначено графічним методом:

$$\omega_{1r} = \frac{\frac{Re_1 v}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_1 g}{R}}}{2} = \frac{\frac{1780 \cdot 10^{-3}}{0,637^2} + \sqrt{\frac{1,28 \cdot 9,81}{0,637}}}{2} = 4,41 \text{ 1/с.}$$

14. Кутова швидкість обертання форми при зворотному переході режимів течії, що визначено графічним методом:

$$\omega_{2r} = \frac{\frac{Re_2 v}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_2 g}{R}}}{2} = \frac{\frac{2000 \cdot 10^{-3}}{0,637^2} + \sqrt{\frac{1,48 \cdot 9,81}{0,637}}}{2} = 4,85 \text{ 1/с.}$$

15. Змінна величина:

$$G = \lg(R^2) - \frac{1}{2} \lg\left(\frac{R}{g}\right) = \lg(0,637^2) - \frac{1}{2} \lg\left(\frac{0,637}{9,81}\right) = 0,202.$$

16. Змінна величина:

$$F_1 = -0,4186\kappa^2 - 0,01727\kappa + 0,1605 = -0,4186 \cdot 0,325^2 - 0,01727 \cdot 0,325 + 0,1605 = 0,111,$$

17. Змінна величина:

$$E_1 = 0,1793\kappa^2 - 0,09029\kappa + 0,06483 = 0,1793 \cdot 0,325^2 - 0,09029 \cdot 0,325 + 0,06483 = 0,0544,$$

18. Змінна величина:

$$D_1 = -0,0273\kappa^2 + 0,01176\kappa - 0,001889 = -0,0273 \cdot 0,325^2 + 0,01176 \cdot 0,325 - 0,001889 = -0,000951,$$

19. Змінна величина:

$$C_1 = D_1 G^2 + E_1 G + F_1 = (-0,000951) \cdot 0,202^2 + 0,0544 \cdot 0,202 + 0,111 = 0,122.$$

20. Змінна величина:

$$B_1 = D_1 G + \frac{E_1}{2} - 1 = (-0,000951) \cdot 0,202 + \frac{0,0544}{2} - 1 = -0,973.$$

21. Змінна величина:

$$A_1 = \frac{D_1}{4} = \frac{-0,000951}{4} = -0,000238.$$

22. Змінна величина:

$$\begin{aligned} \lg(Fr_1) &= \frac{B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1C_1}}{-2A_1} = \\ &= \frac{(-0,973) + \sqrt{(-0,973)^2 - 4 \cdot (-0,000238) \cdot 0,122}}{-2 \cdot (-0,000238)} = \\ &= 0,125. \end{aligned}$$

23. Кутова швидкість при прямому переході режимів течії, що визначено аналітичним методом:

$$\omega_{1a} = \sqrt{\frac{10^{\lg(Fr_1)} g}{R}} = \sqrt{\frac{10^{0,125} \cdot 9,81}{0,637}} = 4,53 \text{ 1/с.}$$

24. Відносна кутова швидкість при прямому переході режимів течії:

$$\psi_{\omega_{1a}} = \frac{\omega_{1a}}{\omega_{кр}} = \omega_{1a} \sqrt{\frac{R}{g}} = 4,53 \cdot \sqrt{\frac{0,637}{9,81}} = 1,15.$$

25. Змінна величина:

$$\begin{aligned} F_2 &= 0,05714\kappa^2 - 0,2386\kappa + 0,23 = \\ &= 0,05714 \cdot 0,325^2 - 0,2386 \cdot 0,325 + 0,23 = 0,158, \end{aligned}$$

26. Змінна величина:

$$\begin{aligned} E_2 &= 0,008163\kappa^2 - 0,02245\kappa + 0,04668 = \\ &= 0,008163 \cdot 0,325^2 - 0,02245 \cdot 0,325 + 0,04668 = \\ &= 0,0402, \end{aligned}$$

27. Змінна величина:

$$\begin{aligned} D_2 &= 0,001078\kappa^2 - 0,0008604\kappa + 0,001772 = \\ &= 0,001078 \cdot 0,325^2 - 0,0008604 \cdot 0,325 + 0,001772 = \\ &= 0,000161, \end{aligned}$$

28. Змінна величина:

$$\begin{aligned} C_2 &= D_2 G^2 + E_2 G + F_2 = \\ &= 0,000161 \cdot 0,202^2 + 0,0402 \cdot 0,202 + 0,158 = 0,166. \end{aligned}$$

29. Змінна величина:

$$B_2 = D_2 G + \frac{E_2}{2} - 1 = 0,000161 \cdot 0,202 + \frac{0,0402}{2} - 1 = -0,98.$$

30. Змінна величина:

$$A_2 = \frac{D_2}{4} = \frac{0,000161}{4} = 0,000403.$$

31. Змінна величина:

$$\begin{aligned} \lg(Fr_2) &= \frac{B_2 + \sqrt{B_2^2 - 4A_2C_2}}{-2A_2} = \\ &= \frac{(-0,98) + \sqrt{(-0,98)^2 - 4 \cdot 0,000403 \cdot 0,166}}{-2 \cdot 0,000403} = 0,169. \end{aligned}$$

32. Кутова швидкість при зворотному переході режимів течії, що визначено аналітичним методом:

$$\omega_{2a} = \sqrt{\frac{10^{\lg(Fr_2)} g}{R}} = \sqrt{\frac{10^{0,169} \cdot 9,81}{0,637}} = 4,77 \text{ 1/с.}$$

33. Відносна кутова швидкість при зворотному переході режимів течії:

$$\psi_{\omega_{2a}} = \frac{\omega_{2a}}{\omega_{кр}} = \omega_{2a} \sqrt{\frac{R}{g}} = 4,77 \cdot \sqrt{\frac{0,637}{9,81}} = 1,22.$$

34. Розбіжність значень кутової швидкості ω_1 , що визначено графічним та аналітичним методами:

$$\varepsilon_1 = \frac{|\omega_{1г} - \omega_{1a}|}{\omega_{1a}} 100 = \frac{|4,41 - 4,53|}{4,53} \cdot 100 = 2,65 \text{ \%}.$$

35. Розбіжність значень кутової швидкості ω_2 , що визначено графічним та аналітичним методами:

$$\varepsilon_2 = \frac{|\omega_{2г} - \omega_{2a}|}{\omega_{2a}} 100 = \frac{|4,85 - 4,77|}{4,77} \cdot 100 = 1,68 \text{ \%}.$$

36. Кутова жорсткість пружного елемента c_1 :

$$c_1 = \frac{I \omega_{1a}^2}{M_1^2} = \frac{4,2 \cdot 10^{-2} \cdot 4,53^2}{0,89^2} = 1,09 \text{ Нм/рад.}$$

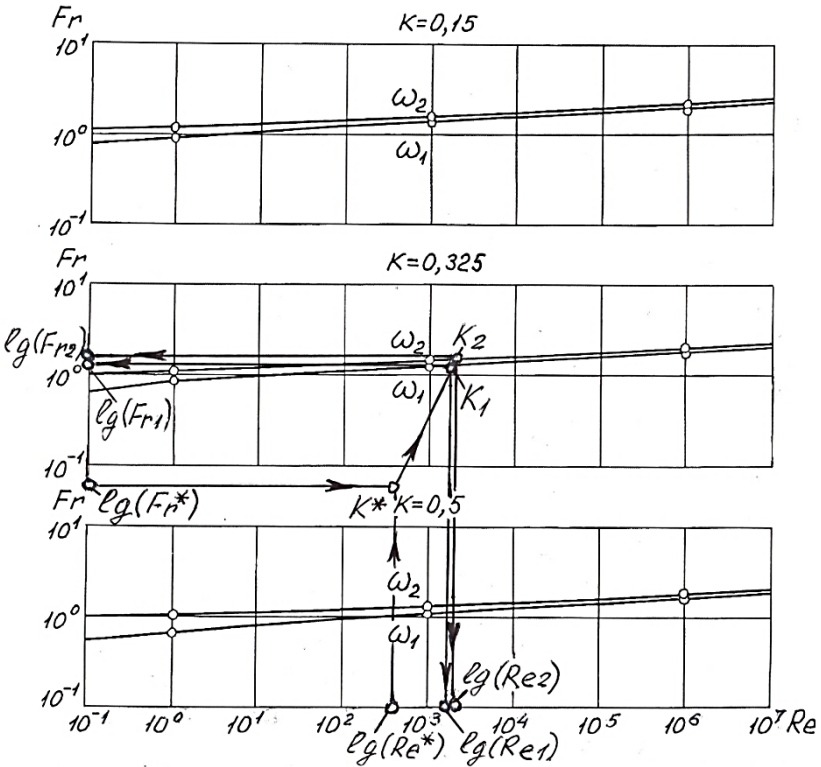
37. Кутова жорсткість пружного елемента c_2 :

$$c_2 = \frac{I\omega_{2a}^2}{M_2^2} = \frac{4,2 \cdot 10^{-2} \cdot 4,77^2}{1,11^2} = 0,776 \text{ Нм/рад.}$$

