

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства та  
природокористування

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

**02-01-553М**

## **ЛАБОРАТОРНИЙ 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

Лабораторний 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. – 142 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 лабораторного практикуму: 02-01-396М

© Ю. В. Науменко, 2024

© НУВГП, 2024

## Зміст

<b>Вступ</b> .....	4
<b>Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт</b> .....	7
<b>Лабораторна робота 1</b> Режими течії рідкого заповнення камери обертового барабана.....	8
<b>Лабораторна робота 2</b> Ефект режимного гістерезису течії рідкого заповнення камери обертового барабана.....	27
<b>Лабораторна робота 3</b> Режими руху незв'язного зернистого заповнення камери обертового барабана.....	39
<b>Лабораторна робота 4</b> Ефект усереднення реологічних властивостей зернистого заповнення камери обертового барабана.....	57
<b>Лабораторна робота 5</b> Ефект посилення схожості поведінки зв'язного зернистого заповнення камери обертового барабана із течією рідини зі збільшенням зчеплення.....	68
<b>Лабораторна робота 6</b> Момент опору текучого заповнення камери обертання барабана.....	78
<b>Лабораторна робота 7</b> Стійкість обертання барабана із текучим заповненням камери.....	92
<b>Лабораторна робота 8</b> Крайовий ефект руху текучого заповнення камери обертового барабана.....	125
<b>Список літератури</b> .....	132
<b>Додаток</b> Загальні відомості про машини барабанного типу для обробки зернистих (дисперсних) матеріалів.....	133

## 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.

## **Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт**

Перед виконанням лабораторних робіт потрібно пройти загальний інструктаж з техніки безпеки на робочому місці.

Необхідно неухильно дотримуватись правил навчальної дисципліни та правил безпеки.

Потрібно уважно стежити за рухом незакріплених частин обладнання.

Необхідно ретельно виконувати вказівки керівника досліджень, лаборантів та завідувача лабораторією.

Потрібно інформувати персонал лабораторії про виявлені несправності у роботі обладнання та приладів.

Студентам категорично **заборонено**:

- самостійно змінювати конфігурацію обладнання;
- без дозволу персоналу лабораторії вмикати або вимикати обладнання та прилади;
- дотикатись до рухливих частин під час роботи обладнання;
- самостійно залишати своє визначене місце.

## Лабораторна робота 1

### РЕЖИМИ ТЕЧІЇ РІДКОГО ЗАПОВНЕННЯ КАМЕРИ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА

**Мета роботи:** Експериментальним та розрахунковим шляхом визначити швидкості стаціонарного обертання циліндричної камери навколо горизонтальної осі, що відповідають межах переходу режимів усталеної течії рідини в камері.

#### Основні теоретичні відомості

При помірній швидкості обертання камери виникає *циркуляційний режим* течії рідкого заповнення переважно у нижній частині камери. При високій швидкості обертання виникає режим течії у вигляді *пристінкового шару*.

Картина усталеної течії у циркуляційному режимі в поперечному перерізі циліндричної камери, що обертається навколо горизонтальної осі із кутовою швидкістю  $\omega$ , містить низку зон із якісно відмінним рухом (рис. 1.1).

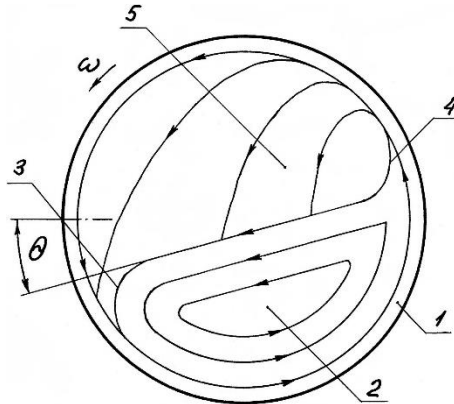


Рис. 1.1. Схема картини течії рідкого заповнення в циркуляційному режимі у поперечному перерізі обертової камери із такими зонами руху: 1 – зона пристінкового шару, 2 – зона циркуляції, 3 – валик, 4 – меніск, 5 – зона відокремлення із падінням,  $\theta$  – кут нахилу вільної поверхні до горизонталі



**У зоні пристінного шару** рідина обертається разом із камерою з незначним проковзування у вигляді близькому до рівномірного малорухливого шару, що прилягає до циліндричної поверхні камери. Пристінний шар виникає за будь якого значення швидкості обертання і зумовлений лише здатністю рідини до абсолютного прилипання до твердої стінки.

У спокої товщина пристінного шару визначається в'язкістю рідини. Зі збільшенням швидкості обертання, а отже відцентрових сил інерції, товщина пристінного шару поступово зростає. При досягненні відповідної швидкості обертання та достатнього значення відцентрових сил інерції, рідина з інших зон переходить на радіальну периферію камери і пристінний шар рідини, зумовлений прилипанням, трансформується у пристінковий шар, що в загальному випадку не є пов'язаним із прилипанням. Слід зазначити, що виникнення режиму течії у вигляді пристінкового шару спричинюється дією відцентрових сил інерції, і може бути реалізованим за відсутності здатності текучого середовища до прилипання до поверхні камери, наприклад у випадку незв'язного зернистого матеріалу.

**У зоні циркуляції** рідина здійснює інтенсивний циркуляційний вихороподібний рух у нижній частині камер зі значними відносними швидкостями зсувного проковзування. У цій зоні шари рідини, що набігають на пристінний шар, утворюють *валик*, а шари, що збігають – *меніск*. Вільна поверхня цієї зони за формою може наближатись до площини і бути нахиленою до горизонталі на кут  $\theta$ .

**У зоні відокремлення із падінням**, що іноді називається зоною «перепліскування» або «дошування», відбувається відокремлення краплин рідини від вільної поверхні пристінного шару або меніску у верхній частині камери та їх падіння із взаємодією між собою.

Характер реалізації зазначених зон течії залежить від параметрів руху рідкого заповнення камери – радіуса камери, ступеня її заповнення рідиною, в'язкості рідини та швидкості обертання камери.

Описати усталену течію рідини в стаціонарно обертовій навколо горизонтальної осі циліндричній камері в узагальненій формі можна за допомогою *критеріїв подібності руху*.

Більшість машин барабанного типу мають довгі камери, коли впливом торцевих поверхонь на течію заповнення, порівняно із впливом циліндричної поверхні, можна знехтувати. За такої умови безрозмірними **критеріями подібності руху є число Рейнольдса  $Re$  і число Фруда  $Fr$  на циліндричній поверхні камери та ступінь заповнення камери текучим середовищем  $k$** . Перші два критерії є динамічними, останній – геометричний. Такі критерії є необхідними і достатніми для встановлення подібності поведінки рідини в обертовій камері. Два явища є подібними, якщо всі три критерії мають однакові значення.

**Число Рейнольдса  $Re$  у загальному випадку відображає відношення питомих сил інерції до питомих сил внутрішнього тертя. У даному випадку число Рейнольдса  $Re$  на циліндричній поверхні камери задається виразом:**

$$Re = \frac{\omega R^2}{\nu}, \quad (1.1)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання камери,  $R$  – радіус камери,  $\nu$  – кінематичні в'язкість рідини.

**Число Фруда  $Fr$  у загальному випадку відображає відношення питомих сил інерції до питомих сил тяжіння. Число Фруда  $Fr$  на циліндричній поверхні камери задається виразом:**

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g}, \quad (1.2)$$

де  $g$  – гравітаційне прискорення.

**Ступінь заповнення камери  $k$  текучим середовищем відображає відношення об'єму порції середовища до об'єму камери і задається виразом:**

$$\kappa = \frac{w}{\pi R^2 L}, \quad (1.3)$$

де  $w$  – об'єм текучого середовища, що заповнює камеру;  $L$  – довжина камери.

Замість числа Фруда  $Fr$  критерій подібності часто використовується *відносна швидкість обертання*  $\psi_\omega$ , що відповідає відношенню поточного значення швидкості до значення критичної швидкості і задається виразом:

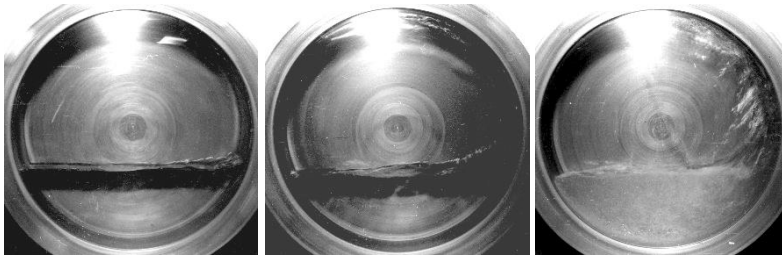
$$\psi_\omega = \frac{\omega}{\omega_{кр}},$$

де  $\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g}{R}}$  – *критична кутова швидкість* обертання, при якій значення відцентрового прискорення на циліндричній поверхні камери  $\omega^2 R$  дорівнює гравітаційному прискоренню  $g$ .

Значення числа Фруда  $Fr$  є пов'язаним із величиною відносною швидкістю обертання  $\psi_\omega$  залежністю

$$Fr = \psi_\omega^2.$$

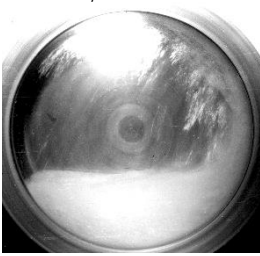
На рис. 1.2-1.4, для порівняння, наведено картини усталеної течії у поперечному перерізі стаціонарно обертової камери, за зростанням швидкості обертання та збільшенням ступеня заповнення камери, для малов'язкої рідини – води, а на рис. 1.5-1.7 – картини для сильнов'язкої рідини – касторового масла.



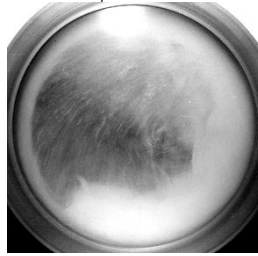
$\psi_{\omega}=0,95$

$\psi_{\omega}=1,9$

$\psi_{\omega}=2,86$



$\psi_{\omega}=3,79$

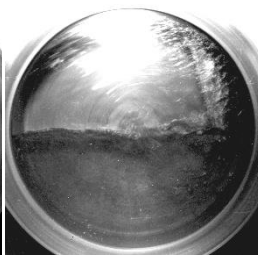


$\psi_{\omega}=4,79$

Рис. 1.2. Картини течії при  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=0,15$  м та  $\kappa=0,3$



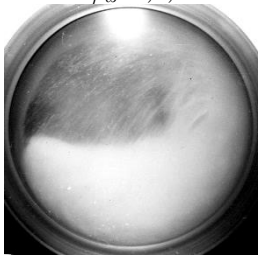
$\psi_{\omega}=1,4;$



$\psi_{\omega}=2,12$



$\psi_{\omega}=3,16$



$\psi_{\omega}=4,21$



$\psi_{\omega}=5,28$

Рис. 1.3. Картини течії при  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=0,15$  м та  $\kappa=0,5$

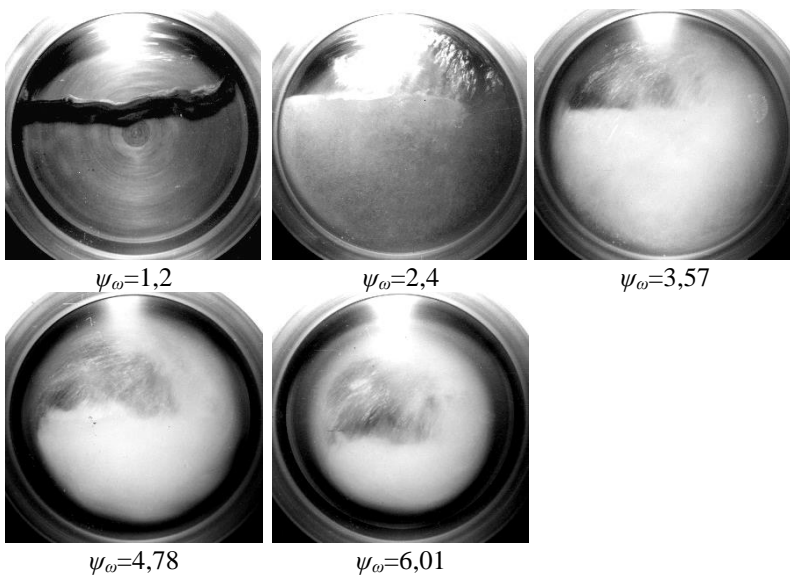


Рис. 1.4. Картини течії при  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=0,15$  м та  $\kappa=0,7$

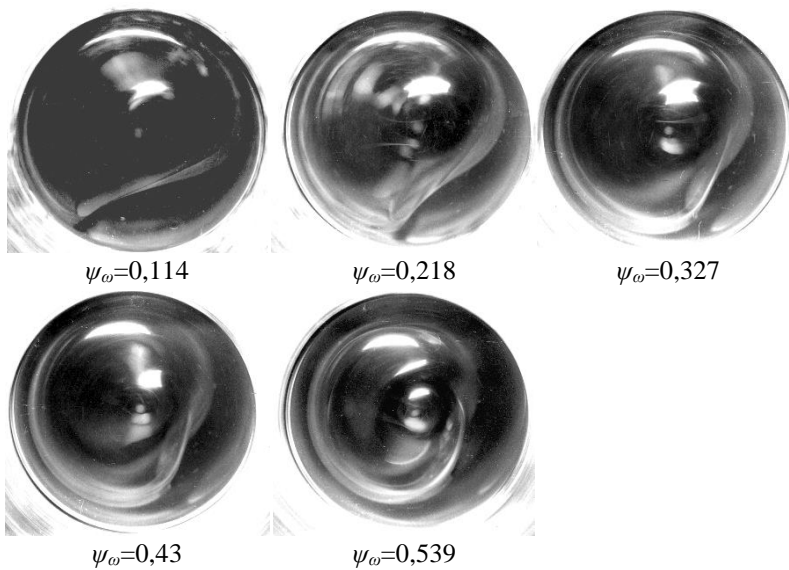


Рис. 1.5. Картини течії при  $\nu=10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=0,0265$  м та  $\kappa=0,3$

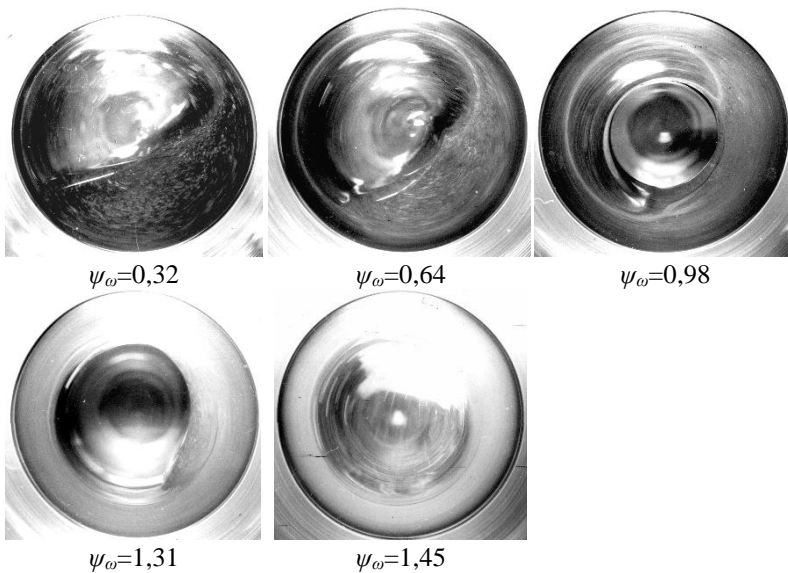


Рис. 1.6. Картини течії при  $\nu=10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=0,053$  м та  $\kappa=0,5$

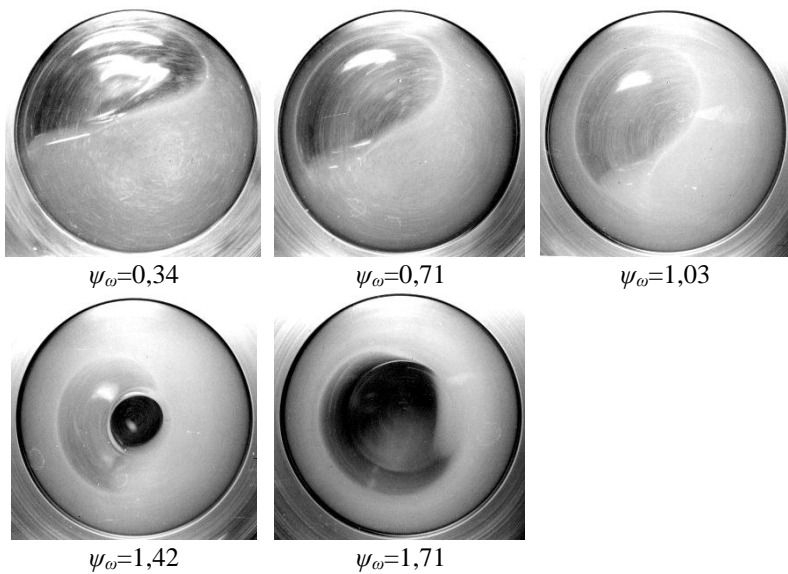


Рис. 1.7. Картини течії при  $\nu=10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=0,053$  м та  $\kappa=0,7$

На рис. 1.8 зображено залежність відносного моменту опору обертання барабана  $\psi_m$  від числа Фруда  $Fr$  та ступеня заповнення камери  $\kappa$  при  $R=0,106$  м для малов'язкої рідини – води ( $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с), а на рис. 1.9 – для сильнов'язкої рідини – касторового масла ( $\nu=10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с).