38. Середнє значення кутової жорсткості пружного елемента:

$$c = \frac{I \left(\frac{\omega_{1a} + \omega_{2a}}{2} \right)^2}{\left(\frac{M_1 + M_2}{2} \right)^2} =$$

$$= \frac{4,2 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{4,53 + 4,77}{2} \right)^2}{\left(\frac{0,89 + 1,11}{2} \right)^2} = 0,908 \text{ Нм/рад.}$$



Розрахункові геометричні побудови на діаграмі $Re-Fr$

Розрахункова робота 3

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІННОВАЦІЙНОГО РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ЗОВНІШНЬОКАМЕРНОГО БАГАТОСТАДІЙНОГО ПОДРІБНЕННЯ В ПОМОЛЬНОМУ АГРЕГАТІ ІЗ БАРАБАННИМИ МЛИНАМИ

Мета роботи:

Визначити раціональні значення розмірів робочих камер, розмірів і мас молоткових тіл та швидкостей обертання для барабанних млинів помольного агрегату зовнішньокамерного багатостадійного подрібнення.

3.1. Вихідні дані

Інноваційний робочий процес зовнішньокамерного багатостадійного подрібнення в помельному агрегаті із барабанними млинами включає перший етап грубого подрібнення при переважно ударній дії молоткового завантаження на подрібнюваний матеріал, можливі проміжні етапи середнього подрібнення та останній етап тонкого подрібнення при переважно стираючій та роздавлюючій дії завантаження на матеріал.

Перший етап подрібнення виконується при досягненні максимального значення питомої кінетичної енергії поступального руху частини завантаження, що здійснює невідільне падіння, а останній етап подрібнення виконується при досягненні максимальних значень питомих кінетичних енергій хаотичного у поперечному напрямі та поступального у поздовжньому напрямі руху зсувного шару завантаження.

Зазначене підвищує продуктивність та тонину помелу, шляхом здійснення грубого подрібнення крупних частинок переважно ударною дією при створенні великих імпульсів, які сприяють виникненню у матеріалі граничного пружного деформування, а також здійснення тонкого подрібнення малих частинок переважно стиранням та роздавлюванням при створенні малих імпульсів, які сприяють виникненню

пластичного деформування.

Перший етап подрібнення виконується при досягненні відносної швидкості обертання барабана млина грубого подрібнення значення $\psi_{\omega T}=0,85-1,05$, ступеня заповнення камери барабана завантаженням значення $\kappa_T=0,4-0,45$ та співвідношення між середнім розміром молольних тіл d_T та діаметром камери барабана D_T цього млина значення $d_T/D_T=0,015-0,04$, а останній етап подрібнення виконується при досягненні відносної швидкості обертання барабана млина тонкого подрібнення значення $\psi_{\omega T}=0,25-0,45$, ступеня заповнення камери барабана завантаженням значення $\kappa_T=0,25-0,3$ та співвідношення між середнім розміром молольних тіл d_T та діаметром камери D_T цього млина значення $d_T/D_T=0,002-0,01$.

Зазначене забезпечує досягнення максимального значення питомої кінетичної енергії поступального руху частини завантаження, що здійснює невідільне падіння, на першому етапі подрібнення, а також досягнення максимального значення питомих кінетичних енергій хаотичного у поперечному напрямі та поступального у поздовжньому напрямі руху зсувного шару завантаження на останньому етапі подрібнення.

Перший етап грубого подрібнення виконується в барабанному млині, діаметр камери D_T якого у $D_T/D_T=1,2-1,8$ разів перевищує діаметр камери D_T барабанного млина, в якому виконується останній етап тонкого подрібнення.

Зазначене збільшує величини ударних імпульсів молольних тіл частини завантаження, що здійснює невідільне падіння, завдяки підвищенню висоти падіння.

Перший етап грубого подрібнення виконується в барабанному млині, співвідношення між довжиною L_T та діаметром D_T камери якого становить $L_T/D_T=1-1,8$, а останній етап тонкого подрібнення виконується в барабанному млині, співвідношення між довжиною L_T та діаметром D_T камери якого становить $L_T/D_T=4,5-6,5$.

Зазначене підвищує продуктивність короткого млина першого етапу грубого подрібнення, що зокрема зумовлено збільшеним поперечним розміром камери, а також підвищує

тонину помелу у довгому млині останнього етапу тонкого подрібнення.

На першому етапі грубого подрібнення як молольні тіла завантаження камери використовуються кулі, а на останньому етапі тонкого подрібнення як молольні тіла завантаження камери використовується цильпелс або мініпелс.

Зазначене збільшує величини імпульсів ударної дії частини завантаження, що здійснює невідільне падіння, у млині першого етапу, та збільшує площі поверхні стираючої дії зсувного шару завантаження у млині останнього етапу.

Після подрібнення матеріалу в одному млині першого етапу грубого подрібнення, за умови відсутності млинів проміжної стадії середнього подрібнення, він подрібнюється у 2-3 млинах останнього етапу тонкого подрібнення, що працюють за паралельною схемою.

Зазначене забезпечує безперервний режим роботи помольного агрегату, зокрема при можливому перевищенні продуктивності млина першого етапу над продуктивністю млина останнього етапу подрібнення.

Після подрібнення матеріалу в одному млині першого етапу грубого подрібнення, за умови наявності млинів проміжної стадії подрібнення, він подрібнюється у 1-2 млинах проміжного етапу середнього подрібнення, що працюють за паралельною схемою.

Зазначене забезпечує безперервний режим роботи помольного агрегату, зокрема при можливому перевищенні продуктивності млина першого етапу над продуктивністю млина проміжного етапу подрібнення.

Параметри млинів можливих проміжних етапів середнього подрібнення мають проміжні значення в межах значень параметрів млинів першого та останнього етапу грубого та тонкого подрібнення, наприклад мають значення, які разом зі значеннями параметрів млинів першого та останнього етапу подрібнення утворюють послідовність чисел, що складає геометричну прогресію.

Зазначене забезпечує сприятливі умови поступового переходу процесу подрібнення в млинах проміжних етапів від

грубого до тонкого помелу шляхом пропорційної зміни значень параметрів цих млинів у напрямку від млина першого етапу до млина останнього етапу.

Загалом процес забезпечує підвищення продуктивності та тонини помелу за рахунок досягнення на різних етапах помелу максимальної ударної, стираючої та роздавлюючої дії молоткових тіл на частинки подрібнюваного матеріалу, що підвищує вибірковість підведення енергії в робочу зону з метою мінімізації енерговитрат руйнування.

Процес багатостадійного подрібнення зернистого матеріалу в барабанних млинах виконується в помельному агрегаті (рис. 3.1) що містить перший етап грубого подрібнення при переважно ударній дії тіл молоткового завантаження на частинки подрібнюваного матеріалу, можливі проміжні етапи середнього подрібнення та останній етап тонкого подрібнення при переважно стираючій та роздавлюючій дії тіл молоткового завантаження на частинки подрібнюваного матеріалу [4].

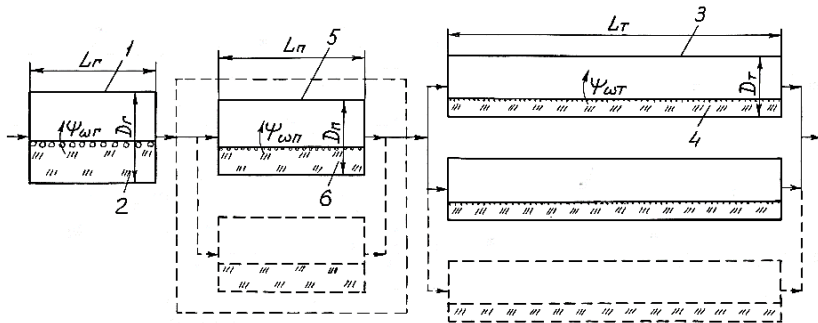


Рис. 3.1. Схема помельного агрегату для зовнішньокамерного багатостадійного подрібнення в барабанних млинах:

- 1 – млин першої стадії грубого подрібнення,
- 2 – завантаження млина першої стадії грубого подрібнення,
- 3 – млин останньої стадії тонкого подрібнення,
- 4 – завантаження млина останньої стадії тонкого подрібнення,
- 5 – млин проміжної стадії середнього подрібнення,
- 6 – завантаження млина проміжної стадії середнього подрібнення

Вихідна сировина подається у камеру 1 млина першої стадії подрібнення, де за допомогою завантаження 2 виконується грубий помел при досягненні максимального значення питомої кінетичної енергії поступального руху частини завантаження, що здійснює невільне падіння. За відсутності проміжної стадії, продукт грубого подрібнення із камери 1 подається у камери 3 млинів останньої стадії подрібнення, де за допомогою завантаження 4 виконується тонкий помел при досягненні максимальних значень питомих кінетичних енергій хаотичного у поперечному напрямі та поступального у поздовжньому напрямі руху шару завантаження. При наявності проміжної стадії, продукт грубого подрібнення із камери 1 подається у камери 5 млинів проміжної стадії, де за допомогою завантаження 6 виконується середній помел при досягненні проміжних значень питомих кінетичних енергій руху частини завантаження, що здійснює невільне падіння, та зсувного шару. Надалі продукт проміжного подрібнення із камер 5 подається у камери 3 млинів останньої стадії подрібнення.

3.2. Порядок виконання роботи 3

1. Вибрати за варіантом з табл. 3 вихідні дані роботи: діаметр камери млина першої стадії грубого подрібнення D_r .

Таблиця 3

Варіанти вихідних даних до виконання роботи 3

Варіант	<i>D_г</i>
	м
1	1,5
2	1,7
3	1,9
4	2,1
5	2,3
6	2,5
7	2,7
8	2,9
9	3,1
10	3,3
11	3,5
12	3,7
1	2
13	3,9
14	4,2
15	4,5
16	4,8
17	5,1
18	5,4
19	5,7
20	6
21	6,3
22	6,6
23	6,9
24	7,2
25	7,5
26	7,8
27	8,1
28	8,4
29	8,7
30	9

2. Визначити діаметр камери млина останньої стадії тонкого подрібнення D_T , м:

$$D_T = \frac{D_\Gamma}{(D_\Gamma/D_T)},$$

де $(D_\Gamma/D_T)=1,2-1,8$ – співвідношення між діаметрами D_Γ та D_T камери грубого та тонкого подрібнення.

3. Визначити співвідношення між діаметрами D_Γ та D_Π камери млинів грубого та проміжного подрібнення (D_Γ/D_Π) :

$$(D_\Gamma/D_\Pi) = \sqrt{(D_\Gamma/D_T)}.$$

4. Визначити діаметр камери млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення D_Π , м:

$$D_\Pi = \frac{D_\Gamma}{(D_\Gamma/D_\Pi)}.$$

5. Визначити швидкість обертання млина першої стадії грубого подрібнення ω_Γ , 1/с:

$$\omega_\Gamma = \psi_{\omega\Gamma} \sqrt{\frac{2g}{D_\Gamma}},$$

де $\psi_{\omega\Gamma}=0,85-1,05$ – відносна швидкість обертання млина першої стадії грубого подрібнення, $g=9,81$ м/с² – гравітаційне прискорення.

6. Визначити швидкість обертання млина останньої стадії тонкого подрібнення ω_T , 1/с:

$$\omega_T = \psi_{\omega T} \sqrt{\frac{2g}{D_T}},$$

де $\psi_{\omega T}=0,25-0,45$ – відносна швидкість обертання млина останньої стадії тонкого подрібнення.

7. Визначити відносну швидкість обертання млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення $\psi_{\omega\Pi}$:

$$\psi_{\omega\Pi} = \psi_{\omega\Gamma} \sqrt{\frac{\psi_{\omega T}}{\psi_{\omega\Gamma}}}.$$

8. Визначити швидкість обертання млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення ω_Π , 1/с:

$$\omega_{\Pi} = \psi_{\omega\Pi} \sqrt{\frac{2g}{D_{\Pi}}}.$$

9. Визначити довжину камери млина першої стадії грубого подрібнення L_{Γ} , м:

$$L_{\Gamma} = D_{\Gamma}(L_{\Gamma}/D_{\Gamma}),$$

де $(L_{\Gamma}/D_{\Gamma})=1-1,8$ – співвідношення між довжиною L_{Γ} та діаметром D_{Γ} камери.

10. Визначити довжину камери млина останньої стадії тонкого подрібнення L_{Γ} , м:

$$L_{\Gamma} = D_{\Gamma}(L_{\Gamma}/D_{\Gamma}),$$

де $(L_{\Gamma}/D_{\Gamma})=4,5-6,5$ – співвідношення між довжиною L_{Γ} та діаметром D_{Γ} камери.

11. Визначити співвідношення між довжиною L_{Π} та діаметром D_{Π} камери можливої проміжної стадії середнього подрібнення (L_{Π}/D_{Π}) :

$$(L_{\Pi}/D_{\Pi}) = (L_{\Gamma}/D_{\Gamma}) \sqrt{\frac{(L_{\Gamma}/D_{\Gamma})}{(L_{\Gamma}/D_{\Gamma})}}.$$

12. Визначити довжину камери млина можливої проміжної стадії проміжного подрібнення L_{Π} , м:

$$L_{\Pi} = D_{\Pi}(L_{\Pi}/D_{\Pi}).$$

13. Визначити середній розмір молольних тіл камери млина першої стадії грубого подрібнення d_{Γ} , м:

$$d_{\Gamma} = D_{\Gamma}(d_{\Gamma}/D_{\Gamma}),$$

де $(d_{\Gamma}/D_{\Gamma})=0,015-0,04$ – співвідношення між середнім розміром молольних тіл d_{Γ} та діаметром камери D_{Γ} .

14. Визначити середній розмір молольних тіл камери млина останньої стадії тонкого подрібнення d_{Γ} , м:

$$d_{\Gamma} = D_{\Gamma}(d_{\Gamma}/D_{\Gamma}),$$

де $(d_{\Gamma}/D_{\Gamma})=0,002-0,01$ – співвідношення між середнім розміром молольних тіл d_{Γ} та діаметром камери D_{Γ} .

15. Визначити співвідношення між середнім розміром молольних тіл d_{Π} та діаметром D_{Π} камери млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення (d_{Π}/D_{Π}) :

$$(d_{\Pi}/D_{\Pi}) = (d_{\Gamma}/D_{\Gamma}) \sqrt{\frac{(d_{\Gamma}/D_{\Gamma})}{(d_{\Gamma}/D_{\Gamma})}}$$

16. Визначити середній розмір молольних тіл камери млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення d_{Π} , м:

$$d_{\Pi} = D_{\Pi}(d_{\Pi}/D_{\Pi}).$$

17. Визначити масу молольних тіл камери млина першої стадії грубого подрібнення m_{Γ} , т:

$$m_{\Gamma} = \frac{\pi D_{\Gamma}^2}{4} L_{\Gamma} \kappa_{\Gamma} K_{\Gamma} \rho,$$

де $\kappa_{\Gamma}=0,4-0,45$ – ступінь заповнення завантаженням камери млина першої стадії грубого подрібнення; $K_{\Gamma}=0,6$ – коефіцієнт розпушування для кульових молольних тіл 2 камери 1 млина першої стадії грубого подрібнення (рис. 3.1); $\rho=7,85$ т/м³ – густина сталі, як матеріалу мольних тіл.

18. Визначити масу молольних тіл камери млина останньої стадії тонкого подрібнення m_{Γ} , т:

$$m_{\Gamma} = \frac{\pi D_{\Gamma}^2}{4} L_{\Gamma} \kappa_{\Gamma} K_{\Gamma} \rho,$$

де $\kappa_{\Gamma}=0,25-0,3$ – ступінь заповнення завантаженням камери млина останньої стадії тонкого подрібнення; $K_{\Gamma}=0,65$ – коефіцієнт розпушування для молольних тіл у вигляді мініпелса 4 камер 3 млинів останньої стадії тонкого подрібнення (рис. 3.1).

19. Визначити ступінь заповнення завантаженням камери млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення κ_{Π} :

$$\kappa_{\Pi} = \kappa_{\Gamma} \sqrt{\frac{\kappa_{\Gamma}}{\kappa_{\Gamma}}}$$

20. Визначити масу молольних тіл камери млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення m_{Π} , т:

$$m_{\Pi} = \frac{\pi D_{\Pi}^2}{4} L_{\Pi} \kappa_{\Pi} K_{\Pi} \rho,$$

де $K_{\Pi}=0,65$ – коефіцієнт розпушування для молольних тіл у вигляді цильпелса 6 камер 5 млинів можливої проміжної стадії середнього подрібнення (рис. 3.1).

3.3. Приклад виконання роботи 3

Розрахункова робота 3

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІННОВАЦІЙНОГО РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ЗОВНІШНЬОКАМЕРНОГО БАГАТОСТАДІЙНОГО ПОДРІБНЕННЯ В ПОМОЛЬНОМУ АГРЕГАТІ ІЗ БАРАБАННИМИ МЛИНАМИ

Мета роботи:

Визначити раціональні значення розмірів робочих камер, розмірів і мас молоткових тіл та швидкостей обертання для барабанних млинів помольного агрегату зовнішньокамерного багатостадійного подрібнення.