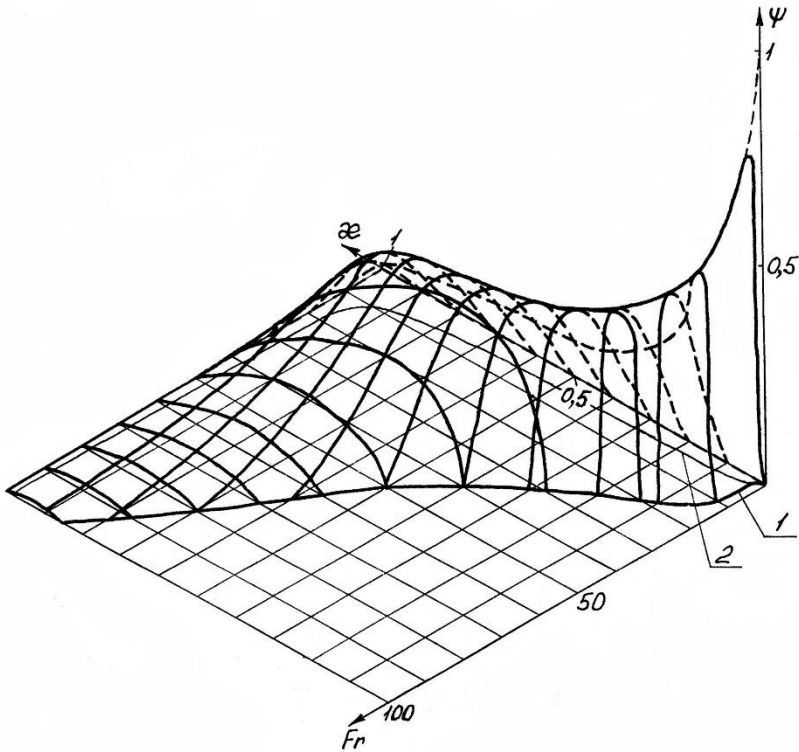


Рис. 1.8. Залежність відносного моменту опору  $\psi$  течії в обертій камері від  $Fr$  та  $\kappa$  при  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с та  $R=0,106$  м:

- 1 – перехід циркуляційного в режим пристінкового шару при прискоренні обертання, 2 – зворотній перехід режимів при сповільненні обертання

Величина відносного моменту опору  $\psi_m$  визначає відношення дійсного моменту опору обертання барабана до

умовного максимального моменту, що відповідає розподілу середовища у поперечному перерізі камери у вигляді ідеального твердотілого сегмента із нахилом вільної поверхні до горизонталі на прямий кут. Значення відносного моменту  $\psi_m$  змінюється у діапазоні  $0 \dots 1$ .

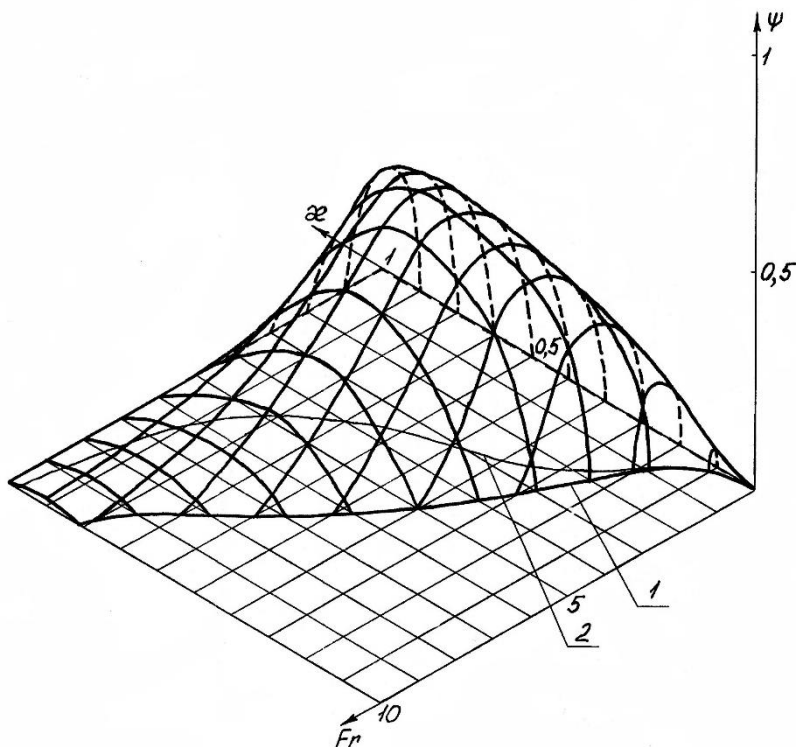


Рис. 1.9. Залежність відносного моменту опору  $\psi$  течії в обертовій камері від  $Fr$  та  $\kappa$  при  $\nu=10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$  та  $R=0,106 \text{ м}$  (позначення за рис. 1.8)

На рис. 1.10 наведено універсальні залежності відносного моменту опору  $\psi_m$  від логарифмічних значень чисел Фруда  $Fr$  та Рейнольдса  $Re$ .



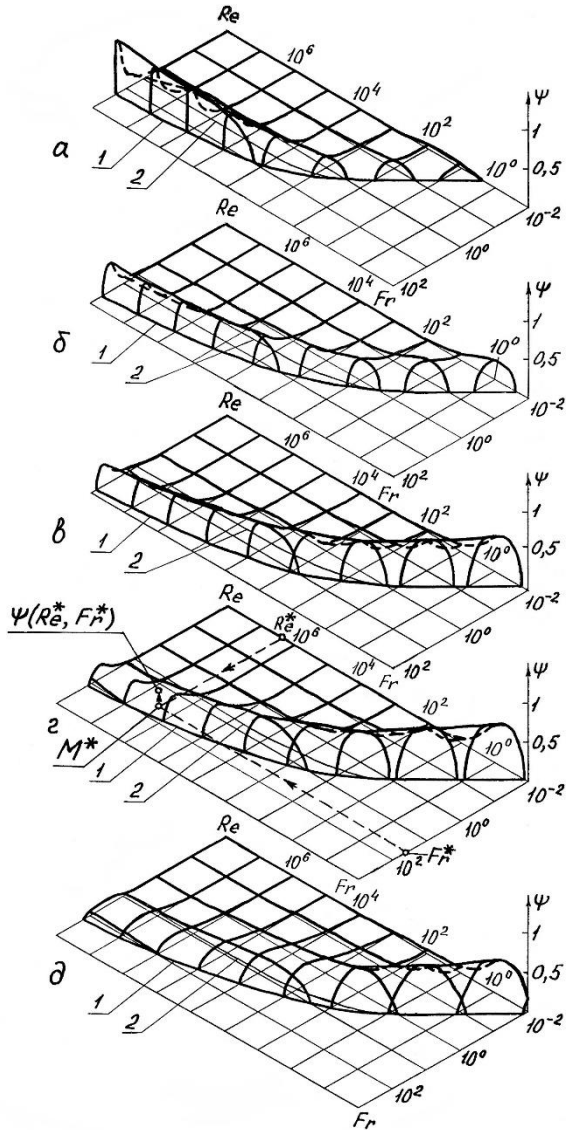


Рис. 1.10. Універсальні залежності відносного моменту опору  $\psi$  течії в обертвовій камері від  $Fr$  та  $Re$  при  $\kappa=0,1$  (а),  $\kappa=0,3$  (б),  $\kappa=0,5$  (в),  $\kappa=0,7$  (г) та  $\kappa=0,9$  (д) (позначення за рис. 1.8)

При малій в'язкості рідини та великому радіусі камери слабо проявляється ефект прилипання рідини до твердої стінки та злипання шарів (рис. 1.2-1.4, 1.8 та 1.10). Тому за об'ємом переважає циркуляційна зона течії зі слабо вираженими валиком і меніском та незначним нахилом вільної поверхні  $\theta \rightarrow 0$ , а також частково реалізується зона відокремлення із падінням. Зі збільшенням швидкості обертання камери товщина пристінного шару поступово зростає шляхом налипання за рахунок зменшення циркуляційної зони. На завершальному етапі скорочення зони циркуляції, внаслідок недостатнього злипання шарів поблизу вільної поверхні пристінного шару, виникає зона інтенсивного перепліскування, що перешкоджає остаточному переходу циркуляційної зони у пристінний шар. Нарешті, при досягненні граничної швидкості обертання камери, циркуляційна та зона відокремлення із падінням остаточно переходять у зону пристінного шару із виникненням режиму руху у вигляді пристінкового шару.

При великій в'язкості рідини та малому радіусі камери прилипання і злипання шарів посилюється (рис. 1.5-1.7, 1.9 та 1.10). Тому зона відокремлення із падінням практично не виникає, а основний об'єм рідини вже при низькій швидкості обертання зосереджується у пристінному шарі. Невелика циркуляційна зона має збільшенні валик і меніск та значний нахил вільної поверхні, гранично  $\theta \rightarrow 90^\circ$ , а в перерізі набуває форми краплі, що скочується по вільній поверхні пристінного шару. Зі збільшенням швидкості обертання камери краплеподібна циркуляційна зона підхоплюється пристінним шаром, що піднімається вгору, дещо скорочується в об'ємі, а потім плавно переходить у потовщення пристінного шару, яке згодом поступово зменшується і при великих швидкостях зникає.

При великому ступені заповнення камери рідиною зростає об'єм циркуляційної зони порівняно із пристінним шаром, більш інтенсивно проявляється зона відокремлення із падінням, а валик, меніск та кут нахилу вільної поверхні  $\theta$  зменшуються.

При малому ступені заповнення камери зменшується циркуляційна зона, слабо проявляється зона відокремлення із

падінням і збільшуються валик, меніск та кут нахилу вільної поверхні  $\theta$ .

В режимі течії у вигляді пристінкового шару весь об'єм рідини обертається разом із камерою з певним проковзування у вигляді дещо різностінного шару. Оскільки частина шару, що рухається донизу, прискорюється відносно камери, а протилежна частина, що рухається догори, сповільнюється, товщина верхньої частини шару є дещо більшою за товщину нижньої. Найбільше потовщення шару є зсунутим на певний кут відносно найвищого положення у напрямі обертання камери. Відносне проковзування та різностінність пристінкового шару набувають максимального значення зі зменшенням швидкості обертання, і прямують до нуля з її збільшенням.

Прийняті критерії подібності руху дозволяють отримати універсальні функціональні залежності зміни динамічних характеристик текучого заповнення обертової камери при варіації параметрів системи. Такі характеристики становлять суттєвий прикладний інтерес при розрахунку технологічних та конструктивних параметрів машин барабанного типу.

За допомогою таких функціональних залежностей, заданих у графічній або аналітичній формі, можна визначити кутову швидкість барабана  $\omega$ , радіус його камери  $R$  та кінематичну в'язкість оброблюваного середовища  $\nu$ , що входять до виразів критеріїв  $Re$  та  $Fr$ .

Використання графічних залежностей дозволяє візуалізувати процес розрахунку, проте приводить до зниження точності результатів через похибки при побудові. Натомість застосування аналітичних залежностей підвищує точність результатів за відсутності наочності розрахунку.

Для задавання універсальних функціональних залежностей характеристик руху внутрішньокамерного заповнення при зміні параметрів системи у критеріальній безрозмірній формі використовуються критерії подібності руху  $Re$ ,  $Fr$  та  $\kappa$ . Графічну форму універсальних залежностей зручно задавати побудовами у логарифмічних осях  $Re-Fr$  для дискретних значень  $\kappa$ . Це забезпечує наочність та представлення залежностей у компактній формі в широкому діапазоні параметрів.

На рис. 1.11. зображено одержані аналітико-експериментальним методом універсальні діаграми режимів течії в обертовій камері, які побудовано в логарифмічних осях  $Re$  та  $Fr$  для різних значень  $\kappa$ . Зона вище межі відповідає режиму течії у вигляді пристінкового шару.

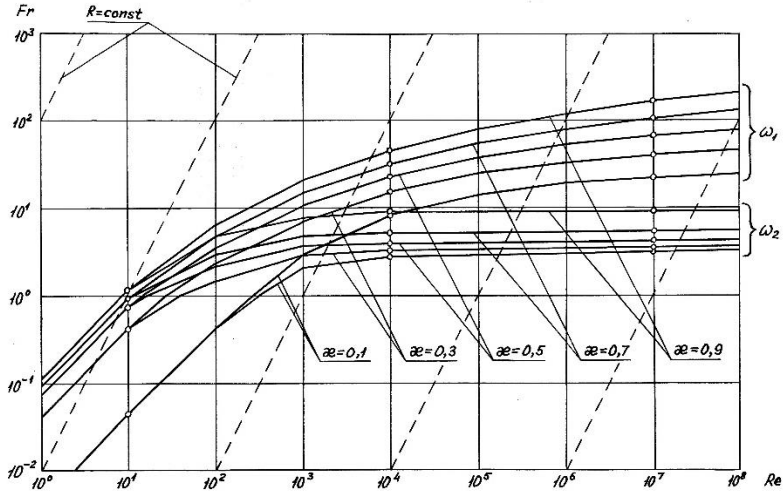


Рис. 1.11. Універсальні діаграми переходу режимів течії рідини в обертовій камері для ступеня заповнення камери  $\kappa=0,1, 0,3, 0,5, 0,7$  та  $0,9$ :  $\omega_1$  – межа переходу циркуляційного режиму у режим течії у вигляді пристінкового шару при прискоренні обертання;  $\omega_2$  – межа зворотного переходу режимів течії при сповільненні обертання

Розрахувати величину кутової швидкості обертання камери  $\omega$ , яка відповідає межі переходу режимів течії, за допомогою графічних залежностей рис. 1.12 можна у такий спосіб:

1) за величинами координат  $Re^*$  та  $Fr^*$ , що обчислено за допомогою виразів (1.1) та (1.2) для довільного значення  $\omega$ , на графіку діаграми (рис. 1.12) будується допоміжна точка  $K^*$ ;

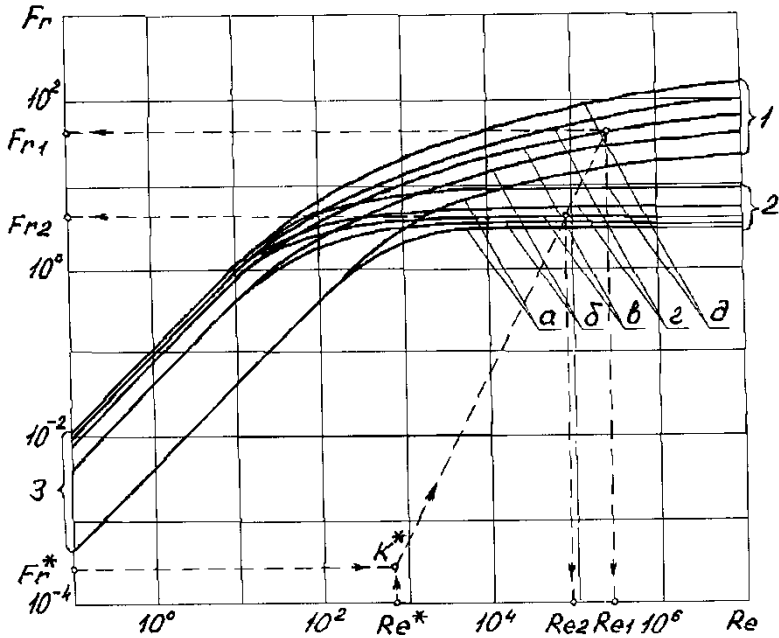


Рис. 1.12. Послідовність виконання побудов при розрахунку швидкісних меж переходів режимів течії рідини в обертовій камері за універсальними діаграмами: (позначення меж режимів течії 1 та 2 згідно рис. 3.17):  $\kappa=0,1$  (а),  $\kappa=0,3$  (б),  $\kappa=0,5$  (в),  $\kappa=0,7$  (г),  $\kappa=0,9$  (д)

2) через отриману точку  $K^*$  проводиться допоміжна похила пряма із кутовим коефіцієнтом 2, яка відповідає умові  $R=\text{const}$ ;

3) для точки перетину допоміжної похилої прямої із певною лінією діаграми (1 або 2) для відповідного значення  $\kappa$ , що обчислено за (1.3), визначаються логарифмічні координати  $Re$  та  $Fr$ ;

4) за отриманими координатами точки перетину  $Re$  та  $Fr$  розраховується шукане значення  $\omega$ ;

5) у випадку невідповідності заданого  $\kappa$  дискретним значенням на діаграмі, будуються точки перетину допоміжної похилої прямої із двома ближчими за  $\kappa$  графіками певної лінії (1 або 2) із наступним інтерполюванням величини  $\omega$ .

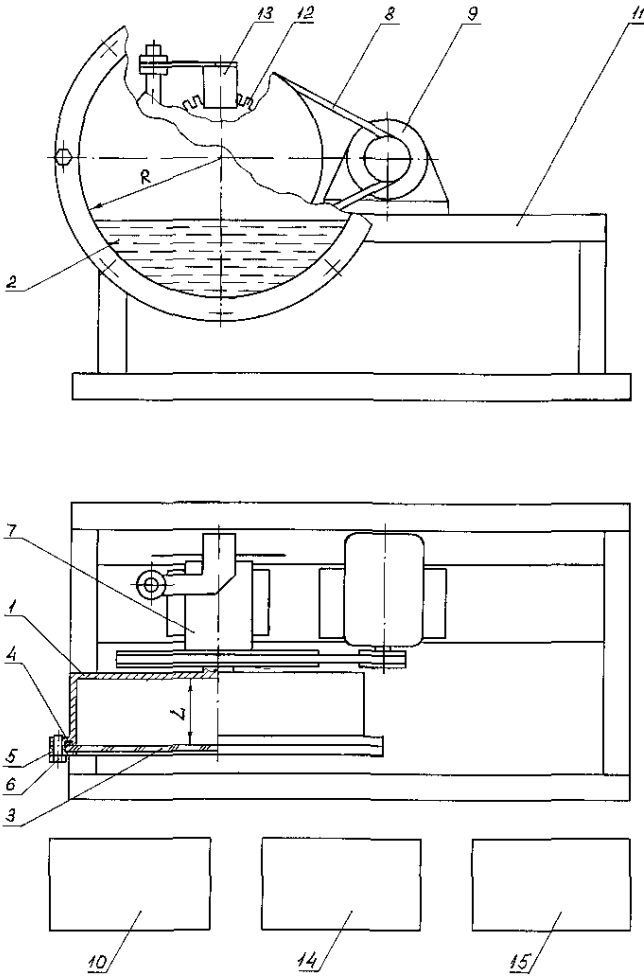


Рис. 1.13. Схема лабораторної установки для дослідження робочих процесів машин барабанного типу: 1 – барабан, 2 – текуче заповнення камери, 3 – прозора торцева стінка барабана, 4 – ущільнення, 5 – кришка, 6 – кріплення кришки, 7 – підшипникова опора, 8 – пасова передача, 9 – колекторний електродвигун, 10 – лабораторний автотрансформатор, 11 – рама, 12 – дисковий переривач проміню світла, 13 – фотоелектричний

датчик, 14 – електронний тахометр, 15 – вольтметр

### Порядок виконання роботи

1. Задатись значеннями параметрів системи: вид рідини; кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с; радіус камери барабана  $R$ , м; ступінь заповнення камери порцією рідини  $k$ .

2. Змонтувати в установці барабан із камерою радіусом  $R$ , ступінь заповнення якої рідиною в'язкістю  $\nu$  становить  $k$  (рис. 1.13).

3. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно збільшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна зі стану спокою та візуалізуючи режим течії рідини через прозору торцеву стінку камери, частоту обертання барабана при переході циркуляційного режиму течії рідини в режим пристінкового шару під час прискорення обертання барабана за першим дослідом  $n'_1$ , об./хв.

4. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно зменшуючи автотрансформатором швидкість обертання, частоту обертання барабана при переході режиму пристінкового шару в циркуляційний режим течі під час сповільнення обертання барабана за першим дослідом  $n'_2$ , об./хв.

5. Повторити виконання п.п. 3 та 4 ще два рази та виміряти частоти обертання при переході режимів течії за другим та третім дослідом  $n''_1$ ,  $n''_2$ ,  $n'''_1$  та  $n'''_2$ , об./хв.

6. Визначити за трьома дослідом середні значення частот обертання при переході режимів течії  $n_{1c}$  та  $n_{2c}$ , об./хв.:

$$n_{ic} = \frac{n'_i + n''_i + n'''_i}{3},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

7. Визначити дослідні значення кутових швидкостей обертання барабана при переході режимів течії  $\omega_{i\partial}$  та  $\omega_{2\partial}$ , 1/с:

$$\omega_{i\partial} = \frac{\pi \cdot n_{ic}}{30},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс,  $\pi=3,14$ .

8. Визначити, надаючи, для спрощення, кутовій швидкості  $\omega$  значення  $\omega=1$  1/с, координати  $Re^*=(\omega R^2)/\nu$  та  $Fr^*=(\omega^2 \cdot R)/g$

допоміжної точки на діаграмі  $Re-Fr$ :

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

де  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup> – гравітаційне прискорення.

9. Визначити десяткові логарифми координат допоміжної точки:

$$\log(Re^*), \quad \log(Fr^*).$$

10. Побудувати на копії діаграми  $Re-Fr$  (рис. 1.11) в логарифмічних осях за одержаними логарифмами координат  $\log(Re^*)$  та  $\log(Fr^*)$  допоміжну точку  $K^*$ .

11. Провести на діаграмі  $Re-Fr$  через одержану точку  $K^*$  допоміжну похилу пряму із кутовим коефіцієнтом 2, яка відповідає умові  $R=\text{const}$ , до перетину із лініями графіку  $\omega_1$  та  $\omega_2$  для відповідного значення ступеня заповнення камери  $\kappa$ .

12. Виміряти на логарифмічних осях діаграми  $Re-Fr$  логарифмічні координати одержаних точок перетину допоміжної прямої із лініями графіку ( $\omega_1$  та  $\omega_2$ ):

$$\log(Re_1), \quad \log(Fr_1), \quad \log(Re_2), \quad \log(Fr_2).$$

13. Визначити, за одержаними логарифмічними координатами точок перетину допоміжної прямої із відповідними лініями графіку ( $\omega_1$  та  $\omega_2$ ), їх координати  $Re_1$  і  $Fr_1$  та  $Re_2$  і  $Fr_2$ :

$$Re_i = 10^{\log(Re_i)}, \quad Fr_i = 10^{\log(Fr_i)},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

14. Визначити теоретичні значення кутових швидкостей обертання барабана при переході режимів течії  $\omega_{1m}$  та  $\omega_{2m}$ , 1/с:

$$\omega_{im} = \frac{\frac{Re_i \cdot \nu}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_i \cdot g}{R}}}{2},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

15. Визначити розбіжність отриманих дослідних та теоретичних значень кутових швидкостей обертання камери при переході режимів течії  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$ , %:



$$\varepsilon_i = \frac{|\omega_{\partial i} - \omega_{mi}|}{\omega_{mi}} \cdot 100\%,$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

16. Результати вимірювань та обчислень занести у табл. 1.1:

Таблиця 1.1

Параметри		Значення параметрів для меж переходу режимів течії з індексами $i$	
		$i=1$	$i=2$
$n_i'$	(об./хв.)		
$n_i''$			
$n_i'''$			
$n_{ic}$			
$\omega_{i\partial}$	(1/с)		
$Re^*$	(п. 8)		те саме
$Fr^*$			те саме
$\log(Re^*)$	(п. 9)		те саме
$\log(Fr^*)$			те саме
$\log(Re_i)$	(п. 12)		
$\log(Fr_i)$			
$Re_i$	(п. 13)		
$Fr_i$			
$\omega_{im}$	(1/с)		
$\varepsilon_i$	(%)		
Вид рідини – ...; $v = \dots \text{ м}^2/\text{с}$ ; $R = \dots \text{ м}$ ; $\kappa = \dots$			

## **Зміст звіту про виконання лабораторної роботи 1**

1. Номер та назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Копія рис. 1.1 із підписами.
4. Визначення режимів течії за с. 5 (виділено жирним шрифтом).
5. Визначення зон картини течії в перерізі камери за с. 6 (виділено жирним шрифтом).
6. Текстова та аналітична визначення критеріїв подібності течії в обертовій камері  $Re$ ,  $Fr$  та  $\kappa$  за с. 7-8 (виділено жирним шрифтом).
7. Текстова та аналітична визначення відносної та критичної швидкості обертання камери за рис. 8 (виділено жирним шрифтом).
8. Копія діаграми  $Re-Fr$  на рис. 1.11 із виконаними побудовами.
9. Заповнена табл. 1.1 за п. 16.

## Лабораторна робота 2

### ЕФЕКТ РЕЖИМНОГО ГІСТЕРЕЗИСУ ТЕЧІЇ РІДКОГО ЗАПОВНЕННЯ КАМЕРИ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА

**Мета роботи:** Експериментальним та розрахунковим шляхом визначити межі діапазону швидкостей стаціонарного обертання циліндричної камери навколо горизонтальної осі, в якому виникає явище режимного гістерезису усталеної течії рідкого заповнення.

#### Основні теоретичні відомості

*Ефект режимного гістерезису усталеної течії рідини в циліндричній камері, що стаціонарно обертається навколо горизонтальної осі, полягає у перевищенні величини швидкості обертання камери при переході циркуляційного режиму руху в режим пристінкового шару, під час прискорення обертання камери, над величиною швидкості при зворотному переході режимів, під час сповільнення обертання.*

Ефект гістерезису інтенсивно проявляється при великих та середніх числах Рейнольдса і не спостерігається при малих  $Re$ . Гістерезис посилюється зі збільшенням ступеня заповнення камери  $k$  та послаблюється зі зменшенням заповнення.

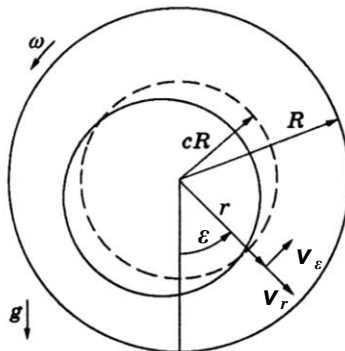


Рис. 2.1. Розрахункова схема течії у вигляді пристінкового шару в обертовій камері

Межі переходу режимів течії рідини в обертовій камері радіуса  $R$  визначаються умовами стійкості руху пристінкового шару із радіусом вільної поверхні  $cR$  ( $0 \leq c \leq 1$ ) (рис. 2.1).

При дуже великих значеннях числа Рейнольдса  $Re \rightarrow \infty$  (абсолютно нев'язка рідина), згідно теоретичної умови, пристінковий шар буде стійким при

$$Fr \cdot c > 3, \quad (2.1)$$

що відповідає перевищенню значення числа Фруда на вільній поверхні пристінкового шару величини 3.

Натомість при дуже малих значеннях числа Рейнольдса  $Re \rightarrow 0$  (абсолютно в'язка рідина), теоретична умова приймає вигляд

$$Fr \cdot c > 1, \quad (2.2)$$

що відповідає перевищенню значення числа Фруда на вільній поверхні пристінкового шару величини 1.

Експериментальну перевірку узгодження теоретичної умови стійкості із експериментальними даними при  $R=0,075$  м показано на рис. 2.2. Усталені режими, що розташовані вище кривих, відповідають течії у вигляді пристінкового шару, а нижче кривих – циркуляційній течії.

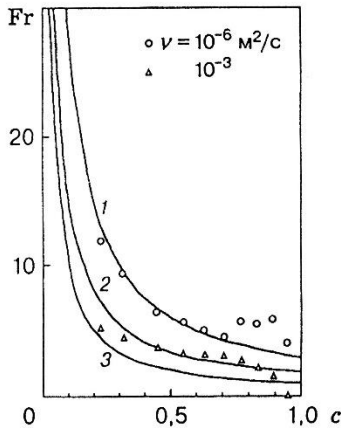


Рис. 2.2. Узгодження теоретичної умови стійкості течії пристінкового шару рідини в обертовій камері із експериментальними даними (точки – експеримент, криві – розрахунок) при  $R=0,075$  м:  
 1 –  $\nu \rightarrow 0$  ( $Fr \cdot c = 3$ ); 2 –  $\nu = 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ ; 3 –  $\nu \rightarrow \infty$  ( $Fr \cdot c = 1$ )

Згідно умов (2.1) та (2.2) пристінковий шар втрачає стійкість і руйнується при досягненні критичної швидкості обертання на вільній поверхні лише за умови нескінченного значення в'язкості рідини заповнення камери. *Оскільки реальна рідина має в'язкість скінченного значення, пристінковий шар заповнення буде руйнуватись при швидкості обертання камери, більшій за критичну.*

На рис. 2.3 в осях  $s$  та сталої по часу  $n$  показано розв'язок частотного рівняння нестационарного збуреного хвильового руху вільної поверхні пристінкового шару рідини в обертовій камері.

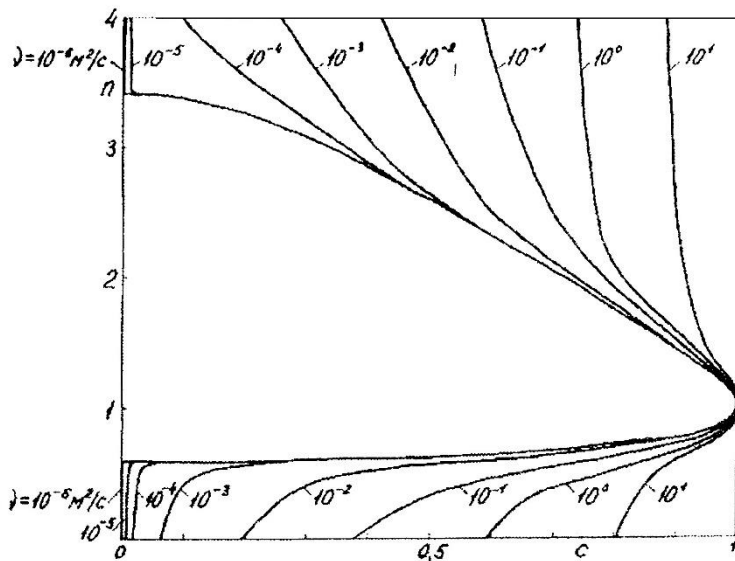


Рис. 2.3. Розв'язок частотного рівняння збуреної хвильової течії в обертовій камері при  $\nu=10^{-6}-10^1 \text{ м}^2/\text{с}$  та  $R=0,075 \text{ м}$

Зі зменшенням числа Рейнольдса, частота *низькочастотних хвиль*, що супроводжують руйнування пристінкового шару, *знижується гранично до нуля*, а частота *високочастотних*, які відносно рідко реалізуються, – *значно зростає гранично до нескінченності*, і процес *хвилеутворення загасає*. При цьому руйнування шару завантаження при зниженні швидкості обертання камери

відбувається не внаслідок *хвилеутворення*, а через значну деформацію вільної поверхні в усталеному русі, що обумовлено розвитком *вторинних циркуляційних течій* у вигляді валика *ab* на вільній поверхні (рис. 2.4).

Зниження числа Рейнольдса  $Re$  здійснює істотний демпфуючий вплив на хвилеутворення на вільній поверхні, а отже стабілізуючу дію на усталену течію пристінкового шару заповнення обертової камери.

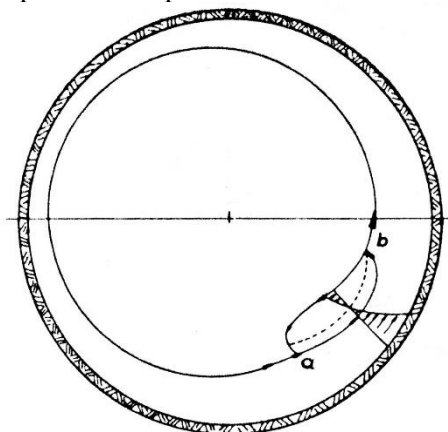


Рис. 2.4. Схема картини руху при розвитку вторинної циркуляційної течії в обертовій камері у вигляді валика на вільній поверхні пристінкового шару

Порівняльний графічний аналіз умов стійкості руху пристінкового шару рідини та меж взаємного переходу циркуляційного режиму течії та режиму у вигляді пристінкового шару, отриманих за результатами аналітичних, чисельних та експериментальних досліджень, наведено на рис. 2.5.

У логарифмічних координатах  $Re$  та  $Fr$  для ступеня заповнення камери  $\kappa=0,5$  побудовано криві, що визначають межі переходу циркуляційного режиму течії в режим пристінкового шару та зворотного переходу. Зона вище межі відповідає режиму течії у вигляді пристінкового шару. Похилі штрихові прямі відображають режими течії рідкого заповнення для різних швидкостей обертання камери незмінного радіуса ( $R=\text{const}$ ). При

великих значеннях  $Re$  швидкість обертання камери при утворенні пристінкового шару, під час прискорення обертання, перевищує швидкість камери при руйнуванні шару, під час сповільнення обертання. При малих  $Re$  швидкість камери при утворенні шару, під час прискорення обертання, та при його руйнуванні, під час сповільнення, є однаковими, що зумовлено виникненням вторинних циркуляційних течій у вигляді валика на вільній поверхні шару.

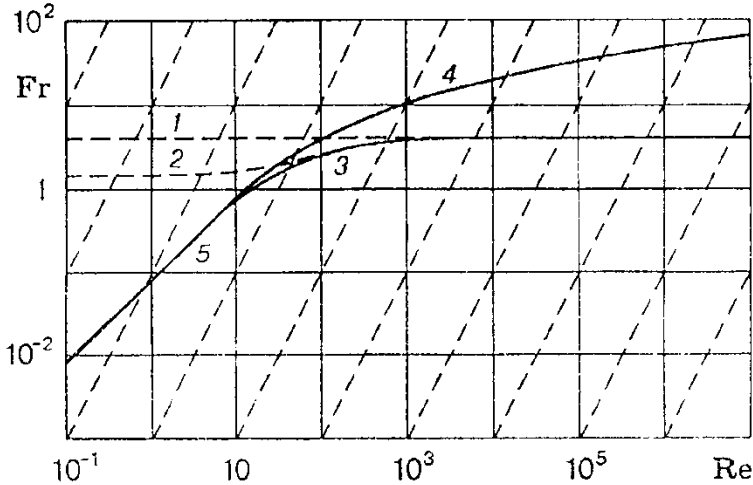


Рис. 2.5. Діаграма меж переходу режиму течії рідкого заповнення обертової камери у вигляді пристінкового шару в циркуляційний режим течії та назад при  $\kappa=0,5$ : 1 – теоретична умова на основі (2.1)  $Fr_c=3$ , 2 – розрахункова умова на основі (2.1) та (2.2)  $Fr_c \rightarrow 3$ , при  $Re \rightarrow \infty$ , та  $Fr_c \rightarrow 1$ , при  $Re \rightarrow 0$ ; 3-5 – криві за результатами чисельного та фізичного експериментів, що описують, відповідно, перехід режиму пристінкового шару в циркуляційний при сповільненні обертання камери (3), циркуляційного в режим пристінкового шару при прискоренні обертання (4) та пристінкового шару в циркуляційний режим руху і назад при сповільненні або прискоренні обертання (5)

Порівняльний аналіз рис. 2.5 свідчить про те, що розрахунок межі переходу пристінкового шару в циркуляційний режим за теоретичною умовою стійкості шару за (2.1) ( $Fr_c=3$ ) добре відповідають чисельним та експериментальним даним

лише при великих значеннях  $Re$ , а за розрахунковою умовою за (2.1) та (2.2) ( $Fr \cdot c \rightarrow 3$ , при  $Re \rightarrow \infty$ , та  $Fr \cdot c \rightarrow 1$ , при  $Re \rightarrow 0$ ) – лише при великих та середніх  $Re$ . Переходи циркуляційного в режим пристінкового шару, під час прискорення обертання, при великих та середніх  $Re$ , а також пристінкового шару в циркуляційний режим, під час сповільнення обертання, при малих  $Re$ , внаслідок складності руху не піддаються коректному аналітичному моделюванню і описуються за допомогою чисельних розрахунків або емпіричних даних.

Для наочної ілюстрації прояву ефекту режимного гістерезису на рис. 2.6 зображено, для порівняння, графіки залежностей відносного моменту опору  $\psi_M$  обертання камери, заповненої навпіл мало-, середньо- та сильнов'язкою рідиною, від швидкості обертання камери  $\omega$  при  $R=0,106$  м із зазначенням напрямку зміни стану системи. Штрихові стрілки біля гілки  $CA$  відповідають можливому напрямку зміни стану системи при недосягненні точки  $A$ , а біля гілки  $AB$  – при недосягненні точки  $B$ .

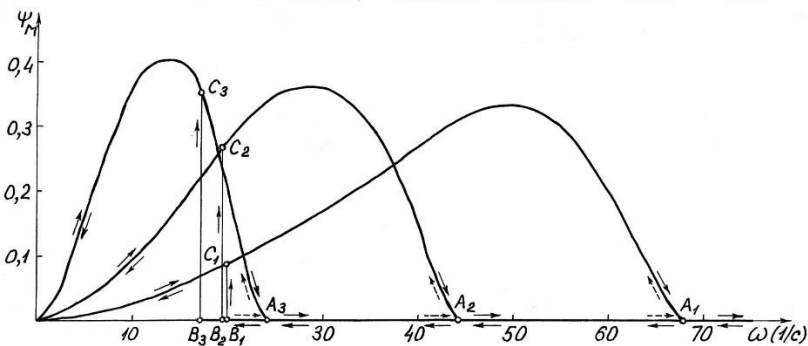


Рис. 2.6. Залежності відносного моменту опору обертання барабана  $\psi_M$  від швидкості обертання при  $\kappa=0,5$ , із камерою, заповненою рідиною:

- 1 –  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, 2 –  $\nu=5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с, 3 –  $\nu=10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с,  $A$  – перехід циркуляційного режиму течії в режим пристінкового шару під час прискорення обертання,  $BC$  – перехід режиму пристінкового шару в циркуляційний під час сповільнення обертання

При великих  $Re$  перехід режимів руху завантаження є явно вираженим, а руйнування пристінкового шару при сповільненні обертання камери – за характером стрибкоподібним і зумовленим



хвилеутворенням на вільній поверхні. За таких умов різниця між значеннями швидкостей обертання камери при утворенні та руйнуванні шару є значною (відрізок  $A_1B_1$  на рис. 2.6). Зі зменшенням  $Re$  різниця швидкостей поступово спадає ( $A_2B_2$  та  $A_3B_3$  рис. 2.6). Нарешті при малих  $Re$  зазначені взаємні переходи є неявно вираженими і обумовленими значною деформацією вільної поверхні внаслідок розвитку вторинних циркуляційних течій у вигляді валика на вільній поверхні шару (рис. 2.4).