1. Вихідні дані роботи: діаметр камери млина першої стадії грубого подрібнення $D_{Г}=3$ м.

2. Діаметр камери млина останньої стадії тонкого подрібнення:

$$D_{Т} = \frac{D_{Г}}{(D_{Г}/D_{Т})} = \frac{3}{1,5} = 2 \text{ м,}$$

де $(D_{Г}/D_{Т})=1,5$ – прийняте значення співвідношення між діаметрами $D_{Г}$ та $D_{Т}$ камер грубого та тонкого подрібнення.

3. Співвідношення між діаметрами $D_{Г}$ та $D_{П}$ камер млинів грубого та проміжного подрібнення:

$$(D_{Г}/D_{П}) = \sqrt{(D_{Г}/D_{Т})} = \sqrt{1,5} = 1,22.$$

4. Діаметр камери млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення:

$$D_{П} = \frac{D_{Г}}{(D_{Г}/D_{П})} = \frac{3}{1,22} = 2,46 \text{ м.}$$

5. Швидкість обертання млина першої стадії грубого подрібнення:

$$\omega_{Г} = \psi_{\omega_{Г}} \sqrt{\frac{2g}{D_{Г}}} = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81}{3}} = 2,43 \text{ 1/с,}$$

де $\psi_{\omega I}=0,95$ – прийняте значення відносної швидкості обертання млина першої стадії грубого подрібнення, $g=9,81$ м/с² – гравітаційне прискорення.

6. Швидкість обертання млина останньої стадії тонкого подрібнення:

$$\omega_T = \psi_{\omega T} \sqrt{\frac{2g}{D_T}} = 0,35 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81}{2,46}} = 1,63 \text{ 1/с},$$

де $\psi_{\omega T}=0,35$ – прийняте значення відносної швидкості обертання млина останньої стадії тонкого подрібнення.

7. Відносна швидкість обертання млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення:

$$\psi_{\omega II} = \psi_{\omega T} \sqrt{\frac{\psi_{\omega T}}{\psi_{\omega I}}} = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{0,35}{0,95}} = 0,577.$$

8. Швидкість обертання млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення:

$$\omega_{II} = \psi_{\omega II} \sqrt{\frac{2g}{D_{II}}} = 0,577 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81}{2}} = 1,63 \text{ 1/с}.$$

9. Довжина камери млина першої стадії грубого подрібнення:

$$L_I = D_I(L_I/D_I) = 3 \cdot 1,4 = 4,2 \text{ м},$$

де $(L_I/D_I)=1,4$ – прийняте значення співвідношення між довжиною L_I та діаметром D_I камери.

10. Довжина камери млина останньої стадії тонкого подрібнення:

$$L_T = D_T(L_T/D_T) = 2 \cdot 5,5 = 11 \text{ м},$$

де $(L_T/D_T)=5,5$ – прийняте значення співвідношення між довжиною L_T та діаметром D_T камери.

11. Співвідношення між довжиною L_{II} та діаметром D_{II} камери можливої проміжної стадії середнього подрібнення:

$$(L_{II}/D_{II}) = (L_I/D_I) \sqrt{\frac{(L_T/D_T)}{(L_I/D_I)}} = 1,4 \cdot \sqrt{\frac{5,5}{1,4}} = 2,77.$$

12. Довжина камери млина можливої проміжної стадії проміжного подрібнення:

$$L_{\Pi} = D_{\Pi}(L_{\Pi}/D_{\Pi}) = 2,46 \cdot 2,77 = 6,81 \text{ м.}$$

13. Визначити середній розмір молольних тіл камери млина першої стадії грубого подрібнення:

$$d_{\Gamma} = D_{\Gamma}(d_{\Gamma}/D_{\Gamma}) = 3 \cdot 0,0275 = 0,0825 \text{ м,}$$

де $(d_{\Gamma}/D_{\Gamma})=0,0275$ – прийняте значення співвідношення між середнім розміром молольних тіл d_{Γ} та діаметром камери D_{Γ} .

14. Середній розмір молольних тіл камери млина останньої стадії тонкого подрібнення:

$$d_{\text{T}} = D_{\text{T}}(d_{\text{T}}/D_{\text{T}}) = 2 \cdot 0,006 = 0,012 \text{ м,}$$

де $(d_{\text{T}}/D_{\text{T}})=0,006$ – прийняте значення співвідношення між середнім розміром молольних тіл d_{T} та діаметром камери D_{T} .

15. Співвідношення між середнім розміром молольних тіл d_{Π} та діаметром D_{Π} камери млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення:

$$(d_{\Pi}/D_{\Pi}) = (d_{\Gamma}/D_{\Gamma}) \sqrt{\frac{(d_{\text{T}}/D_{\text{T}})}{(d_{\Gamma}/D_{\Gamma})}} = 0,0275 \cdot \sqrt{\frac{0,006}{0,0275}} = 0,0128.$$

16. Середній розмір молольних тіл камери млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення:

$$d_{\Pi} = D_{\Pi}(d_{\Pi}/D_{\Pi}) = 2,46 \cdot 0,0128 = 0,0315 \text{ м.}$$

17. Маса молольних тіл камери млина першої стадії грубого подрібнення:

$$m_{\Gamma} = \frac{\pi D_{\Gamma}^2}{4} L_{\Gamma} \kappa_{\Gamma} K_{\Gamma} \rho = \frac{3,14 \cdot 3^2}{4} \cdot 4,2 \cdot 0,425 \cdot 0,6 \cdot 7,85 = 59,4 \text{ т,}$$

де $\kappa_{\Gamma}=0,425$ – прийняте значення ступеня заповнення завантаженням камери млина першої стадії грубого подрібнення; $K_{\Gamma}=0,6$ – коефіцієнт розпушування для кульових молольних тіл камери млина першої стадії грубого подрібнення; $\rho=7,85 \text{ т/м}^3$ – густина сталі, як матеріалу мольних тіл.

18. Маса молольних тіл камери млина останньої стадії тонкого подрібнення:

$$m_T = \frac{\pi D_T^2}{4} L_T \kappa_T K_T \rho = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} \cdot 11 \cdot 0,275 \cdot 0,65 \cdot 7,85 = 48,5 \text{ т},$$

де $\kappa_T=0,275$ – прийняте значення ступеня заповнення завантаженням камери млина останньої стадії тонкого подрібнення; $K_T=0,65$ – коефіцієнт розпушування для молольних тіл у вигляді мініпесба камер млинів останньої стадії тонкого подрібнення.

19. Ступінь заповнення завантаженням камери млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення:

$$\kappa_{\Pi} = \kappa_T \sqrt{\frac{\kappa_T}{\kappa_T}} = 0,425 \cdot \sqrt{\frac{0,275}{0,425}} = 0,342.$$

20. Маса молольних тіл камери млина можливої проміжної стадії середнього подрібнення:

$$m_{\Pi} = \frac{\pi D_{\Pi}^2}{4} L_{\Pi} \kappa_{\Pi} K_{\Pi} \rho = \frac{3,14 \cdot 2,46^2}{4} \cdot 6,81 \cdot 0,342 \cdot 0,65 \cdot 7,85 = 56,5 \text{ т},$$

де $K_{\Pi}=0,65$ – коефіцієнт розпушування для молольних тіл у вигляді цильпесба камер млинів можливої проміжної стадії середнього подрібнення.

Список літератури

1. Патент UA17101U, МПК6 В28В 21/02. Спосіб відцентрового виготовлення трубчастих виробів з текучого матеріалу / Науменко Ю. В., Науменко К. Ю.; заявник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u200602321; заяв. 02.03.2006; опубл. 15.09.2006, Бюл. № 9, 2006 р.

2. Патент UA58175U, МПК6 В02С 17/24. Привод барабанного млина із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням / Дейнека К. Ю.; заявник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u201009020; заяв. 19.07.2010; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7, 2011 р.

3. Патент UA57104U, МПК6 В02С 25/00. Спосіб керування процесом подрібнення в барабанному млині із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням / Дейнека К. Ю.; заявник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u201009048; заяв. 19.07.2010; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 3, 2011 р.

4. Патент UA58177U, МПК6 В02С 17/00. Спосіб багатостадійного подрібнення в барабанних млинах / Науменко Ю. В.; заявник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u201009043; заяв. 19.07.2010; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7, 2011 р.

5. 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>

6. Науменко Ю. В., Дейнека К. Ю. Теоретичні основи робочих процесів машин барабанного типу : монографія. Рівне : НУВГП, 2014. 531 с.

7. Науменко Ю. В. Основи теорії робочих процесів барабанних млинів : монографія. Рівне : НУВГП, 2014. 336 с.