Характер зміни характерних зон течії у поперечному перерізі обертової камери (рис. 1.1) визначає умови взаємного переходу режимів руху рідини (рис. 1.2-1.7).

При великих значеннях  $Re$  слабо проявляється ефект прилипання рідини до твердої стінки та злипання шарів. При досягненні верхньої граничної швидкості обертання камери, циркуляційна та зона відокремлення із падінням переходять у зону пристінного шару із виникненням режиму пристінкового шару. У подальшому режим пристінкового шару, що утворився, зберігає стійкість і при зниженні швидкості обертання не руйнується. Лише при досягненні нижньої граничної швидкості обертання на вільній поверхні шару виникають деформації і плоскі та просторові збурення, частково у вигляді хвиль, що спричинює раптове стрибкоподібне руйнування шару та утворення циркуляційного режиму. Зазначені особливості малов'язкої течії зумовлюють суттєве перевищення величини швидкості обертання камери, при якій циркуляційний режим течії рідини переходить у режим пристінкового шару під час прискорення, над величиною швидкості, при якій здійснюється зворотній перехід режимів під час сповільнення обертання.

При малих  $Re$  прилипання та злипання шарів посилюється. Зі збільшенням швидкості обертання камери краплеподібна циркуляційна зона підхоплюється зоною пристінного шару, що піднімається вгору, дещо скорочується в об'ємі, а потім плавно переходить у потовщення пристінного шару, яке згодом поступово зменшується і при великих кутових швидкостях зникає. При зниженні швидкості обертання відбувається зворотна послідовність переходів форм течії при тих же кутових швидкостях. Причому у зв'язку із плавністю зміни течії доволі

утрудненим є встановлення точного значення швидкості обертання, що відповідає взаємному переходу циркуляційного режиму та режиму пристінкового шару під час прискорення або сповільнення обертання.

При великому ступені заповнення камери рідиною збільшується значення швидкості обертання камери при переході циркуляційного режиму течії у режим пристінкового шару під час прискорення, порівняно зі значенням швидкості при зворотному переході під час сповільнення обертання.

При малому ступені заповнення камери верхня гранична швидкість обертання наближається до нижньої, зменшуючи прояв ефекту гістерезису.

### **Порядок виконання роботи**

1. Задатись значеннями параметрів системи із великим числом Рейнольдса  $Re$ : вид рідини 1; кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини  $\nu$ ,  $m^2/s$ ; радіус камери барабана  $R_1$ , м; ступінь заповнення камери порцією рідини  $k_1$ .

2. Змонтувати в установці барабан із камерою радіусом  $R_1$ , ступінь заповнення якої рідиною в'язкістю  $\nu$  становить  $k_1$  (рис. 1.13).

3. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно збільшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна зі стану спокою та візуалізуючи режим течії рідини через прозору торцеву стінку камери, частоту обертання барабана при переході циркуляційного режиму течії рідини в режим пристінкового шару під час прискорення обертання барабана за першим дослідом  $n'_1$ , об./хв.

4. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно зменшуючи автотрансформатором швидкість обертання, частоту обертання барабана при переході режиму пристінкового шару в циркуляційний режим течі під час сповільнення обертання барабана за першим дослідом  $n'_2$ , об./хв.

5. Повторити виконання п.п. 3 та 4 ще два рази та виміряти

частоти обертання при переході режимів течії за другим та третім дослідями  $n_1''$ ,  $n_2''$ ,  $n_1'''$  та  $n_2'''$ , об./хв.

6. При виконанні п.п. 3-5 спостерігати характер переходу режимів течії.

7. Визначити за трьома дослідями середні значення частот обертання при переході режимів течії  $n_{1c}$  та  $n_{2c}$ , об./хв.:

$$n_{ic} = \frac{n_i' + n_i'' + n_i'''}{3},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

8. Визначити дослідні значення кутових швидкостей обертання барабана при переході режимів течії  $\omega_{1\partial}$  та  $\omega_{2\partial}$ , 1/с:

$$\omega_{i\partial} = \frac{\pi \cdot n_{ic}}{30},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс,  $\pi=3,14$ .

9. Визначити, надаючи, для спрощення, кутовій швидкості  $\omega$  значення  $\omega=1$  1/с, координати  $Re^*=(\omega R^2)/\nu$  та  $Fr^*=(\omega^2 \cdot R)/g$  допоміжної точки на діаграмі  $Re-Fr$ :

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

де  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup> – гравітаційне прискорення.

10. Визначити десяткові логарифми координат допоміжної точки:

$$\log(Re^*), \quad \log(Fr^*).$$

11. Побудувати на копії діаграми  $Re-Fr$  (рис. 1.11) в логарифмічних осях для відповідного значення ступеня заповнення камери  $\kappa$ , за одержаними логарифмами координат  $\log(Re^*)$  та  $\log(Fr^*)$ , допоміжну точку  $K^*$ .

12. Провести на діаграмі через одержану точку  $K^*$  допоміжну похилу пряму із кутовим коефіцієнтом 2, яка відповідає умові  $R_1=\text{const}$ , до перетину із лініями графіку  $\omega_1$  та  $\omega_2$  для відповідного значення ступеня заповнення камери  $\kappa$ .

13. Виміряти на логарифмічних осях діаграми логарифмічні координати одержаних точок перетину допоміжної прямої із лініями графіку ( $\omega_1$  та  $\omega_2$ ):

$$\log(Re_1), \log(Fr_1), \log(Re_2), \log(Fr_2).$$

14. Визначити, за одержаними логарифмічними координатами точок перетину допоміжної прямої із відповідними лініями графіку ( $\omega_1$  та  $\omega_2$ ), їх координати  $Re_1$  і  $Fr_1$  та  $Re_2$  і  $Fr_2$ :

$$Re_i = 10^{\log(Re_i)}, \quad Fr_i = 10^{\log(Fr_i)},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

15. Визначити теоретичні значення кутових швидкостей обертання барабана при переході режимів течії  $\omega_{1m}$  та  $\omega_{2m}$ , 1/с:

$$\omega_{im} = \frac{\frac{Re_i \cdot v}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_i \cdot g}{R}}}{2},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

16. Визначити розбіжність отриманих дослідних та теоретичних значень кутових швидкостей обертання камери при переході режимів течії  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$ , %:

$$\varepsilon_i = \frac{|\omega_{di} - \omega_{mi}|}{\omega_{mi}} \cdot 100\%,$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

17. Результати вимірювань та обчислень звести у табл. 2.1:

Таблиця 2.1

Результати вимірювань та обчислень при великому  $Re$  (дослід 1)

Параметри		Значення параметрів для меж переходу режимів течії з індексами $i$	
		$i=1$	$i=2$
$n_i'$	(об./хв.)		
$n_i''$			
$n_i'''$			
$n_{ic}$			
$\omega_{i\partial}$	(1/с)		
$Re^*$	(п. 9)		те саме
$Fr^*$			те саме
$\log(Re^*)$	(п. 10)		те саме
$\log(Fr^*)$			те саме
$\log(Re_i)$	(п. 13)		
$\log(Fr_i)$			
$Re_i$	(п.14)		
$Fr_i$			
$\omega_{im}$	(1/с)		
$\varepsilon_i$	(%)		
Вид рідини 1 – ...; $v_1 = \dots$ м/с <sup>2</sup> ; $R_1 = \dots$ м; $\kappa_1 = \dots$			

18. Задатись значеннями параметрів системи із малим числом Рейнольдса  $Re$ : вид рідини 2; кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини  $\nu_2$ , м<sup>2</sup>/с; радіус камери барабана  $R_2$ , м; ступінь заповнення камери порцією рідини  $\kappa_2$ .

19. Виконати п.п. 2-10.

20. Провести на діаграмі через одержану точку  $K^*$  допоміжну похилу пряму із кутовим коефіцієнтом 2, яка відповідає умові  $R_2 = \text{const}$ , до перетину із лініями графіку  $\omega_1$  та  $\omega_2$  для відповідного значення ступеня заповнення камери  $\kappa$ .

21. Виконати п.п. 12-15 і результати вимірювань та обчислень звести у табл. 2.2:

Таблиця 2.2

Результати вимірювань та обчислень при малому  $Re$  (дослід 2)

Параметри		Значення параметрів для меж переходу режимів течії з індексами $i$	
		$i=1$	$i=2$
$n_i'$	(об./хв.)		
$n_i''$			
$n_i'''$			
$n_{ic}$			
$\omega_{i\partial}$	(1/с)		
$Re^*$	(п. 9)		те саме
$Fr^*$			те саме
$\log(Re^*)$	(п. 19)		те саме
$\log(Fr^*)$			те саме
$\log(Re_i)$	(п. 13)		
$\log(Fr_i)$			
$Re_i$	(п.14)		
$Fr_i$			
$\omega_{im}$	(1/с)		
$\varepsilon_i$	(%)		
Вид рідини 2 – ...; $v_2 = \dots \text{ м}^2/\text{с}$ ; $R_2 = \dots \text{ м}$ ; $\kappa_2 = \dots$			

22. Сформулювати, на основі отриманих в роботі результатів, висновок щодо інтенсивності прояву ефекту режимного гістерезису та характеру переходу режимів течії, зокрема руйнування пристінкового шару, для першого і другого дослідів.

### Зміст звіту про виконання лабораторної роботи 2

1. Номер та назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Визначення ефекту режимного гістерезису течії в обертовій камері за с. 23 (виділено жирним шрифтом).
4. Копія рис. 2.4 та 2.6 із підписами.
5. Копія рис. 1.11 із виконаними побудовами.
6. Заповнені табл. 2.1 та 2.2 за п.п. 17 та 21.
7. Висновок за п. 22 за с. 26 (виділено жирним шрифтом).

### Лабораторна робота 3

#### РЕЖИМИ РУХУ НЕЗВ'ЯЗНОГО ЗЕРНИСТОГО ЗАПОВНЕННЯ КАМЕРИ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА

**Мета роботи:** Експериментальним та розрахунковим шляхом визначити швидкості стаціонарного обертання циліндричної камери навколо горизонтальної осі, що відповідають межах переходу режимів усталеного руху незв'язного зернистого матеріалу в камері.

#### Основні теоретичні відомості

Режим усталеного циркуляційного руху незв'язного зернистого матеріалу в поперечному перерізі камери, що обертається навколо горизонтальної осі, є *трифазним*.

*Картина трифазного режиму руху* незв'язного зернистого матеріалу в поперечному перерізі камери, що обертається із кутовою швидкістю  $\omega$ , містить *три зони* із якісно відмінним рухом (рис. 1.1).

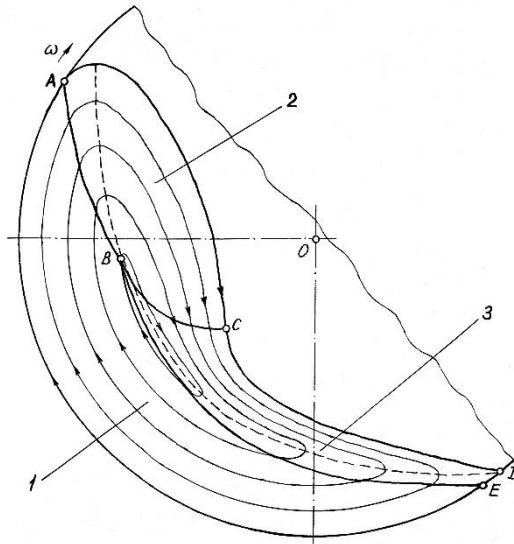


Рис. 3.1. Схема картини трифазного режиму руху незв'язного зернистого матеріалу в поперечному перерізі обертової камери із такими зонами: 1 – зона квазітвердотільного руху, 2 – зона невірального падіння, 3 – зона зсувного шару

*Зона 1 (EABE) квазітвердотільного руху, без відносного переміщення частинок зернистого матеріалу та проковзування по поверхні камери, виникає поблизу циліндричної стінки. Зона 2 (BACB) невідного падіння, що пов'язана із відокремленням від зони 1 при зсуванні по поверхні AB та наступним падінням із взаємодією частинок, реалізується у верхній частині камери. Зона 3 (BCDEB) зсувного шару, у вигляді швидкого гравітаційного зсувного потоку, виникає поблизу вільної поверхні зернистого заповнення у нижній частині камери.*

Значення швидкості обертання форми суттєво впливає на реалізацію зон руху зернистого заповнення. При повільному обертанні переважає квазітвердотільна зона 1, зона невідного падіння 2 є слабо вираженою, а зона зсувного шару 3 має незначну товщину. Зі зростанням швидкості обертання масові частки зон 2 та 3 збільшуються за рахунок зони 1. Із наближенням швидкості обертання до граничного значення частка зони 2 досягає максимального значення, а частка зони 3 прямує до нуля.

Комбінації зон визначають характерні режими руху незв'язного зернистого матеріалу в камері (рис. 3.2), що залежать від швидкості обертання. *Режим без підкидання* (рис. 3.2.1) характеризується твердотільною зоною при підніманні матеріалу та зоною зсування при опусканні з кутом підйому  $\alpha$  та кутом нахилу вільної поверхні  $\theta$ . У *режимі з частковим підкиданням* (рис. 3.2.2), крім зон твердотільної та зсування, виникає зона підкидання із невідним падінням при опусканні. У *режимі із повним підкиданням* (рис. 3.2.3) виникають зони твердотільна та підкидання із невідним падінням, а зона зсування відсутня. У *режимі неповного центрифугування* (рис. 3.2.4) виникають зазначені дві зони і на поверхні камери починає утворюватись твердотільний пристінковий шар із елементів матеріалу. *Режим у вигляді пристінкового шару* (рис. 3.2.5) характеризується твердотільною зоною для всього матеріалу із перерізом кільцевої форми. Межі переходів режимів руху незв'язних зернистих матеріалів залишаються практично однаковими під час, як прискорення, так і сповільнення обертання.



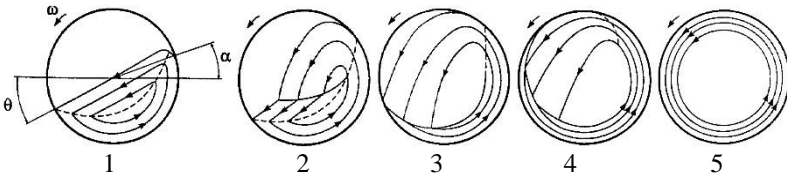


Рис. 3.2. Режими руху незв'язного зернистого матеріалу в обертовій камері: 1 – режим без підкидання частинок, 2 – режим із частковим підкиданням, 3 – режим із повним підкиданням, 4 – режим неповного центрифугування, 5 – режим у вигляді пристінкового шару

Безрозмірними критеріями подібності усталеного руху зернистого матеріалу в довгій обертовій камері, як і для течії рідини, є число Рейнольдса  $Re$  і число Фруда  $Fr$  на циліндричній поверхні камери та ступінь заповнення камери текучим середовищем  $\kappa$ .

Внаслідок усереднення реологічних властивостей зернистих матеріалів при русі в обертовій камері, параметр їх в'язкості у псевдочислі Рейнольдса  $Re$  наближено відображається аналогом  $\nu \approx 1 \text{ м}^2/\text{с}$ . Таке значення аналога кінематичної в'язкості  $\nu$  приблизно характеризує внутрішнє тертя зернистих середовищ при їх зрідженні під час гравітаційної течії в обертовій камері.

Додатковим критерієм подібності руху зернистого матеріалу в обертовій камері є відносний розмір елемента середовища:

$$Dr = \frac{d}{2R},$$

де  $d$  – середній розмір елемента зернистого матеріалу.

Відносний розмір елемента  $Dr$  визначає реологічні властивості зернистого матеріалу. Зі зменшенням  $Dr$  знижується внутрішнє тертя зернистого матеріалу, що посилює зрідження середовища під час течії в обертовій камері.

Типові залежності меж переходу режимів руху зернистого завантаження від ступеня заповнення камери  $\kappa$  при  $R=0,106 \text{ м}$  та  $Dr=0,01$  наведено на рис. 4.3. Штриховими лініями показано межі переходу режимів за умови відсутності можливого

проковзування завантаження, при малому ступені заповнення камери  $\kappa < 0,25-0,3$ , відносно поверхні камери завдяки достатньому зчепленню його із поверхнею камери, наприклад за рахунок виступів на поверхні камери.

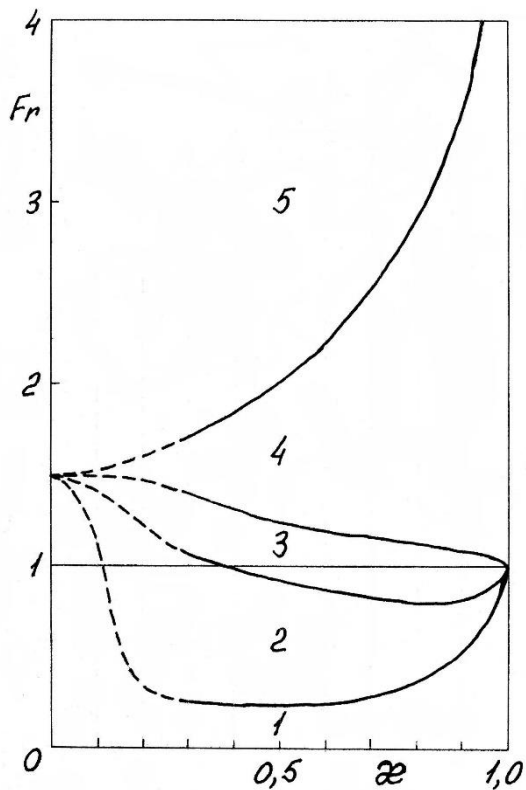


Рис. 3.3. Межі переходу режимів руху незв'язного зернистого матеріалу в обертовій камері від ступеня заповнення  $\kappa$  при  $R=0,106$  м та  $D_r=0,01$  (позначення режимів за рис. 3.2)

На рис. 3.4-3.7, для порівняння, наведено картини руху у перерізі камери, за зростанням швидкості її обертання  $\psi_\omega$ ,

ступеня заповнення  $\kappa$  і відносного розміру елемента  $Dr$ , для різних незв'язних зернистих матеріалів.