8. Науменко Ю. В. Основи теорії режимів роботи барабанних млинів : монографія. Рівне : Видавництво СПД Зелент О. І., 2009. 282 с.

9. Науменко Ю. В. Рекомендації до розрахунку,

проекування та експлуатації барабанних млинів багатостадійного подрібнення. Рівне : Видавництво СПД Зелент О. І., 2009. 88 с.

10. 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>

11. 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>

12. 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>

13. 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>

Додаток

ФЕНОМЕНОЛОГІЯ ШВИДКИХ ЗСУВНИХ ТЕЧІЙ ЗЕРНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Зсувні потоки зернистих середовищ є предметом інтенсивного дослідження та входять до числа пріоритетних об'єктів, що вивчаються механікою рідини, механікою ґрунтів, реологією та статистичною фізикою. Особлива увага прикуто до ініційованих гравітацією зсувних потоків, що обумовлено їх широким прикладним значенням для численних технологічних об'єктів, функціонуючих за участю дисперсної твердої фази (тепломасообміні, хімічні та гідромеханічні процеси, допоміжні операції транспортування, дозування, завантаження та зберігання), та природних геофізичних явищ (лавини, селі, каменепади, зсуви, експансія пісків у дюнах та інш.).

Крім того, незгасаючий науковий інтерес до вивчення течій зернистих середовищ підтримується спонтанно внаслідок багатой феноменології, яку демонструють зернисті матеріали. Залежно від масштабу об'єкта та умов його існування зернисті матеріали можуть виявляти властивості незвичайного твердого тіла, газу або специфічної рідини [1], що супроводжується постійно зростаючим числом фундаментальних питань, пов'язаних з необхідністю пояснення цих властивостей [2, 3]. Різноманітну феноменологію зернистих матеріалів можна спостерігати на прикладі кварцового піску, який може служити міцною основою для величезних будівельних конструкцій і текти подібно до рідини в пісочному годиннику або газу при експансії дюн.

З багатьох питань, що мають фундаментальне значення, виділяються питання, пов'язані з формулюванням визначальних співвідношень, описуючих різноманітність реологічної поведінки незв'язних зернистих матеріалів. Внаслідок проблем опису течій для такого роду матеріалів відсутні визначальні співвідношення, подібні до рівняння Нав'є-Стокса для класичних рідин. Проблеми формулювання універсальних визначальних співвідношень для течій зернистих матеріалів пояснюються їх неординарними фізичними властивостями, що

свідчать про їхню мезоскопічну дискретну та гетерогенну фізичну природу. Серед таких властивостей визначальними є високі та важко ідентифіковані дисипативні ефекти взаємодії частинок, складність визначення принципів переходу від характеристик об'єкта на мікрорівні (на рівні окремої частки) до макроскопічних характеристик потоку та відсутність можливості використовувати для опису стану матеріалу універсального параметра – термодинамічної температури [4]. Велика непередбачувана феноменологія течій зернистих середовищ ще не піддається нашому розумінню і ніякої теоретичної основи, відкритої найближчим часом доступ до опису різноманітних спостережуваних форм поведінки зернистих середовищ, немає [3].

Внаслідок цього, в залежності від швидкості зсувної деформації розрізняють три характерні режими течій зернистих матеріалів [1, 5]. При малих швидкостях деформації має місце режим квазістатичної (квазіпластичної) течії, при якому частинки перебувають в тривалих контактах одна з одною, які супроводжуються їх фрикційною взаємодією. При високих швидкостях деформації спостерігається режим швидкої зсувної течії, коли зернистий матеріал входить у стан, що отримав назву «газу твердих частинок», що супроводжується швидко протікаючими ударними контактними взаємодіями. Крім названих режимів виділяють перехідний режим течії, при якому зернистий матеріал виявляє властивості і в'язкопластичної рідини і газу. У перехідному режимі течії зернистого матеріалу напруги генеруються внаслідок і фрикційних і ударних взаємодій частинок. Надалі аналізуються особливості феноменологічного опису течій у режимі швидких зсувних деформацій, як найбільш характерного для гравітаційних течій, та обговорюються фізичні закономірності квазіміжфазного переходу

Піонерською роботою, яка зробила надзвичайно важливий внесок у розробку визначальних співвідношень для швидких зсувних течій зернистих середовищ стала робота Bagnold [6]. Достовірність отриманих ним фундаментальних результатів надалі неодноразово підтверджено, наприклад, шляхом 2D та 3D імітаційного моделювання [7] та ретельно виконаних

експериментальних досліджень [8]. Разом з тим, результати багатьох досліджень [7, 9, 10] свідчать про обмежені можливості прикладного використання так званого масштабування (scaling) Bagnold, що визначає залежність зсувних і нормальних P напружень від другого ступеня добутку швидкості зсуву ϕ та діаметра d частинок:

$$\tau = \rho d^2 f_1(v) \phi^2; \quad P = \rho d^2 f_2(v) \phi^2, \quad (1)$$

де ρ – щільність частинок; $f_1(v)$, $f_2(v)$ – функції об'ємної частки частинок у потоці v .

Обмежені можливості масштабування Bagnold пояснюються множиною неврахованих особливостей формування напружень у зсувному потоці, серед яких насамперед називається [11] складніший дисипативний механізм взаємодії частинок, аналіз якого не може бути обмежений лише використанням основних положень статистичної механіки. Крім того, поряд з механізмом генерування напружень шляхом передачі ударних імпульсів через поверхню зсуву, єдино прийнятним до уваги Bagnold виявляє себе і потоковий механізм, який є наслідком перенесення кількості руху вздовж градієнта швидкості зсуву за рахунок поперечної квазидифузії частинок. При цьому механізм генерування напружень через зіткнення частинок домінує при їх високій концентрації в потоці, а поточний механізм – при низькій [11].

Для коректного обчислення частоти зіткнень часток знадобився облік ефектів дисипації їх кінетичної енергії, що пов'язано з необхідністю розв'язку рівняння збереження енергії для елементарного об'єму потоку зернистого середовища [12, 13]. Внаслідок ефектів дисипації енергії, обумовлених її розсіюванням при терті та пружної деформації взаємодіючих частинок, формується розподілене за обсягом потоку негативне джерело енергії. Відповідний потік розсіювання енергії разом із потоком енергії зсувної деформації, що генерується гравітацією, і потоками кондуктивності квазітеплової енергії щодо елементарного обсягу потоку дозволяють записати диференціальне рівняння збереження енергії при зсувній течії зернистого середовища.

Необхідність обліку в енергетичному балансі кінетичної енергії частинок, обумовленої їх хаотичними переміщеннями при зіткненнях, ініціювала введення параметра стану середовища, що відображає питомих значення відповідної енергії і отримав назву «температура зернистої середовища» (англ. Granular Temperature) [10, 13]. Існують різні варіанти виразів температури зернистого середовища. Традиційне формулювання температури відображає середнє для нульового проміжку часу значення квадрата швидкості зростання флуктуацій щодо деякої статистично значущої сукупності частинок [10]. Однак досить часто, наприклад, у роботах [14, 15], температуру визначають, як відповідну середню питому кінетичну енергію частинок потоку. Згідно з останнім варіантом формулювання температури $\theta(x, y, t)$ рівняння збереження енергії в одиниці об'єму швидкого зсувного двовимірного гравітаційного потоку зернистого середовища без урахування енергії турбулентних пульсацій записується в наступному вигляді [10]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + u_y \frac{\partial \theta}{\partial y} = \mu_{\text{dyn}} P \frac{\partial u_x}{\partial y} - \gamma, \quad (2)$$

де u_x, u_y – середні компоненти швидкості поступального переміщення частинок у поздовжньому x та поперечному y напрямках відповідно; t – час; P – нормальна напруга; μ_{dyn} – динамічний коефіцієнт внутрішнього тертя, який визначається як відношення зсувної напруги до нормального τ_{yx}/P ; γ – потік дисипації кінетичної енергії частинок.

В умовах усталеної гравітаційної течії без турбулентних пульсацій потік дисипації енергії відповідно до (2) може бути виражений у такому вигляді [12]:

$$\gamma = \gamma_{\text{col}} = \tau_{yx}^{\text{col}} \frac{du_x}{dy} = NFD, \quad (3)$$

де N – число частинок в одиниці об'єму потоку, що визначається як функція об'ємної частки твердої фази; F – частота зіткнень для одну частку; D – втрата кінетичної енергії часткою у розрахунок на одне зіткнення внаслідок ефектів поверхневого тертя, пружності та в'язкісного опору середовища, що заповнює простір між частинками.

Традиційне формулювання співвідношення між потоками енергії, генерованої зсувом, і дисипації у вигляді виразу (3) свідчить про те, що зсувні напруження в потоці видаються виключно як наслідок обміну частинок ударними імпульсами через поверхню зсуву. При цьому без урахування залишається ще один очевидний механізм генерування напружень, що називається потоковим [11], обумовлений поперечним перенесенням твердої фази і, як наслідок, відповідної кількості руху.