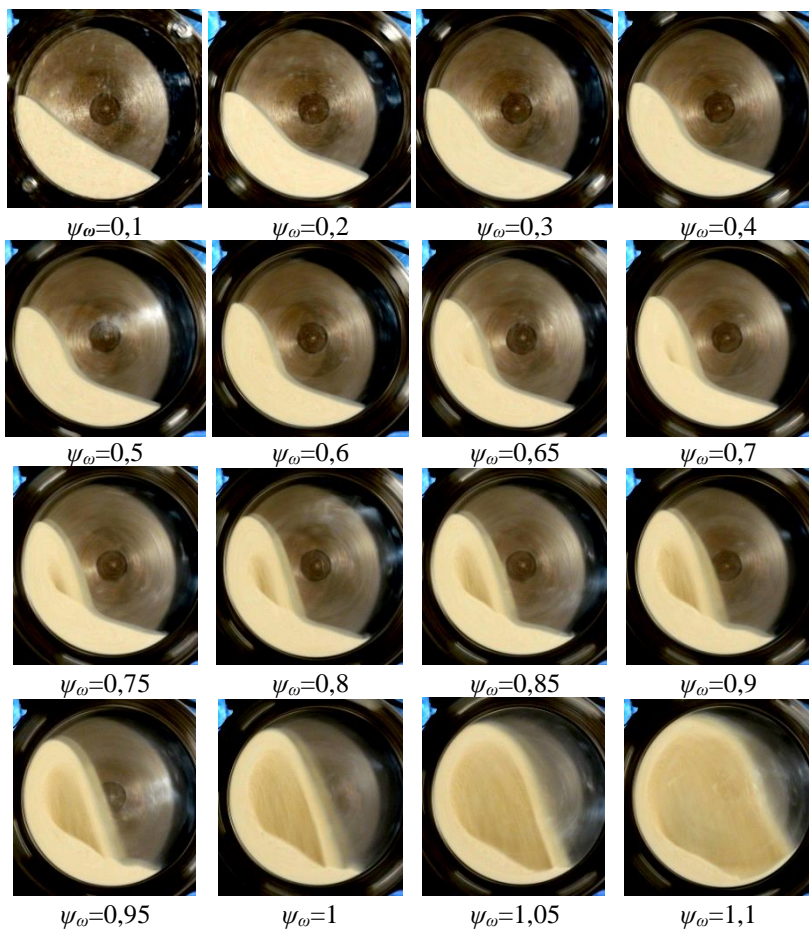


Рис. 3.4. Картини руху незв'язного зернистого матеріалу при  $R=0,106$  м,  $\kappa=0,25$  та  $Dr=0,0024$  у обертовій камері із гладкою поверхнею

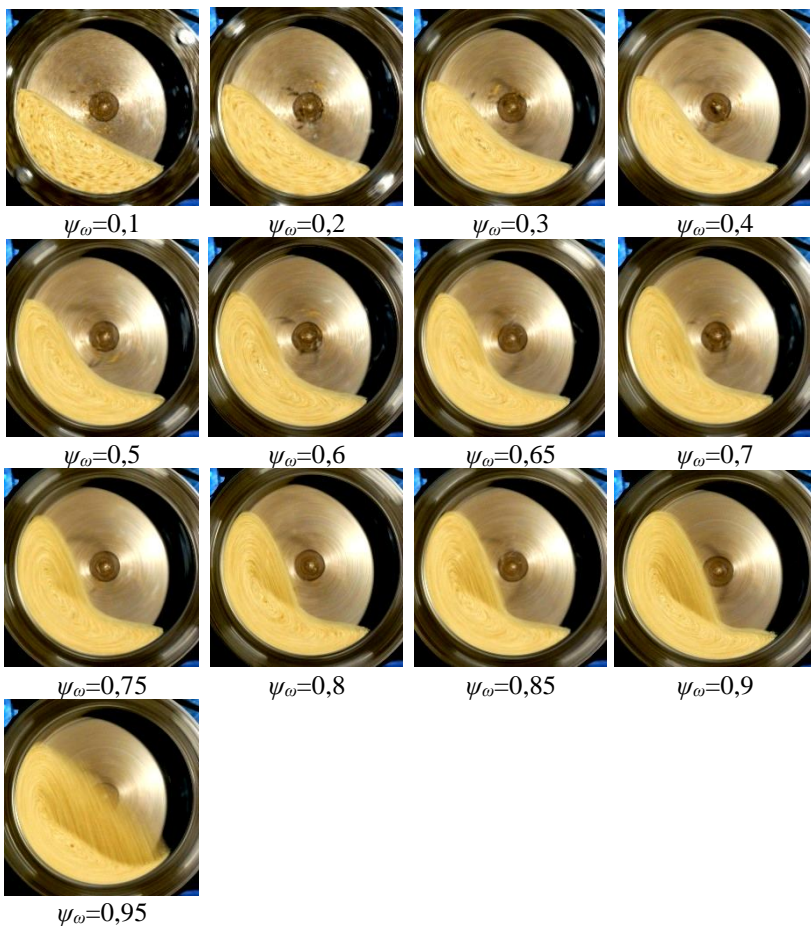


Рис. 3.5. Картини руху незв'язного зернистого матеріалу при  $R=0,106$  м,  $\kappa=0,3$  та  $Dr=0,01$  у обертовій камері із гладкою поверхнею

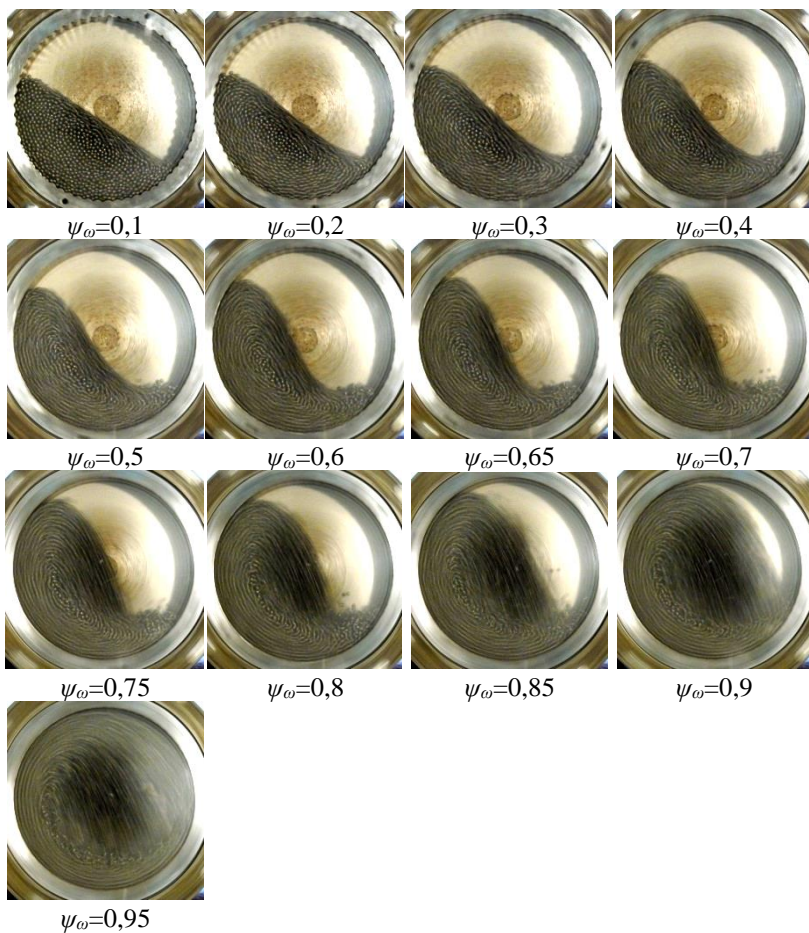


Рис. 3.6. Картини руху незв'язного зернистого матеріалу при  $R=0,1265$  м,  $\kappa=0,4$  та  $Dr=0,022$  у обертовій камері із хвильовою поверхнею

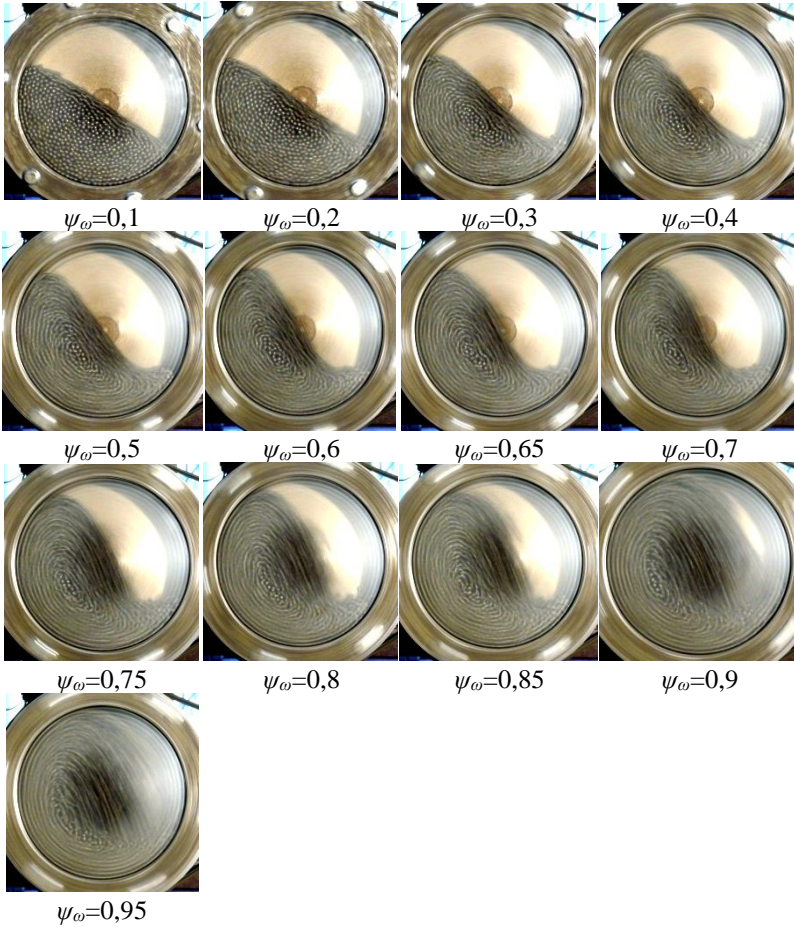


Рис. 3.7. Картини руху незв'язного зернистого матеріалу при  $R=0,106$  м,  $\kappa=0,45$  та  $Dr=0,026$  у обертовій камері із гладкою поверхнею



На рис. 3.8 зображено залежність відносного моменту опору обертанню барабана  $\psi_m$  від числа Фруда  $Fr$  та ступеня заповнення камери  $\kappa$  при  $R=0,106$  м для зернистого матеріалу та  $d/D=0,01$ .

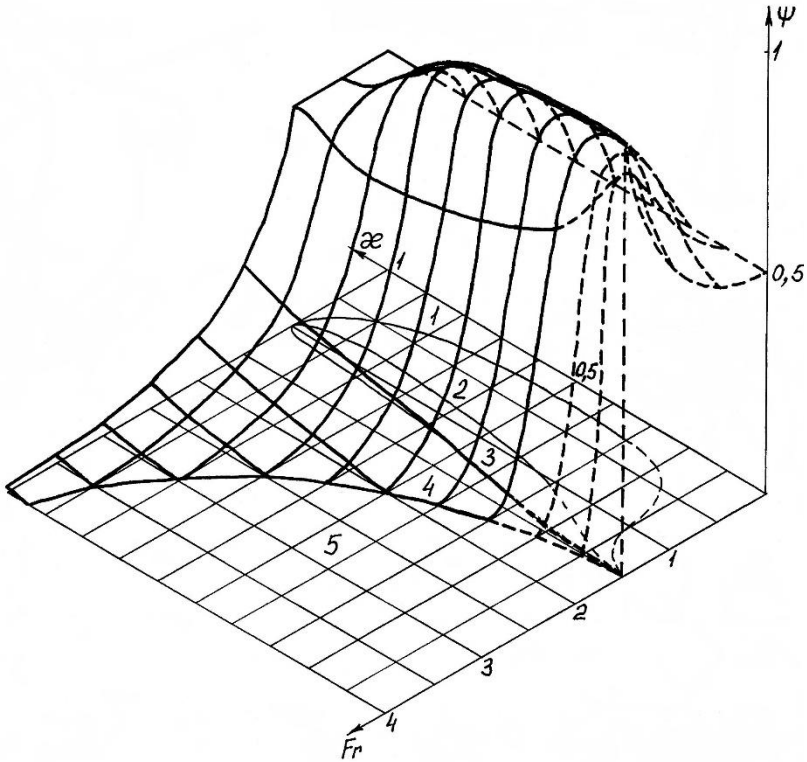


Рис. 3.8. Залежність відносного моменту опору  $\psi_m$  від  $Fr$  та  $\kappa$  при  $R=0,106$  м (позначення режимів за рис. 3.2)

На рис. 3.9 наведено універсальні залежності відносного моменту опору  $\psi_m$  від чисел Фруда  $Fr$  та Рейнольдса  $Re$ . На горизонтальних координатних площинах графіків показано межі переходу режимів руху зернистого завантаження обертової камери.

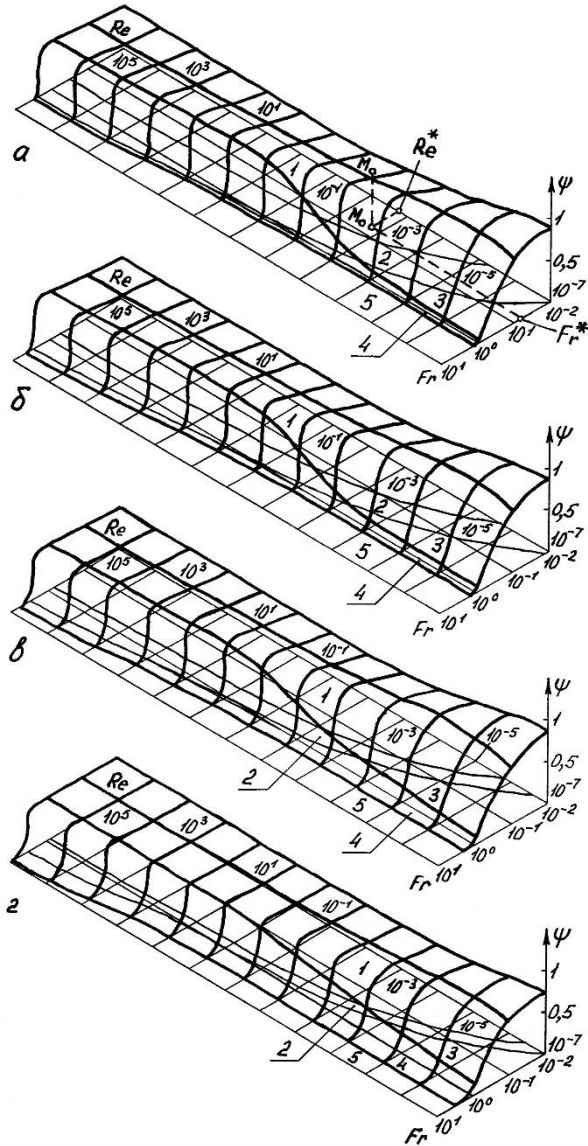


Рис. 3.9. Універсальні залежності відносного моменту опору  $\psi$  від  $Fr$  та  $Re$  при  $\kappa=0,3$  (а),  $\kappa=0,5$  (б),  $\kappa=0,7$  (в) та  $\kappa=0,9$  (г) (позначення режимів за рис. 3.2)



Аналіз рис. 3.8 та 3.9 засвідчує суттєву залежність значення моменту опору від характеру руху завантаження.

При низькій швидкості обертання  $\omega$ , відносний момент має значення  $\psi_m \approx 0,5$ , що відповідає  $\theta \approx 30^\circ - 35^\circ$ . При русі завантаження в режимі без підкидання, зі збільшенням швидкості обертання  $\omega$  момент  $\psi_m$  плавно збільшується від початкового положення – біля 0,5, у режимі з частковим підкиданням – приймає максимальне значення, у режимі з повним підкиданням – різко знижується, а у режимі неповного центрифугування – плавно знижується до нуля.

При малому ступені заповнення камери  $\kappa$ , зростає масова частка та вплив зони підкидання та невідного падіння завантаження порівняно зі зонами зсування та твердотільною. Максимальне значення моменту  $\psi_m$  при цьому набуває найбільшої величини і гранично, при  $\kappa \rightarrow 0$ , наближається до максимуму –  $\psi_{mmax} \rightarrow 1$ . При великому  $\kappa$ , внаслідок скорочення незаповненої частини порожнини та обмеження можливості відносного руху середовища, зона невідного падіння є слабо вираженою, а переважає твердотільна зона. Тоді максимальний  $\psi_m$  набуває малого значення і гранично, при  $\kappa \rightarrow 1$ , наближається до мінімуму –  $\psi_{mmax} \rightarrow 0,5$ .

При низьких значеннях  $Re$  (малому радіусі  $R$ ), внаслідок збільшення швидкості обертання барабана та оборотності середовища в камері, посилюється підкидання елементів завантаження у місці їх відокремлення від поверхні камери, підвищується вплив зони невідного падіння, а також валика зони зсування в режимі без підкидання, а величина кута природного укусу зони зсування  $\theta$  зростає. У цьому випадку  $\psi_{mmax}$  набуває великого значення і гранично, при  $Re \rightarrow 0$ ,  $\psi_{mmax} \rightarrow 1$ . При високому  $Re$  (великому  $R$ ) знижується кутова швидкість барабана  $\omega$  та оборотність завантаження в його камері, що призводить до послаблення підкидання елементів, скороченню зони невідного падіння, а також валика зони зсування, та наближенню кута  $\theta$  до початкового значення  $30^\circ - 35^\circ$ . Тоді  $\psi_{mmax}$  знижується і гранично, при  $Re \rightarrow \infty$ ,  $\psi_{mmax} \rightarrow 0,5$ .

Пристінковий шар незв'язного зернистого матеріалу на поверхні камери утворюється при швидкості її обертання,

більшій за критичну, а не рівній їй. Такий шар ще не починає утворюватись при критичній швидкості на поверхні камери та ще не завершує утворюватись при критичній швидкості на вільній поверхні шару.