Очевидно, що наслідком такого ординарного підходу до механізму генерування зсувних напружень є традиційний односторонній погляд на температуру зернистого середовища, як на параметр, що відображає кінетичну енергію частинок, обумовлену винятково їх флуктуаціями. Водночас очевидно, що зсувне напруження є результатом дії імпульсів сили, поздовжньо орієнтованих на поверхні зсуву і є наслідком зміни кількості руху в потоках частинок, що взаємодіють через цю поверхню. Перенесення кількості руху відбувається за наявності у частинок відносної зсувної швидкості внаслідок не тільки контактної взаємодії, а й поперечного масопереносу. З урахуванням цього цілком правомірно температуру зернистого середовища подати у вигляді кінетичної енергії частинок, які вони мають внаслідок всього комплексу елементарних взаємних відносних переміщень, що призводять до генерування напруги. Таким чином, у ряді такого роду відносних переміщень крім флуктуацій частинок слід врахувати і їхнє відносне зсувне переміщення, і поперечний масоперенос. Відповідно до цього підходу температуру зернистого середовища у рівнянні (2) слід подати у вигляді комплексу [16]

$$\theta = \theta_{sh} + \theta_{fl} + \theta_{tr}, \quad (4)$$

де θ_{sh} , θ_{fl} , θ_{tr} – складові температури (кінетичної енергії частинок) зернистого середовища, обумовлені відносними зсувними переміщеннями, хаотичними флуктуаціями і поперечним квазидифузійним переносом відповідно.

Важливо більш строго логіку відзначити запропонованого підходу до визначення температури зернистого середовища у відношенні можливості характеристики і квазіпластичних течій,

в яких флуктуації частинок можуть бути нехтовно малими, і умови переходу від стану псевдорідини до стану твердого тіла. Очевидно, що умови переходу «псевдорідина – тверде тіло» будуть логічно визначатися і границею текучості, і нульовим значенням температури зернистого середовища при нульовому значенні швидкості зсуву. Таким чином, запропонований варіант формулювання температури зернистої середовища вносить визначений вклад у розвиток теоретичної бази для універсального підходу до аналізу різних режимів зсувних течій зернистих середовищ.

Разом з тим викладений підхід вимагає проведення додаткового аналізу у відношенні формулювань, що визначають співвідношення параметрів, що входять у рівняння збереження енергії (2). Зазначене відноситься як до формулювання зсувного напруження τ_{yx} , так і до виразу потоку дисипації енергії γ .

Відповідно до запропонованого підходу, зсувні напруження в швидкому гравітаційному потоці зернистого матеріалу будуть результатом обміну частинок суміжних шарів, що контактують через поверхню зсуву, імпульсами згідно з ударним і поточним механізмом. При припущенні відсутності кореляції поточного і ударного механізму передачі імпульсів загальне зсувне напруження буде визначатися як алгебраїчна сума двох складових напружень. Традиційна складова кінетичного напруження τ_{yx}^{col} , що залежить від швидкості зсуву, яка генерується внаслідок обміну тангенціальними ударними імпульсами частинок суміжних шарів, що взаємодіють через поверхню зсуву. Ще одна складова напруги τ_{yx}^{tr} зумовлена зміною поздовжнього імпульсу в суміжних шарах зсувного потоку внаслідок квазидифузійного масопереносу частинок, що акумулюють різну кількість руху. Як наслідок загальне кінетичне зсувне напруження буде визначено шляхом сумування зазначених його складових

$$\tau_{yx} = \tau_{yx}^{col} + \tau_{yx}^{tr}. \quad (5)$$

Механізм генерування складових напружень τ_{yx}^{col} ударними імпульсами є найбільш очевидним і єдиним традиційним застосуванням для виразів, що залежать від

швидкості зсуву кінетичних напружень. Традиційно кінетичні напруження виражають у припущенні їх генерування виключно ударними імпульсами, вважаючи зштовхування частинок бінарними і такими, що відбуваються в умовах або ізотропного розподілу контактних точок по поверхні частинок, що зштовхуються [12], либо анізотропного [17]. Анізотропний розподіл контактних точок підтверджується методами статистичної механіки [17] та результатами DEM-моделювання [18]. Очевидно, що внаслідок суттєвої ролі відносно зсувної швидкості частинок у про- цесах переносу імпульсів при швидкому здвигу [11, 12], припущення про ізотропний розподіл контактних точок (кутів зштовхування) на поверхні часток, що взаємодіють, є грубим припущенням. Звідси випливає, що повна аналогія с молекулярним хаосом Больцмана в разі відносно щільних потоків зернистих середовищ є досить грубим припущенням, що перешкоджає проведенню інтегральної оцінки умов зштовхування частинок, яка є необхідною для безумовного застосування кінетичної теорії. У зв'язку з цим формулювання, що визначає співвідношення, що встановлюють взаємозв'язок між напругою, об'ємною часткою частинок, швидкістю зсуву i , відповідно, температурою зернистого середовища, доцільно переважно проводити із урахуванням анізотропного розподілу контактних точок на поверхні частинок, що сполучаються, які задіяні в передачі тангенціальних імпульсів. Урахування анізотропії може бути здійснено або шляхом визначення умов зштовхування частинок в залежності від їх об'ємної частки в потоці з використанням методів статистичної механіки [6, 13], або евристичними методами. В останньому випадку умови взаємодії частинок враховуються, наприклад, шляхом введення безрозмірних комплексів, в залежності від яких формулюються визначальні співвідношення для основних реологічних характеристик зсувних потоків. Прикладом успішного евристичного підходу до формулювання, що визначає співвідношення можуть послужити співвідношення, що дозволяє вичислити зсувне напруження τ_{yx} і об'ємну долю частинок v , а в результаті і дилатансії, в залежності від числа інерції I [19, 20]:

$$\tau_{yx} = P\mu(I); \quad v = v(I), \quad (6)$$

де $\mu(I)$ – динамічний коефіцієнт внутрішнього тертя, який визначається як відношення зсувного напруження до нормального.

Число інерції I інтерпретується авторами [19] як відношення мікроструктурного $d/(P/\rho)^{0.5}$ і макроструктурного $1/\varphi$ масштабів часу

$$I = \frac{\varphi d}{\sqrt{P/\rho}}, \quad (7)$$

де φ – швидкість зсуву; d – діаметр частинок; P – тиск; ρ – густина частинок.

Для ідентифікації видів функцій $\mu(I)$ і $v(I)$ використані результати віртуального експерименту, виконаного методом DEM-моделювання, які свідчать, що коефіцієнт внутрішнього тертя збільшується зі збільшенням числа інерції I , стабілізується в перехідному режимі і дещо знижується зі збільшенням I в режимі швидкої зсувної течії. Коефіцієнт зовнішнього тертя частинок здійснює лише невеликий вплив на ефективне внутрішнє тертя, за рахунок абсолютно гладких часток. Об'ємна частка твердої фази знижується зі збільшенням I за лінійним законом. Із урахуванням результатів віртуального експерименту шукані функції представлено у такому вигляді [19]:

$$\mu(I) = \mu_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{I_0/I + 1}; \quad v(I) = v_{\max} + (v_{\min} - v_{\max})I. \quad (8)$$

У відповідності з підходом граничні значення коефіцієнту внутрішнього тренування μ_1 і μ_2 , об'ємної частки частинок у потоці v_{\min} , v_{\max} , а також мінімальне порогове значення числа інерції I_0 , що входять до виразів (8), ідентифікуються для конкретного матеріалу. Очевидно, що необхідність у такій ідентифікації реологічних параметрів істотно знецінює теоретичну значущість запропонованого підходу.

У той же час, залежності (8) містять надзвичайно важливу для інженерної практики інформацію, що стосується стану зсувного потоку зернистого середовища. У комплексі залежності (8) встановлюють взаємозв'язок між найважливішими гідродинамічними, структурними та кінематичними

параметрами течії. Так, друге з наведених виразів (8) описує залежність дилатансії потоку від відносної зсувної швидкості частинок ϕd та нормального тиску P , що демонструється при представленні виразів у розвернутому вигляді

$$v = v_{\max} + (v_{\min} - v_{\max}) \frac{\phi d}{\sqrt{P/\rho}}. \quad (9)$$

Аналіз залежності (9) свідчить про її напівемпіричну природу і надзвичайно спрощену фізичну моделі об'єкта, яку було взято за основу при її формулюванні. Прийняті допущення про відсутність ефектів тертя та пружності, а також визначальної ролі відносної зсувної швидкості частинок в обмеженому діапазоні змін їх об'ємної частки в потоці дозволили авторам [19] отримати просту і зручну для інженерного застосування форму рівнянь стану зернистого середовища при зсувній течії.