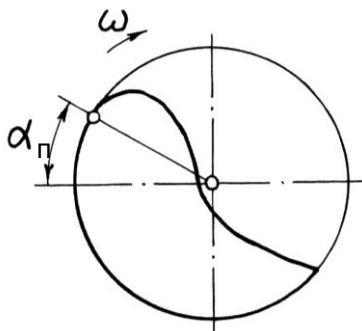


Рис. 3.10. Схема утворення кута  $\alpha_n$  підйому зернистого матеріалу в обертовій камері

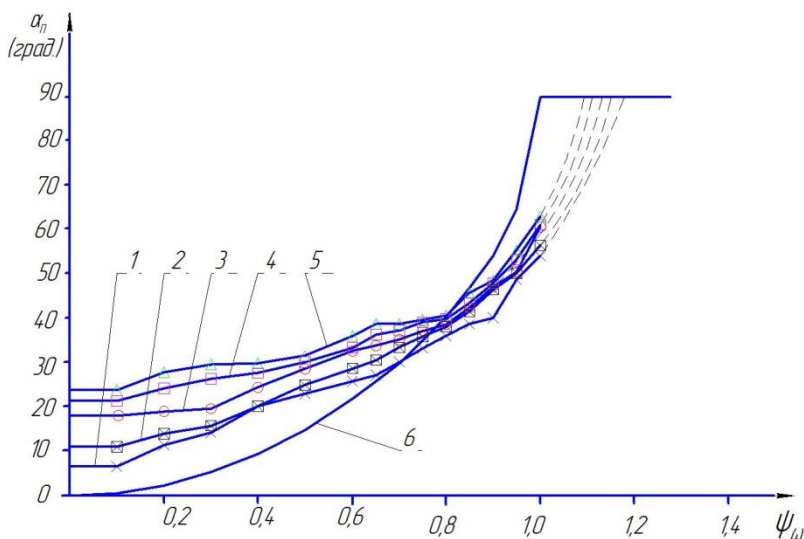


Рис. 3.11. Залежності кута підйому незв'язного зернистого матеріалу  $\alpha_n$  від відносної швидкості обертання камери із гладкою поверхнею  $\psi_\omega$  при  $R=0,106$  м,  $Df=0,01$ : 1 –  $\kappa=0,25$ , 2 –  $\kappa=0,3$ , 3 –  $\kappa=0,35$ , 4 –  $\kappa=0,4$ , 5 –  $\kappa=0,45$ , 6 – за традиційною методикою розрахунку

Початок утворення пристінкового шару завантаження на поверхні камери відповідає досягненню кута підйому завантаження  $\alpha_n$  (рис. 3.10) граничного значення  $90^\circ$ .

Згідно рис. 3.11, при  $R=0,106$  м,  $Dr=0,01$  та  $\kappa=0,25-0,45$ , пристінковий шар починає утворюватись при  $\psi_\omega=1,13-1,18$ . Швидкісна межа утворення пристінкового шару знижується зі збільшенням  $\kappa$  та зменшенням  $Dr$ .

При ступені заповнення камери  $\kappa < 0,25$ , перехід від циркуляційного до режиму руху незв'язного зернистого матеріалу у вигляді пристінкового шару практично не відбувається, оскільки, при  $\theta \approx 30-35^\circ$ , значення кута підйому завантаження  $\alpha_n$  не досягає додатного значення навіть при значному зростанні швидкості обертання камери  $\omega$ .

На рис. 3.12. зображено одержані експериментально універсальні діаграми режимів руху незв'язного зернистого матеріалу в обертівій камері, які побудовано в логарифмічних осях  $Re$  та  $Fr$  для різних значень  $\kappa$ .

Розрахувати величину кутової швидкості обертання камери  $\omega$ , яка відповідає межі переходу режимів руху незв'язного зернистого матеріалу, за допомогою графічних залежностей рис. 3.12 можна у такий спосіб:

1) за величинами координат  $Re^*$  та  $Fr^*$ , що обчислено за допомогою виразів (1.1) та (1.2) для довільного значення  $\omega$ , на графіку діаграми (рис. 3.12) із відповідним значенням  $\kappa$  будується допоміжна точка  $K^*$ ;

2) у випадку невідповідності заданого  $\kappa$  дискретним значенням на діаграмі (рис. 3.12), точка  $K^*$  будується на двох ближчих за  $\kappa$  діаграмах із наступним інтерполюванням значення  $\omega$ ;

3) через отриману точку  $K^*$  проводиться допоміжна похила пряма із кутовим коефіцієнтом 2, яка відповідає умові  $R = \text{const}$ ;

4) для точки перетину допоміжної похилої прямої із певною лінією діаграми (1-2, 2-3, 3-4 або 4-5) для відповідного значення  $\kappa$ , що обчислено за (1.3), визначаються логарифмічні координати  $Re$  та  $Fr$ ;

5) за отриманими координатами точки перетину  $Re$  та  $Fr$  розраховується шукане значення  $\omega$ ;

б) у випадку невідповідності заданого  $\kappa$  дискретним значенням на діаграмі, величина  $\omega$  визначається інтерполюванням за двома отриманими значеннями.

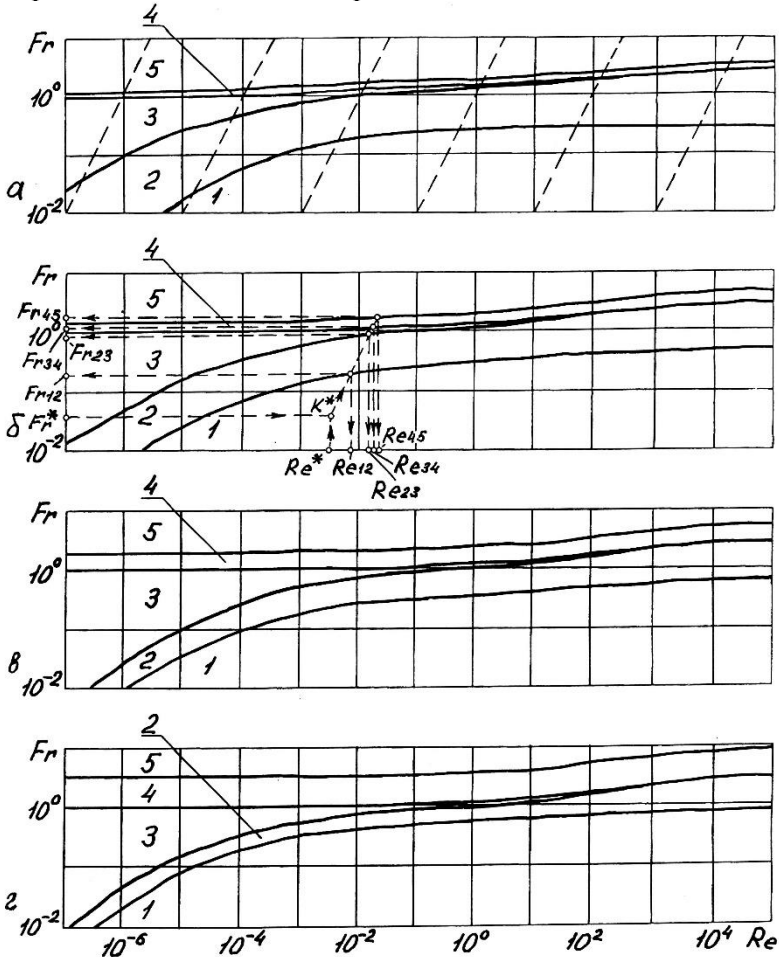


Рис. 3.12. Універсальні діаграми переходу режимів руху незв'язного зернистого матеріалу в обертовій камері та послідовність виконання побудов при розрахунку меж переходу режимів руху за діаграмами (позначення режимів за рис. 3.2):  
 $\kappa=0,3$  (а);  $\kappa=0,5$  (б);  $\kappa=0,7$  (в);  $\kappa=0,9$  (г)

### Порядок виконання роботи

1. Задатись значеннями параметрів системи: вид незв'язного зернистого матеріалу; радіус камери барабана  $R$ , м; ступінь заповнення камери порцією матеріалу  $\kappa$ .

2. Змонтувати в установці барабан із камерою радіусом  $R$ , ступінь заповнення якої незв'язним зернистим матеріалом становить  $\kappa$  (рис. 1.13).

3. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно збільшуючи або зменшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна та візуалізуючи режим руху зернистого матеріалу через прозору торцеву стінку камери, частоти обертання барабана при переході режимів руху (рис. 3.2): без підкидання 1 у режим з частковим підкиданням 2 –  $n'_{12}$ , з частковим підкиданням 2 в режим з повним підкиданням 3 –  $n'_{23}$ , з повним підкиданням 3 в режим неповного центрифугування 4 –  $n'_{34}$ , неповного центрифугування 4 в режим пристінкового шару 5 –  $n'_{45}$ , об./хв.

4. Повторити виконання п. 3 ще два рази та виміряти частоти обертання при переході режимів руху за другим та третім дослідями  $n''_{12}$ ,  $n''_{23}$ ,  $n''_{34}$ ,  $n''_{45}$ ,  $n'''_{12}$ ,  $n'''_{23}$ ,  $n'''_{34}$  та  $n'''_{45}$ , об./хв.

5. Визначити за трьома дослідями середні значення частот обертання при переході режимів руху  $n_{12c}$ ,  $n_{23c}$ ,  $n_{34c}$ , та  $n_{45c}$ , об./хв.:

$$n_{ic} = \frac{n'_i + n''_i + n'''_i}{3},$$

де  $i=12, 23, 34$  або  $45$  – індекс.

6. Визначити дослідні значення кутових швидкостей обертання барабана при переході режимів руху  $\omega_{12\partial}$ ,  $\omega_{23\partial}$ ,  $\omega_{34\partial}$ , та  $\omega_{45\partial}$ , 1/с:

$$\omega_{i\partial} = \frac{\pi \cdot n_{ic}}{30},$$

де  $i=12, 23, 34$  або  $45$  – індекс.

7. Визначити, надаючи кутовій швидкості  $\omega$  значення  $\omega=1$  1/с, та враховуючи, що  $v \approx 1$  м<sup>2</sup>/с, координати  $Re^*=(\omega R^2)/\nu$  та  $Fr^*=(\omega^2 \cdot R)/g$  допоміжної точки на діаграмі  $Re-Fr$ :

$$Re^* = R^2, \quad Fr^* = \frac{R}{g},$$

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

8. Визначити десяткові логарифми координат допоміжної точки:

$$\log(Re^*), \quad \log(Fr^*).$$

9. Побудувати на копії графіка діаграми  $Re-Fr$  (рис. 3.12) в логарифмічних осях для відповідного значення ступеня заповнення  $\kappa$  ( $a$ ,  $b$ ,  $v$  або  $\varepsilon$ ), за одержаними логарифмами координат  $\log(Re^*)$  та  $\log(Fr^*)$ , допоміжну точку  $K^*$ .

10. Провести на діаграмі через одержану точку  $K^*$  допоміжну похилу пряму із кутовим коефіцієнтом 2, яка відповідає умові  $R=\text{const}$ .

11. Виміряти на логарифмічних осях діаграми логарифмічні координати одержаних точок перетину допоміжної прямої із відповідними лініями графіку (1-2, 2-3, 3-4 та 4-5):

$$\log(Re_{12}), \quad \log(Fr_{12}), \quad \log(Re_{23}), \quad \log(Fr_{23}), \\ \log(Re_{34}), \quad \log(Fr_{34}), \quad \log(Re_{45}), \quad \log(Fr_{45}).$$

12. Визначити, за одержаними логарифмічними координатами точок перетину допоміжної прямої із відповідними лініями графіку (1-2, 2-3, 3-4 та 4-5), їх координати  $Re_{12}$  і  $Fr_{12}$ ,  $Re_{23}$  і  $Fr_{23}$ ,  $Re_{34}$  і  $Fr_{34}$  та  $Re_{45}$  і  $Fr_{45}$ :

$$Re_i = 10^{\log(Re_i)}, \quad Fr_i = 10^{\log(Fr_i)},$$

де  $i=12, 23, 34$  або  $45$  – індекс.

13. Визначити теоретичні значення кутових швидкостей обертання барабана при переході режимів руху  $\omega_{12m}$ ,  $\omega_{23m}$ ,  $\omega_{34m}$ , та  $\omega_{45m}$ ,  $1/c$ :

$$\omega_{im} = \frac{\frac{Re_i \cdot v}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_i \cdot g}{R}}}{2},$$

де  $i=12, 23, 34$  або  $45$  – індекс,  $v=1 \text{ м}^2/\text{с}$  – аналог в'язкості.

14. Визначити розбіжність отриманих дослідних та теоретичних значень кутових швидкостей обертання камери при переході режимів руху  $\varepsilon_{12}$ ,  $\varepsilon_{23}$ ,  $\varepsilon_{34}$  та  $\varepsilon_{45}$ , %:

$$\varepsilon_i = \frac{|\omega_{di} - \omega_{mi}|}{\omega_{mi}} \cdot 100\%,$$

де  $i=12, 23, 34$  або  $45$  – індекс.

15. Результати вимірювань та обчислень звести у табл.3.1:

Таблиця 3.1

Параметри		Значення параметрів для меж переходу режимів руху з індексами $i$			
		$i=1-2$	$i=2-3$	$i=3-4$	$i=4-5$
$n_i'$	(об./хв.)				
$n_i''$					
$n_i'''$					
$n_{ic}$					
$\omega_{i0}$	(1/с)				
$Re^*$	(п. 7)		те саме	те саме	те саме
$Fr^*$			те саме	те саме	те саме
$\log(Re^*)$	(п. 8)		те саме	те саме	те саме
$\log(Fr^*)$			те саме	те саме	те саме
$\log(Re_i)$	(п. 11)				
$\log(Fr_i)$					
$Re_i$	(п.12)				
$Fr_i$					
$\omega_{im}$	(1/с)				
$\varepsilon_i$	(%)				

Вид незв'язного зернистого матеріалу – ...;  $R=$  ... м;  $\kappa=$  ...

### **Зміст звіту про виконання лабораторної роботи 3**

1. Номер та назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Копія рис. 3.1 та 3.2 із позначеннями.
4. Визначення зон картини трифазного режиму руху в перерізі камери за с. 36 (виділено жирним шрифтом).
5. Визначення режимів руху матеріалу за с. 37 (виділено жирним шрифтом).
6. Текстова та аналітична визначення відносного розміру елемента зернистого заповнення камери за с. 38 (виділено жирним шрифтом).
7. Копія рис. 3.12 із виконаними побудовами.
8. Заповнена табл. 3.1 за п. 15.



## Лабораторна робота 4

### ЕФЕКТ УСЕРЕДНЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЕРНИСТОГО ЗАПОВНЕННЯ КАМЕРИ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА

**Мета роботи:** Експериментальним шляхом визначити величини кута обрушення, кута природного укусу та кута нахилу вільної поверхні в режимі руху без підкидання частинок різних зернистих заповнень обертової камери з метою порівняння їх значень.

#### Основні теоретичні відомості

Рух зернистих середовищ здійснюється у двох режимах – повільної течії та швидкого руху.

У першому режимі *повільної або пластичної течії* елементи зернистого середовища рухаються за деякими певними траєкторіями, перебуваючи в неперервному ковзаючому контакті один з одним, і внутрішні напруження в середовищі виникають внаслідок *сухого кулонівського тертя*, що діє між ними. Це спричинює *незалежну від швидкості деформації пластичну поведінку* зернистого матеріалу, яка описується в рамках теорії граничної рівноваги.

У другому режимі *швидкого руху* елементи зернистого середовища рухаються хаотично, подібно до молекул в густому газі або в рідині, і внутрішні напруження в середовищі виникають внаслідок *переносу імпульсу аналогічно тому, як це відбувається в рідині або газі*. Такий механізм утворення напружень приводить до *істотної залежності їх від швидкості зсування*, що докорінним чином відрізняє поведінку зернистого матеріалу в режимі швидкого руху від його поведінки при пластичній течії.

Швидкі течії зернистих середовищ звичайно реалізуються в гравітаційних потоках та відрізняються відносно великими швидкостями елементів. Поведінка зернистих матеріалів при такого типу течіях схожа на поведінку в'язкої рідини в аналогічних умовах та принципово відрізняється від передбачень теорій, які базуються на класичних підходах Кулона. Загальна

фізична сторона виникнення квазів'язкісних ефектів при швидких течіях сухих зернистих середовищ пояснюється тим, що при макрорусі зсувного потоку в поздовжньому напрямку виникають переміщення частинок в поперечному напрямку, які передають від шару до шару додаткові кількості руху і тим самим викликають появу додаткових в'язкісних дотичних напружень.

У зсувному потоці зернистих середовищ існують три основні механізми виникнення напружень: *сухе тертя, перенесення імпульсу за рахунок переміщення елементів з одного шару в інший та перенесення імпульсу за рахунок зіткнень між елементами.*

Хоча, при деяких режимах течії, всі зазначені три механізми можуть працювати одночасно, звичайно переважаючу роль грає один з них. *При високих концентраціях та низьких швидкостях зсування, елементи перебувають у тісному контакті, напруження не залежать від швидкості і має місце перший з перерахованих вище механізмів. При низьких концентраціях та високих швидкостях зсування зернистий матеріал веде себе подібно до розрідженого газу, напруження зсування в якому виникають за рахунок обміну елементами між сусідніми шарами, що рухаються. І нарешті, коли концентрація та швидкість зсування є помірно високими, ситуація є аналогічною до простої рідини, яка описується за допомогою моделі твердих сфер, в якій обмін імпульсами виникає внаслідок тільки зіткнень між елементами, і тому переважає третій механізм. У цьому випадку добре сипке середовище описується як близьке за властивостями до звичайної ньютонівської рідини.*

*Особливістю руху зернистого заповнення обертової камери є перш за все існування одночасно всіх трьох механізмів виникнення напружень в зсувному потоці. Перший механізм відповідає квазітвердотільному руху завантаження поблизу стінки барабана, другий – квазігазоподібній течії при невеликому падінні елементів після підкидання, третій – квазірідинній течії при зсуванні осипанням. Проте, зріджуючий вплив збільшення швидкості обертання камери на течію заповнення обмежується зростанням відцентрових сил інерції аж до утворення пристінкового шару.*

У режимі повільної течії, внаслідок специфічності структури різних зернистим середовищ, сили сухого тертя характеризуються істотною відмінністю значень. Натомість однаковий характер взаємодії елементів при швидких рухах в зсувному шарі приводить до вирівнювання квазів'язких та усереднення реологічних характеристик середовищ. При цьому хаотичні складові руху елементів спричинюють трансформацію сухого тертя у квазів'язке та виникнення квазізрідження для основних рухів завантаження.

*Фрикційні властивості* визначають поведінку зернистих середовищ у вигляді відносної рухливості, текучості або здатності до переміщень, під дією зовнішніх полів, що виникають за рахунок дії прикладеного до матеріалу навантаження (тиску) та гравітаційних сил. Такі властивості перешкоджають переміщенню частинок зернистого матеріалу у дотичному до поверхні контакту напрямі.