Однак критичний аналіз, який багато в чому співпадає з думками авторів [3, 19], показує, що, незважаючи на перспективи використання запропонованих рівнянь стану для опису різних режимів зсувних течій, вони не відображають деталі фізичних механізмів взаємодії частинок навіть в обмежених умовах квазіпластичної течії. Тем більше, важко розрахувати на прогностичні можливості рівнянь при певних умовах граничних переходів з режиму псевдорідкої течії у стан твердого тіла або газу твердих частинок.

У цьому відношенні більш перспективним видається рівняння стану зернистого середовища, що має більш багату феноменологію, яка передбачає наявність формальної аналогії динаміки зсувної течії зернистого середовища з динамікою густого газу [16, 20]

$$P\bar{\varepsilon} = \chi\theta, \quad (10)$$

де P – нормальний тиск; $\bar{\varepsilon}(y) = \frac{\varepsilon(y) - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon(y)}$ – дилатансія зернистого матеріалу; ε – порожнистість (частка вільного об'єму) в потоці зернистого середовища; ε_0 – порожнистість середовища в умовах вільної густої (неорганізованої) насипки її частинок (для однорідних сферичних частинок $\varepsilon_0=0,4$); χ – коефіцієнт рівняння стану зернистого середовища; y – координата, що збігається з

направленням градієнту швидкості зсуву; θ – температура зернистої середовища.

Багатоманітність феноменологічних аспектів рівняння стану (10) пояснюється відносно строгим фізичним змістом встановлюваного ним взаємозв'язку фізичних параметрів та більш широким осмисленням універсального параметру стану потоку, що називається температурою зернистої середовища θ . У правій частині рівняння стану стоїть температура зернистого середовища, що визначає кінетичну енергію частинок, яку вони мають, беручи участь у різних формах взаємних переміщень в потоці (4). При цьому важливо відзначити, що складові температури визначені як функції швидкості зсуву з урахуванням дисипативних втрат енергії при терті, пружної деформації контактуючих частинок та в'язкості їх третя в середовищі, що заповнює вільний простір [16, 20]. Добуток же у лівій частині рівняння відповідає роботі, що здійснюється частинками при зсуві зернистого середовища і яка спричинює дилатансію в розрахунку на одиницю об'єму твердої фази. У зв'язку з цим коефіцієнтом χ може бути позиціонована як характеристика, що відображає співвідношення між роботою, що здійснюванюють частинкам в процесі зсувної дилатансії середовища, та кінетичної енергії частинок, обумовленої їх взаємним переміщенням в потоці. Доцільність урахування різних форм взаємних переміщень частинок при визначенні температури пояснюється розумінням того, що кожна з форм, очевидно, вносить певний внесок у дилатацію потоку.

Рівняння стану зернистого середовища в умовах зсувної деформації (10) характеризується досить високими прогностичними властивостями. Це підтверджується результатами дослідження залежності коефіцієнта взаємозв'язку χ , що входить в рівняння, від умов течії. Наведені на рис. 1 результати свідчать про відносно стабільних значеннях коефіцієнта χ у широкому діапазоні кутів нахилу шорсткого скату і висоти шару, що носить високу визначеність у кореляції динамічних, кінематичних та структурних параметрів зсувного потоку.

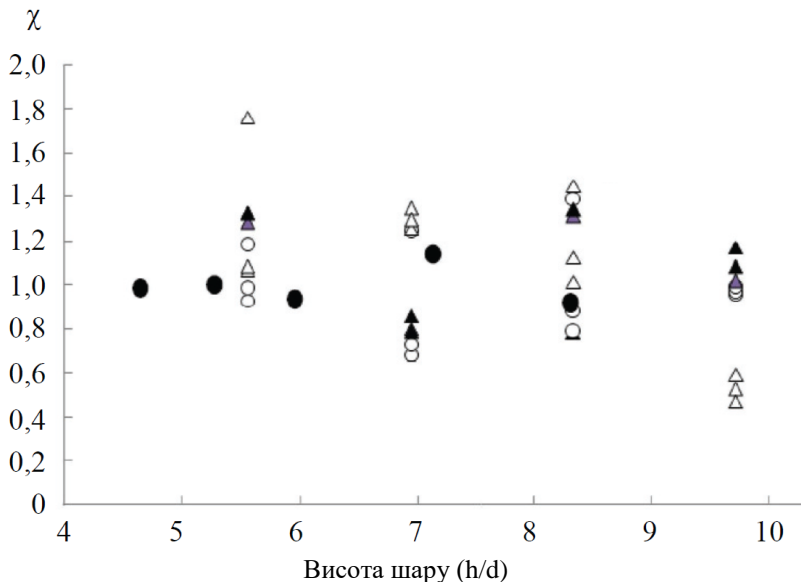


Рис. 1. Коефіцієнт χ рівняння стану (10) як функція відношення товщини шару h до діаметру частинок d при швидкій гравітаційній течії скляного бісеру для різних значень відносного кута шорсткого схилу $\sin\alpha/\sin\alpha_0$ (α_0 – кут природного укусу матеріалу) [21]:

○ – 1; ● – 1,03; △ – 1,08, ▲ – 1,12

Викладене фізичне уявлення про температуру зернистого середовища, що входить в рівняння стану (10), перебуває у відповідності з реологічними механізмами зсувної течії (4). Один із механізмів є традиційним і визначає зсувні напруження τ_{yx}^{col} як наслідок переносу ударних імпульсів. Даний механізм теоретично відносно непогано пророблений [10–12] і тут додатково не розглядається. У відповідності з іншим же механізмом зсувного напруження τ_{yx}^{tr} генерується внаслідок поперечного переносу кількості руху частинок, що берить участь у поперечному квазидифузійному масопереносі. На відміну від першого механізму, механізм генерування напружень за рахунок передачі імпульсів під дію поперечного масопереносу є набагато менше вивченим і потребує в теоретичному обґрунтування. Аналіз цього механізму з позицій молекулярно-кінетичної теорії

показує, що для його розуміння найбільш важливі фізичні поняття проникливості, дифузії і в'язкості [22]. Видається, що особлива увага при цьому повинна бути приділена аналізу явища проникливості, що лежить в основі ефектів і дифузії і в'язкості.

Чим вища проникливість середовища, тим інтенсивнішим є потік самодифузії і тим вище внесок виникаючих при цьому поперечних потоків частинок на зміну поздовжньої складової кількості руху в елементарних шарах потоку, що взаємодіють через поверхню зсуву. Звідси випливає, що підвищення проникності зернистого середовища призводить до посилення псевдов'язкіних ефектів. Відповідно до молекулярно-кінетичної теорії проникливість середовища зростає зі збільшенням довжини вільного пробігу частинок. Результати досліджень структурних та кінематичних характеристик швидких гравітаційних течій зернистих матеріалів [16, 23] свідчать про те, що довжини вільного пробігу неоднорідних частинок мало помітні і можуть бути прийняті рівними середній відстані між частинками s . Такий, на перший погляд парадоксальний результат є наслідком істотно більш високих значень відносної зсувної швидкості частинок, порівняно зі середньою швидкістю їх флуктуацій ($d(\text{dux}/dy) \gg V'$).

Крім того, схильність середовища до самопроникнення зростає прямолінійно зі збільшенням швидкості флуктуацій V' її елементарних частинок. Таким чином самопроникливість зернистого середовища проявляє себе як фізичний параметр, величина якого пропорційна добутку швидкості флуктуацій та довжини вільного пробігу частинок sV' . Однак згідно з молекулярно-кінетичною теорією даний добуток твір фізичних величин застосовують для визначення коефіцієнта дифузії, який може бути використаний для оцінки інтенсивності зустрічних зрівноважених потоків, однорідних частинок, що хаотично переміщуються, (квазідифузійного перемішування). Зазначене дозволяє ідентифікувати коефіцієнт дифузії як абстрактну характеристику інтенсивності проникливості середовища [22] та поперечного масопереносу.

Внаслідок поперечного масопереносу у зсувному потоці зернистого середовища проявляє себе в'язкісний ефект, величина

якого зростатиме пропорційно проникливості середовища та величині складової імпульсу, що пов'язана з напрямом зсуву. Оскільки величина зсувної складової імпульсу пропорційна швидкості зсуву та об'ємній густині середовища $\nu\rho$, а зміна імпульсу дорівнює імпульсу сили, то зсувні напруження в зернистому середовищі, що зумовлені поперечним масопереносом, будуть визначатися відповідно з молекулярно-кінетичною теорією як добуток проникливості на насипну густину та швидкість зсуву. Для випадку двовимірної усталеної зсувної течії поперечний масоперенос обмежений зустрічними потоками частинок виключно вздовж градієнта швидкості зсуву, у зв'язку з чим у визначальному співвідношенні для розрахунку складової зсувного напруження вводиться коефіцієнт пропорційності, що дорівнює 1/3:

$$\tau_{yx}^{\text{tr}} = 1/3\nu\rho sV'(\partial u_x / \partial y) = \mu_{\text{tr}}(\partial u_x / \partial y), \quad (11)$$

де μ_{tr} – коефіцієнт ефективного внутрішнього тертя, викликаного в'язкісною складовою, що обумовлена поперечним масопереносом при зсувній деформації зернистого середовища.

Очевидно, що для підтримки зустрічних квазидифузійних потоків i , як наслідок, поперечного перенесення імпульсів необхідне постійне підведення енергії до частинок для подолання опору середовища їх поперечному переміщенню. Підведення енергії до частинок забезпечується за рахунок гравітаційного зсуву зернистого середовища при скочуванні частинок по шорсткому скату. Інтенсивність відповідного потоку енергії пропорційна швидкості зсувної деформації та складової тангенціальної напруження τ_{yx}^{tr} , що внаслідок поперечного перенесення кількості руху, що переміщується масою частинок

$$A_{\text{tr}} = \tau_{yx}^{\text{tr}}(\partial u_x / \partial y). \quad (12)$$

В умовах усталеної течії ця енергія витрачається на подолання опору зернистого середовища поперечному проникненню її окремими частинками, що переміщуються з одного елементарного шару зсувного потоку в іншій. Відповідно до молекулярно-кінетичної теорії сила псевдов'язкісного опору переміщенню сферичної частки в зернистому середовищі може бути визначена у вигляді залежності [24]

$$P_{tr} = 3\pi d\mu_{tr}V_{tr}, \quad (13)$$

де V_{tr} – середня компонента швидкості для статистично значущої сукупності частинок у процесі їх поперечного масопереносу, яка, у першому наближенні, може бути прийнята рівною середній швидкості флуктуацій частинок.

При визначенні величини відповідної дисипативної складової в енергетичному балансі для зсувного потоку частинок можна знехтовати ефектом в'язкісної дисипації в газовому середовищі, що заповнює простір між частинками, і виразити коефіцієнт ефективного внутрішнього тертя μ_{tr} відповідно до його значення в (11). У такому разі, в розрахунку на одиницю об'єму шару зернистого середовища, що скочується, потік дисипації енергії, викликаний псевдов'язкісним ефектом при поперечному масопереносі частинок, визначатиметься як

$$\gamma_{tr} = NP_{tr}V_{tr} = N\pi d\nu\rho sV'V_{tr}^2. \quad (14)$$

Таким чином, уточнення значення зсувного напруження в рівнянні збереження енергії (2) шляхом урахування його складової від поперечного перенесення імпульсу τ_{yx}^{tr} , згідно з виразами (5) і (11), повинно супроводжуватися введенням додаткової складової потоку дисипації енергії γ_{tr} , зумовленої опором середовища поперечному масопереносу

$$\gamma = \gamma_{col} + \gamma_{tr} = NFD + NP_{tr}V_{tr}. \quad (15)$$

Порівняно з підходом, який використовує визначальні співвідношення, сформульовані із застосуванням емпіричних залежностей реологічних характеристик від числа інерції [19, 20], викладений підхід відрізняється більш багатою феноменологією. Дана обставина відкриває певну перспективу використання його для розвитку узагальненої реологічної теорії різних режимів зсувних течій зернистих середовищ. Однак слід зазначити, що наведені співвідношення базуються на припущенні про квазімолекулярний хаос в потоці зернистого середовища і, очевидно, потребують їх верифікації та адаптації, у тому числі, до умов псевдорідких течій негладких нееластичних частинок з використанням методів математичного та фізичного моделювання.

1. Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P. Granular Solids, Liquids, and Gases, *Reviews of Modern Physics*, 1996, vol. 68, pp. 1259-1273.
2. Aranson I.S., Tsimring L.S. Patterns and Collective Behavior in Granular Media: Theoretical Concepts, *Reviews of Modern Physics*, 2006, vol. 78, pp. 641-692.
3. Forterre Y., Pouliquen O., Duplantier B., Halsey T., Rivasseau V. [Eds.] *Glasses and Grains*, Springer Basel, 2011, pp. 77-110.
4. Goldhirsch I. Rapid Granular Flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003, vol. 35, pp. 267-293.
5. Lois G., Lemaitre A., Carlson J.M. Emergence of Multi-Contact Interactions Incontact Dynamics Simulations of Granular Shear Flows, *Europhysics Letters*, 2006, vol. 76, no. 2, pp. 318-324.
<https://10.1209/epl/i2005-10605-1>
6. Bagnold R.A. Experiments on a Gravity Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1954, vol. 225, issue 1160, pp. 49-63.
<https://10.1098/rspa.1954.0186>
7. Silbert L.E., Ertas D., Grest G.S. [et al.] Granular Flow Down an Inclined Plane: Bagnold Scaling and Rheology, *Physical Review E*, 2001, vol. 64, issue 5, p. 051302.
<https://10.1103/PhysRevE.64.051302>
8. Hunt M.L., Zenit R., Campbell C.S., Brennen C.E. Revisiting the 1954 Suspension Experiments of R. A. Bagnold, *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, vol. 452, pp. 1-24.
<https://10.1017/S0022112001006577>
9. Savage S.B., Jeffrey D.J. The Stress Tensor in a Granular Flow at High Shear Rates, *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, vol. 110, pp. 255-272. <https://10.1017/S0022112081000736>
10. Brennen C.E. *Fundamentals of Multiphase Flows*, Cambridge University Press, 2005, 410 p.
11. Campbell C.S. Granular Material Flows - An Overview, *Powder Technology*, 2006, vol. 162, issue 3, pp. 208-229.
<https://10.1016/J.POWTEC.2005.12.008>

12. Shen H.H., Ackermann N.L. Stress in Rapidly Sheared Fluid - Solid Mixtures, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 1982, vol. 108, p. 113.
13. Savage S.B., Jenkins J.T., Satake M. [Eds.] *Mechanics of Granular Materials: New Models and Constitutive Relations*, Elsevier Science Publishers, 1983, vol. 7, pp. 261-282. <https://10.1016/B978-0-444-42192-0.50028-1>
14. Baxter G.W., Olafsen J.S. The Temperature of a Vibrated Granular Gas, *Granular Matter*, 2007, vol. 9, no. 1-2, pp. 135-139. <https://10.1007/s10035-006-0019-x>
15. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Ukolov A.A., Tuev M.A. Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles, *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, vol. 122, pp. 22-32. <https://10.1016/j.cherd.2017.03.038>
16. Borschov V.Ya., Dolgunin V.N., Ivanov P.A. Phenomenological Analysis of the Interaction of Nonelastic Incoherent Particles in a Rapid Gravity Flow, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2008, vol. 42 (343), pp. 331-335. <https://10.1134/S0040579508030147>
17. Dolgunin V.N., Ukolov A.A., Klassen P.V. [Model of the mechanism of segregation in a fast gravitational flow of particles], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 1992, vol. 26, no. 5, pp. 100-109.
18. Campbell C.S., Brennen C.E. Chute Flows of Granular Material: Some Computer Simulations, *Journal of Applied Mechanics*, 1985, vol. 52, issue 1, pp. 172-178. <https://10.1115/1.3168990>
19. Forterre Y., Pouliquen O. Flows of Dense Granular Media, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, vol. 40, pp. 1-24.
20. Dolgunin V.N., Ukolov A.A. Segregation Modeling of Particle Rapid Gravity Flow, *Powder Technology*, 1995, vol. 83, issue 2, pp. 95-103. [https://10.1016/0032-5910\(94\)02954-M](https://10.1016/0032-5910(94)02954-M)
21. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Ivanov O.O., Tuev M.A. Interrelation of Structural and Kinematic Characteristics During Free-Surface Gravity Flows of Granular Materials, *Proceedings of the*

Seventh International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering - CSM 2018, 27-28 October, 2018, Rome, Italy, USA, 2018, pp. 6-12. <https://10.15224/978-1-63248-163-4-14>

22. Chuyev A.S. [On the inconsistency of definitions of physical quantities dynamic and kinematic viscosity], *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya* [Legislative and applied metrology], 2012, no. 1, pp. 54-60.

23. Dolgunin V.N., Kudy A.N., Ukolov A.A. Development of the Model of Segregation of Particles Undergoing Granular Flow Down on Inclined Chute, *Powder Technology*, 1998, vol. 96, issue 3, pp. 211-218. [https://10.1016/S0032-5910\(97\)03376-7](https://10.1016/S0032-5910(97)03376-7)

24. Ferziger J.H., Kaper H.G. *Mathematical Theory of Transport Processes in Gases*, Amsterdam: North-Holland Publ., 1972, 568 p.