Для оцінки фрикційних властивостей зернистого заповнення обертової камери при різних режимах руху зручно використати такі характеристики: кут обрушення  $\alpha_{обр}$ , кут природного укусу  $\alpha_{пр}$  та кут нахилу вільної поверхні заповнення камери в режимі руху без підкидання частинок  $\theta$ . Ці характеристики є відносними, що опосередковано оцінюють структурно-механічні властивості зернистих матеріалів. Опосередковані методи залишаються найпоширенішими методами практичного оцінювання властивостей матеріалів. Поширеність такої методики пояснюється простотою та надійністю вимірювань, а також комплексним характером цієї величини. Зазначені кути дають безпосередню уяву про рухливість або текучість зернистого середовища у стані вільної насипки, повільної течії та швидкого руху і використовуються для порівняльної оцінки реологічних та технологічних властивостей матеріалів.

**Кут обрушення  $\alpha_{обр}$**  характеризує положення відносно горизонтальної площини поверхні укусу, що утворюється при обрушенні та сповзанні частини шару зернистого матеріалу внаслідок видалення підпірної стінки. Такий кут ще називається *статичним кутом природного укусу*.

Найпростіший метод визначення кута обрушення зернистих матеріалів  $\alpha_{обр}$  полягає у використанні бічної стінки, що видаляється (рис. 4.1).

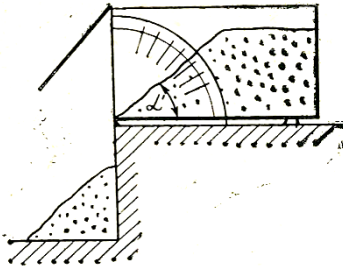


Рис. 4.1. Схема методу визначення кута обрушення зернистого матеріалу  $\alpha_{обр}$  за допомогою бічної стінки

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

**Кут природного укосу  $\alpha_{пр}$**  характеризує нахил твірної конуса, що отримується при висипанні з воронки без динамічної дії певної порції зернистого матеріалу на горизонтальну поверхню, до площини основи конуса.

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

Динамічний кут природного укосу  $\alpha_{пр}$  завжди є більшим за кут обрушення  $\alpha_{обр}$ .

Найпростіший метод визначення кута природного укосу зернистого матеріалу  $\alpha_{пр}$  полягає у застосуванні воронки (рис. 4.2).

Досліджуваний зернистий матеріал випускається із воронки 1 на горизонтальну поверхню 2, внаслідок чого на

поверхні утворюється конус 3 з матеріалу. Після цього вимірюється кут нахилу  $\alpha_{np}$  твірної такого конуса до горизонталі, що і буде кутом природного укосу досліджуваного матеріалу.

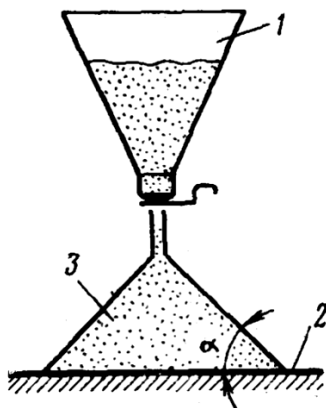


Рис. 4.2. Схема методу визначення кута природного укосу зернистого матеріалу  $\alpha_{np}$  за допомогою воронки: 1 – воронка, 2 – горизонтальна поверхня, 3 – конус із зернистого матеріалу

Величини кутів обрушення  $\alpha_{обр}$  та природного укосу  $\alpha_{np}$  зернистого матеріалу пов'язані зі значенням кута його внутрішнього тертя. Для **крупнозернистих незв'язних матеріалів кут обрушення  $\alpha_{обр}$  приблизно дорівнює куту внутрішнього тертя спокою**, а кут природного укосу  $\alpha_{np}$  **приблизно дорівнює куту внутрішнього тертя руху**. Натомість для дрібнозернистих зв'язних матеріалів кути природного укосу обрушення  $\alpha_{обр}$  та  $\alpha_{np}$  можуть бути значно меншими за кути внутрішнього тертя спокою та руху.

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

Для визначення кутів обрушення  $\alpha_{обр}$  та природного укосу  $\alpha_{np}$  зернистих матеріалів використовується метод обертової камери (рис. 4.3).

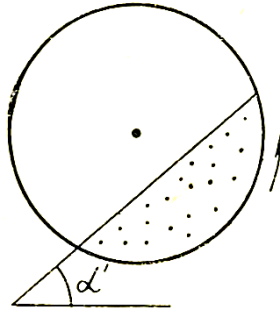


Рис. 4.3. Схема методу визначення кутів обрушення  $\alpha_{обр}$  та природного укосу  $\alpha_{пр}$  зернистого матеріалу за допомогою обертової камери

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

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

При визначенні кута природного укосу  $\alpha_{пр}$  зернистого матеріалу, барабан зупиняється у момент завершення осипання вільної поверхні матеріалу. Фіксується мінімальне значення кута нахилу вільної поверхні матеріалу до горизонталі після його осипанням.

**Кут нахилу вільної поверхні заповнення обертової камери в режимі руху без підкидання частинок  $\theta$  характеризує положення, відносно горизонтальної площини, поверхні зсувного шару в усталеному русі зернистого матеріал при**

### стаціонарному обертанні камери.

Для визначення кута нахилу вільної поверхні заповнення обертової камери в русі  $\theta$  барабан приводиться в обертання із мінімальною стаціонарною швидкістю, що відповідає усталеному режиму руху зернистого заповнення в режимі без підкидання частинок. Підтримування мінімального значення швидкості обертання запобігає виникненню додаткової дії, що прискорює зсувний шар заповнення, з боку зони невеликого падіння. Фіксується значення кута нахилу поверхні зсувного шару зернистого заповнення до горизонталі (рис. 4.4).

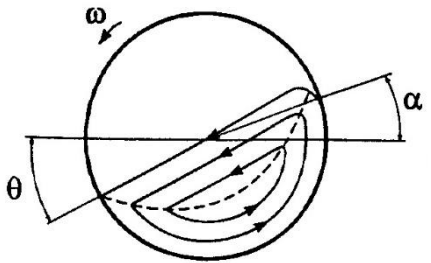


Рис. 4.4. Схема методу визначення кута нахилу вільної поверхні зернистого заповнення обертової камери в режимі руху без підкидання частинок  $\theta$

*Ефект усереднення реологічних властивостей зернистого заповнення обертової камері* полягає у зниженні значення та звуженні діапазону зміни величини кута нахилу вільної поверхні заповнення обертової камери в режимі руху без підкидання частинок  $\theta$  та кута природного укосу  $\alpha_{np}$ , порівняно зі значенням кута обрушення  $\alpha_{обр}$  (рис. 4.5). Діапазон зміни величини кута  $\theta$  наближається до доволі вузького діапазону 32-35°.

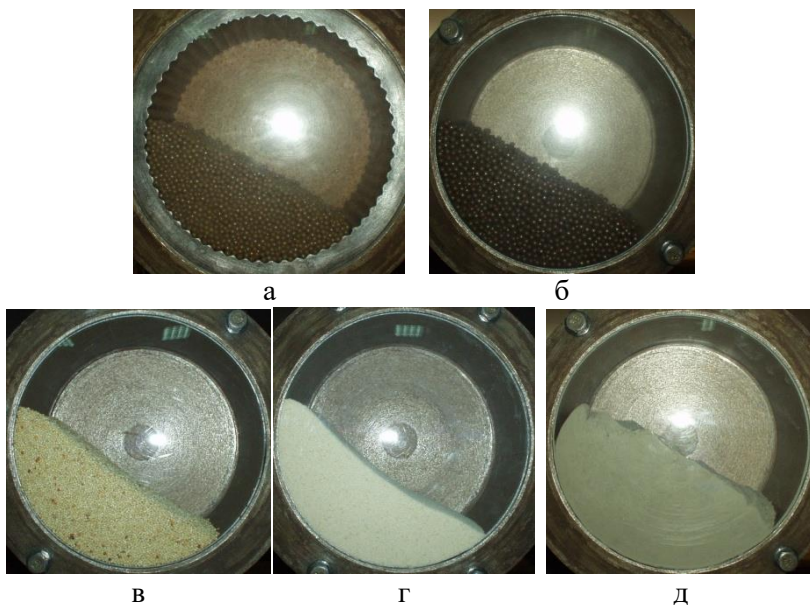


Рис. 4.5. Картини руху зернистого заповнення обертової камери із мінімальним значенням кута нахилу вільної поверхні зернистого заповнення обертової камери в русі при відносній швидкості обертання  $\psi_{\omega}=0,1$ : а – сталеві кульки  $Dr=0,022$ ,  $\kappa=0,3$ , хвилюва камера,  $\theta=32^{\circ}$ ; б – сталеві кульки  $Dr=0,026$ ,  $\kappa=0,3$ , гладка камера,  $\theta=32^{\circ}$ ; в – зернистий матеріал  $Dr=0,01$ ,  $\kappa=0,3$ , гладка камера,  $\theta=33^{\circ}$ ; г – зернистий матеріал  $Dr=0,0024$ ,  $\kappa=0,3$ , гладка камера,  $\theta=34-35^{\circ}$ ; д – цемент  $Dr=(1,4-38) \cdot 10^{-5}$ ,  $\kappa=0,3$ , гладка камера,  $\theta=33-35^{\circ}$

В табл. 4.1 наведено результати реалізації прояву ефекту усереднення реологічних властивостей зернистого заповнення обертової камери за рис. 4.5, де:  $Dr$  – відносний розмір елемента зернистого заповнення камери,  $\kappa$  – ступінь заповнення камери,  $\alpha_{обр}$  – кут обрушення,  $\theta_{min}$  – кут нахилу вільної поверхні зернистого заповнення обертової камери в русі.



Таблиця 4.1

Усереднення кута нахилу вільної поверхні зернистого заповнення обертової камери в режимі руху без підкидання частинок  $\theta$  для різних матеріалів

Вид зернистого матеріалу	$Dr$	$\kappa$	Форма поверхні камери	$\alpha_{обр}$ (град.)	$\theta$ (град.)
Стальні кульки	0,022	0,3	Хвильова	35-37	32
Стальні кульки	0,026	0,3	Гладка	35-37	32
Зернистий матеріал	0,01	0,3	Гладка	40	33
Зернистий матеріал	0,0024	0,3	Гладка	44-45	34-35
Цемент	$(1,4...38) \cdot 10^{-5}$	0,4	Гладка	53-55	33-35

*Прояв ефекту усереднення реологічних властивостей зернистого заповнення обертової камери обґрунтовує використання аналога кінематичної в'язкості зернистих середовищ у вигляді константи  $\nu \approx 1 \text{ м}^2/\text{с}$  для формалізації псевдочисла Рейнольдса  $Re$  як критерію подібності руху.*

### Порядок виконання роботи

1. Задатись значеннями параметрів для першого випадку заповненого барабана: вид зернистого матеріалу 1; радіус камери  $R_1$ , м; відносний розмір елемента зернистого заповнення камери  $Dr_1$ ; ступінь заповнення камери  $\kappa_1$ .

2. Змонтувати в установці барабан із камерою радіусом  $R_1$ , ступінь заповнення якої зернистим матеріалом 1 становить  $\kappa_1$  (рис. 1.13).

3. Привести барабан в обертання і зупинити, після декількох обертів, для набуття вільною поверхнею зернистого заповнення камери горизонтальної плоскої форми.

4. Привести барабан у повільне обертання і зупинити у момент, що передує початку осипання вільної поверхні зернистого заповнення камери.

5. Виміряти за допомогою транспортира максимальне

значення кута нахилу вільної поверхні зернистого заповнення камери до горизонталі до його осипання, що відповідає куту обрушення  $\alpha_{обр1}$ , град.

6. Привести барабан в обертання і зупинити, після декількох обертів, для набуття вільною поверхнею зернистого заповнення камери горизонтальної плоскої форми.

7. Привести барабан у повільне обертання і зупинити у момент завершення осипання вільної поверхні зернистого заповнення камери.

8. Виміряти за допомогою транспортира значення кута нахилу вільної поверхні зернистого заповнення камери до горизонталі після його осипанням, що відповідає куту природного укосу  $\alpha_{пр1}$ , град.

9. Привести барабан в обертання із мінімально можливою величиною стаціонарної кутової швидкості для підтримування усталеного режиму руху зернистого заповнення камери без підкидання частинок.

10. Виміряти, за допомогою транспортира, значення кута нахилу поверхні зсувного шару зернистого заповнення до горизонталі, що відповідає куту нахилу вільної поверхні заповнення обертової камери в режимі руху без підкидання частинок  $\theta_1$ , град.

11. Результати вимірювань та обчислень занести у табл. 4.2:

Таблиця 4.2

Параметри заповненого барабана		Значення параметрів заповненого барабана з індексом $i$		
		$i=1$	$i=2$	$i=3$
Вид зернистого матеріалу				
$R_i$	(м)			
$Dr_i$				
$\kappa_i$				
$\alpha_{обр_i}$	(град.)			
$\alpha_{пр_i}$	(град.)			
$\theta_i$	(град.)			

12. Задатись значеннями параметрів для другого випадку заповненого барабана: вид зернистого матеріалу 2; радіус камери  $R_2$ , м; відносний розмір елемента зернистого заповнення камери  $Dr_2$ ; ступінь заповнення камери порцією матеріалу  $\kappa_2$ .

13. Виконати п.п. 2-10 і результати вимірювань та обчислень занести у табл. 4.2.

14. Задатись значеннями параметрів для третього випадку заповненого барабана: вид зернистого матеріалу 23 радіус камери  $R_3$ , м; відносний розмір елемента зернистого заповнення камери  $Dr_3$ ; ступінь заповнення камери порцією матеріалу  $\kappa_2$ .

15. Виконати п.п. 2-10 і результати вимірювань та обчислень занести у табл. 4.2.

16. Сформулювати, на основі отриманих в роботі результатів, висновок щодо прояву ефекту усереднення реологічних властивостей зернистого заповнення обертової камері.

#### **Зміст звіту про виконання лабораторної роботи 4**

1. Номер та назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Копія рис. 4.3 та 4.4 із позначеннями.
4. Визначення ефект усереднення реологічних властивостей зернистого заповнення обертової камері за с. 60 (виділено жирним шрифтом).
5. Визначення кута обрушення  $\alpha_{обр}$ , кута природного укусу  $\alpha_{np}$  та кута нахилу вільної поверхні заповнення камери в режиму руху без підкидання частинок  $\theta$  за с. 56 та 59 (виділено жирним шрифтом).
6. Визначення співвідношення між кутами обрушення  $\alpha_{обр}$  і природного укусу  $\alpha_{np}$  та кутами внутрішнього тертя спокою і руху для крупнозернистих незв'язних зернистих матеріалів за с. 57-58 (виділено жирним шрифтом).
7. Заповнена табл. 4.2 за п. 11.
8. Висновок за п. 16 за с. 55 (виділено жирним шрифтом).

## Лабораторна робота 5

### ЕФЕКТ ПОСИЛЕННЯ СХОЖОСТІ ПОВЕДІНКИ ЗВ'ЯЗНОГО ЗЕРНИСТОГО ЗАПОВНЕННЯ КАМЕРИ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА ІЗ ТЕЧІЄЮ РІДИНИ ЗІ ЗБІЛЬШЕННЯМ ЗЧЕПЛЕННЯ

**Мета роботи:** Експериментальним шляхом визначити величини швидкостей обертання барабана, які відповідають межах переходу режимів руху, та мінімальне значення кута нахилу вільної поверхні заповнення в русі для незв'язного та зв'язного зернистого заповнення камери, з метою порівняння їх значень.

#### Основні теоретичні відомості

Зв'язні властивості визначають поведінку зернистих середовищ у вигляді злипання, налипання або здатності до зчеплення, під дією внутрішніх полів. Такі поля збуджуються міжчастинковими силами, джерелами яких є структурні елементи зернистого матеріалу.

Зв'язні властивості перешкоджають переміщенню частинок зернистого матеріалу у нормальному до поверхні контакту напрямі.

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

***Аутогезією є зв'язок між частинками, що дотикаються. Аутогезійний зв'язок, або злипання, перешкоджає роз'єднанню частинок зернистого матеріалу.***

Найбільший прикладний інтерес становить аутогезійна взаємодія між множиною частинок, що складають матеріал.

Проявами фізичних та хімічних зв'язків між частинками є сили хімічної природи, молекулярні сили, іонно-електричні сили, капілярні, електростатичні (кулонівські) сили, магнітні та сили механічного зчеплення.

***Адгезією є зв'язок між частинками та твердою поверхнею – стінкою камери або поверхнею робочого органу. Адгезійний зв'язок, або прилипання, перешкоджає роз'єднанню частинок зернистого матеріалу та поверхні.***

Силами, що визначають адгезійну взаємодію, є молекулярні, кулонівські, капілярні та сили електричної взаємодії.

Дія сил аутогезії між частинками та сил адгезії між частинками та твердою поверхнею спричинює *злежуваність* зернистих матеріалів, внаслідок чого втрачається їх текучість при тривалому зберіганні.

Зчіпні властивості зв'язного зернистого заповнення обертової камери істотно посилюють ефект квазізрідження зернистого матеріалу під час швидких рухів.

*Ефект посилення схожості поведінки зв'язного зернистого заповнення обертової камери із течією рідини зі збільшенням зчеплення* полягає у послабленні схожості поведінки зв'язного зернистого матеріалу в камері (рис. 5.1) із рухом незв'язного матеріалу (рис. 5.2) та посилення схожості його поведінки із течією рідини (рис. 5.3).

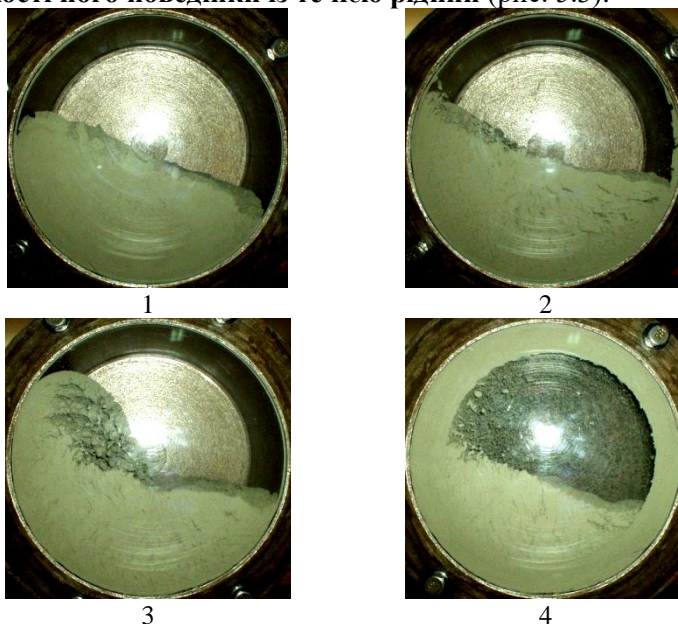


Рис. 5.1. Картини руху зв'язного зернистого заповнення обертової камери при  $Dr=(1,4...38) \cdot 10^{-5}$  (цемент),  $R=0,106$  м та  $\kappa=0,4$ :

1 –  $\psi_{\omega}=0,7$ , 2 –  $\psi_{\omega}=1,1$ , 3 –  $\psi_{\omega}=1,4$ , 4 –  $\psi_{\omega}=1,6$



Рис. 5.2. Картина руху незв'язного зернистого заповнення обертової камери при  $D_f=0,01$ ,  $R=0,106$  м,  $\kappa=0,4$  та  $\psi_\omega=0,7$

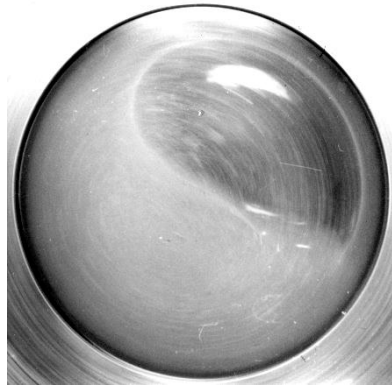


Рис. 5.3. Картина течії в'язкого рідкого заповнення обертової камери при  $\nu=10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=0,0265$  м,  $\kappa=0,7$  та  $\psi_\omega=0,71$

*Картини руху зв'язного зернистого заповнення обертової камери (рис. 5.1) мають суттєві відмінності, порівняно із картинами руху для незв'язного заповнення (рис. 3.2).*

При циркуляційному русі зв'язного зернистого заповнення обертової камери, на відміну від руху незв'язного заповнення (рис. 3.2.2-3.2.4), через значне спотворення характеру течії **не виникають режими руху з частковим підкиданням, з повним підкиданням та неповного центрифугування**, подібно до течії рідкого заповнення.

Величини *кута підйому* та *кута нахилу вільної поверхні*, при русі зв'язного зернистого заповнення обертової камери, є суттєво меншими за величини таких кутів при русі незв'язного заповнення.

*Зона невірального падіння* зв'язного зернистого заповнення в поперечному перерізі обертової камери **трансформується у вихровий валик**, як при течії рідини (рис. 5.1.3). **Величина частки зони невірального падіння**, при русі зв'язного зернистого заповнення, є меншою за величину такої частки при русі незв'язного заповнення.

**Зона пристінкового шару**, при русі зв'язного зернистого заповнення обертової камери, **утворюється без виникнення режиму руху із повним підкиданням** частинок, аналогічно до течії рідкого заповнення камери. **Товщина зони пристінкового шару**, зі збільшенням швидкості обертання, **плавно зростає при русі решти заповнення** у нижній частині камери у **циркуляційному режимі**, як при течії рідини (рис. 5.1.4).

При русі зв'язного зернистого заповнення обертової камери **виникає ефект режимного гістерезису**, що є властивим течії рідкого заповнення камери. Такий ефект полягає у перевищенні величини швидкості обертання камери  $\omega_1$  при переході циркуляційного в режим руху у вигляді пристінкового шару, під час прискорення обертання, над величиною швидкості обертання  $\omega_2$  при зворотному переході режимів руху матеріалу, під час сповільнення обертання (рис. 5.4-5.7). Прояв ефекту режимного гістерезису посилюється зі збільшенням числа Рейнольдса  $Re$  та ступеня заповнення камери  $\kappa$ .

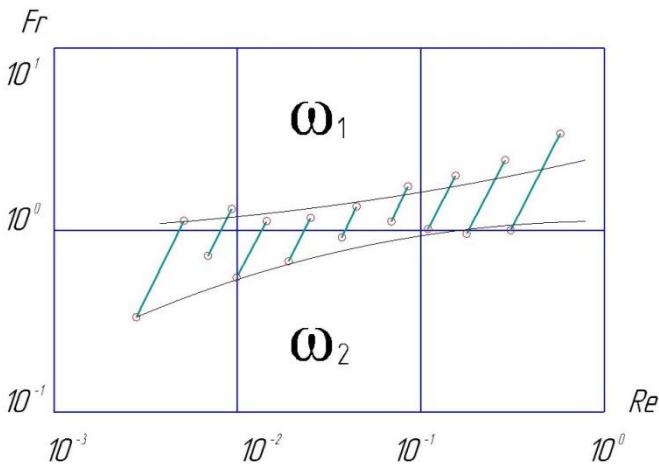


Рис. 5.4. Універсальні діаграми меж переходу режимів руху зв'язного зернистого заповнення обертової камери (для цементу) при  $\kappa=0,3$ :  $\omega_1$  – межа переходу циркуляційного режиму руху в режим у вигляді пристінкового шару під час прискорення обертання,  $\omega_2$  – межа зворотного переходу режимів під час сповільнення обертання

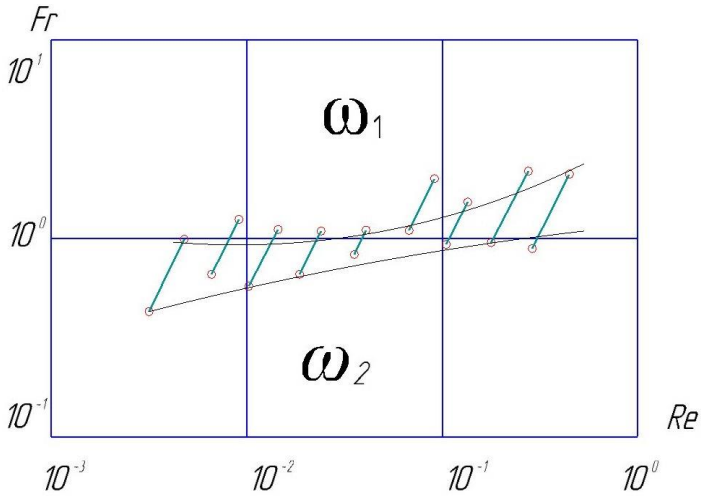


Рис. 5.5. Універсальні діаграми меж переходу режимів руху зв'язного зернистого заповнення обертової камери (для цементу) при  $\kappa=0,5$  (позначення за рис. 5.4)

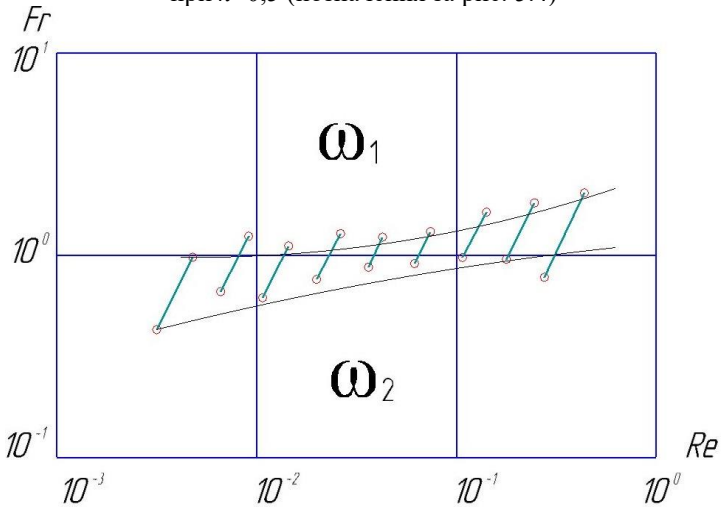


Рис. 5.6. Універсальні діаграми меж переходу режимів руху зв'язного зернистого заповнення обертової камери (для цементу) при  $\kappa=0,7$  (позначення за рис. 5.4)



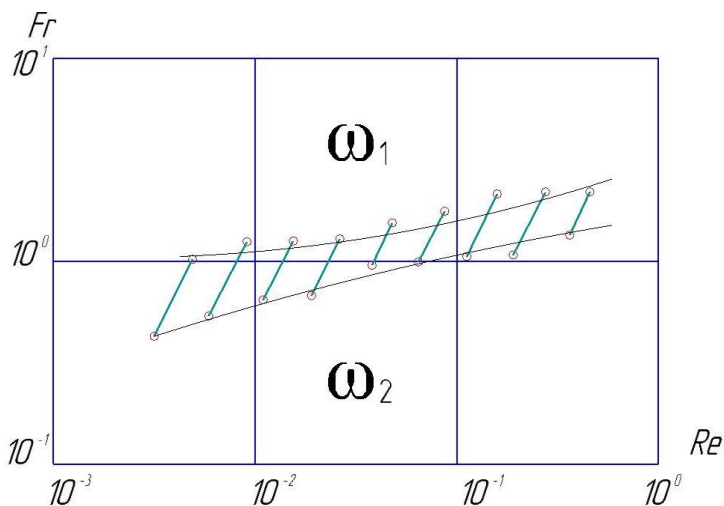


Рис. 5.7. Універсальні діаграми меж переходу режимів руху зв'язного зернистого заповнення обертової камери (для цементу) при  $\kappa=0,9$  (позначення за рис. 5.4)

*Величина відносної швидкості обертання при переході циркуляційного режиму руху в режим у вигляді пристінкового шару під час прискорення обертання, при русі зв'язного зернистого заповнення обертової камери, є більшою за величину такої швидкості при русі незв'язного заповнення. Натомість величина відносної швидкості обертання при зворотному переході режимів руху під час сповільнення обертання, при русі зв'язного зернистого заповнення, є меншою за величину такої швидкості при русі незв'язного заповнення.*

### Порядок виконання роботи

1. Задатись значеннями параметрів для випадку незв'язного зернистого заповнення камери барабана: вид зернистого матеріалу 1; радіус камери  $R_1$ , м; відносний розмір елемента зернистого заповнення камери  $Dr_1$ ; ступінь заповнення камери  $\kappa_1$ .

2. Змонтувати в установці барабан із камерою радіусом  $R_1$ , ступінь заповнення якої незв'язним зернистим матеріалом 1 становить  $k_1$  (рис. 1.13).

3. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно збільшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна зі стану спокою до утворення пристінкового шару та візуалізуючи режим руху незв'язного зернистого заповнення через прозору торцеву стінку камери, частоти обертання барабана при переході режимів руху (рис. 3.2): режиму без підкидання 1 у режим з частковим підкиданням 2 –  $n_{12_1}$ , режиму з частковим підкиданням 2 у режим з повним підкиданням 3 –  $n_{23_1}$ , режиму з повним підкиданням 3 у режим неповного центрифугування 4 –  $n_{34_1}$ , режиму неповного центрифугування 4 у режим пристінкового шару 5 –  $n_{45_1}$ , об./хв.

4. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно зменшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна від режиму руху заповнення у вигляді пристінкового шару та візуалізуючи режим руху незв'язного зернистого матеріалу через прозору торцеву стінку камери, частоту обертання барабана при переході режиму руху (рис. 3.2) пристінкового шару 5 у режим неповного центрифугування 4 –  $n_{54_1}$ , об./хв.

5. Досягти мінімального значення кута нахилу поверхні зсувного шару незв'язного зернистого заповнення обертової камери, повільно і плавно збільшуючи або зменшуючи швидкість обертання барабана та підтримуючи рух заповнення у режимах без підкидання або з частковим підкиданням частинок.

6. Виміряти, за допомогою транспортира, мінімальне значення кута нахилу поверхні зсувного шару незв'язного зернистого заповнення до горизонталі, що відповідає мінімальному куту нахилу вільної поверхні зернистого заповнення обертової камери  $\theta_{min_1}$ , град.

7. Результати вимірювань занести у табл. 5.1:

Таблиця 5.1

Параметри заповненого барабана		Значення параметрів заповненого барабана з індексом $i$	
		$i=1$ (незв'язне зернисте заповнення камери)	$i=2$ (зв'язне зернисте заповнення камери)
Вид зернистого матеріалу			
$R_i$	(м)		
$Dr_i$			
$\kappa_i$			
$n_{12_i}$	(об./хв.)		межа переходу відсутня через спотворення режимів руху
$n_{23_i}$	(об./хв.)		межа переходу відсутня через спотворення режимів руху
$n_{34_i}$	(об./хв.)		межа переходу відсутня через спотворення режимів руху
$n_{45_i}$	(об./хв.)		
$n_{54_i}$	(об./хв.)		
$\theta_{min_i}$	(град.)		

8. Задатись значеннями параметрів для випадку зв'язного зернистого заповнення камери барабана: вид зернистого матеріалу 2; радіус камери  $R_2$ , м; відносний розмір елемента зернистого заповнення камери  $Dr_2$ ; ступінь заповнення камери  $\kappa_2$ .

9. Змонтувати в установці барабан із камерою радіусом  $R_2$ , ступінь заповнення якої зв'язним зернистим матеріалом 2 становить  $\kappa_2$  (рис. 1.13).

10. Спостерігати через прозору торцеву стінку режими руху зв'язного зернистого заповнення обертової камери, повільно і плавно збільшуючи за допомогою

автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна зі стану спокою до утворення режиму руху у вигляді пристінкового шару.

11. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно збільшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна зі стану спокою до утворення пристінкового шару та візуалізуючи режим руху зв'язного зернистого заповнення через прозору торцеву стінку камери, частоти обертання барабана при переході циркуляційного режиму руху в режим у вигляді пристінкового шару  $n_{45_2}$ , об./хв.

12. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно зменшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна від режиму руху заповнення у вигляді пристінкового шару та візуалізуючи режим руху зв'язного зернистого матеріалу через прозору торцеву стінку камери, частоту обертання барабана при переході режиму руху у вигляді пристінкового шару в циркуляційний режим  $n_{54_2}$ , об./хв.

13. Досягти мінімального значення кута нахилу поверхні зсувного шару зв'язного зернистого заповнення обертової камери, повільно і плавно збільшуючи або зменшуючи швидкість обертання камери та підтримуючи циркуляційний режим руху заповнення.

14. Виміряти, за допомогою транспортира, мінімальне значення кута нахилу поверхні зсувного шару зв'язного зернистого заповнення до горизонталі, що відповідає мінімальному куту нахилу вільної поверхні заповнення обертової камери  $\theta_{min_2}$ , град.

15. Результати вимірювань занести у табл. 5.1.

16. Сформулювати, на основі отриманих в роботі результатів, висновок щодо прояву ефекту посилення схожості поведінки зв'язного зернистого заповнення обертової камери із течією рідини.

### **Зміст звіту про виконання лабораторної роботи 5**

1. Номер та назва роботи.

2. Мета роботи.

3. Визначення ефекту посилення схожості поведінки зв'язного зернистого заповнення обертової камери із течією рідини зі збільшенням зчеплення за с. 65 (виділено жирним шрифтом).

4. Визначення явищ аутогезії та адгезії зв'язних зернистих матеріалів за с. 65 (виділено жирним шрифтом).

5. Заповнена табл. 5.1 за п. 7.

6. Висновок за п. 16 за с. 67-68 (виділено жирним шрифтом).

## Лабораторна робота 6

### МОМЕНТ ОПОРУ ТЕКУЧОГО ЗАПОВНЕННЯ КАМЕРИ ОБЕРТАННЮ БАРАБАНА

**Мета роботи:** Експериментальним та розрахунковим шляхом визначити величину моменту опору усталеного руху текучого заповнення камери стаціонарному обертанню завантаженого барабана.

#### Основні теоретичні відомості

Значення моменту опору текучого заповнення циліндричної камери, що обертається відносно горизонтальної осі, становить істотний прикладний інтерес при експлуатації та проектуванні машин барабанного типу.

Текуче заповнення обертової камери чинить помітний опір обертанню заповненого барабана при циркуляційному режимі руху заповнення. При русі заповнення камери в режимі у вигляді пристінкового шару, значення моменту опору заповнення обертанню барабана є нехтовно малим.

Величина моменту опору заповнення обертової камери зумовлює необхідне значення потужності приводного двигуна машини барабанного типу. Квазістатична залежність моменту опору від швидкості обертання барабана визначає вимоги до жорсткості механічної характеристики приводного двигуна, при якій буде забезпечена стійкість спільного усталеного обертання машинного агрегату, робочою машиною якого є барабанна. Використовуючи квазістатичні характеристики обертання заповненого барабана та приводного двигуна можна визначити перехідний рух машинного агрегату барабанної машини. Крім того, величина моменту опору текучого заповнення камери при робочій швидкості обертання може характеризувати режим і інтенсивність циркуляційного руху оброблюваного середовища та визначати енергетичну і технологічну ефективність реалізації робочого процесу обладнання барабанного типу.

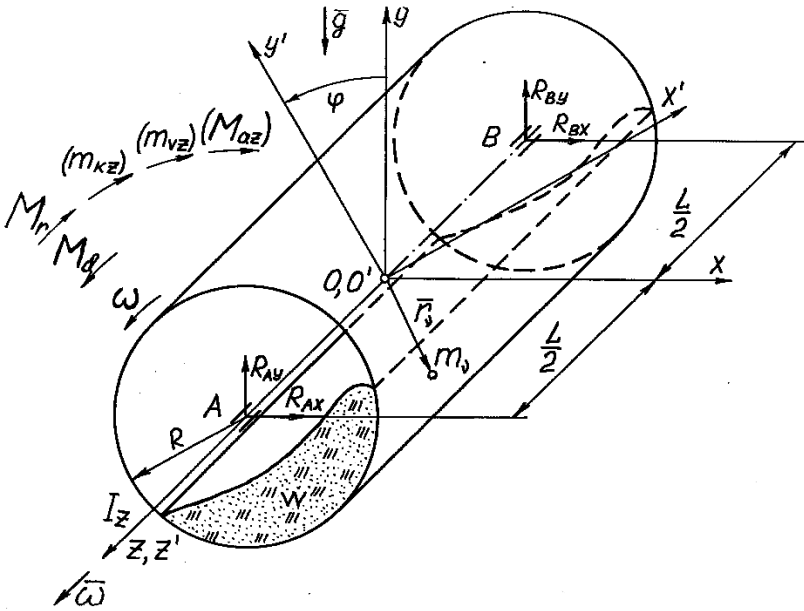


Рис. 6.1. Розрахункова схема заповненої обертової камери:  
 $Z$  – горизонтальна вісь обертання камери,  
 $A$  та  $B$  – опори обертання камери,  $\varphi$  – кут повороту камери,  
 $I_z$  – осьовий момент інерції заповненої камери відносно осі  $Z$

Виникнення моменту опору ілюструється розрахунковою схемою заповненої, середовищем густиною  $\rho$  на об'єм  $w$ , обертової камери, як однієї механічної системи, (рис. 6.1). Обертання камери із кутовою швидкістю  $\omega$  здійснюється навколо горизонтальної осі на опорах  $A$  та  $B$ . Розглядається абсолютна нерухома (інерційна) система координат  $OXYZ$  та відносна рухома жорстко зв'язана з камерою (неінерційна) система координат  $O'X'Y'Z'$ . Осі  $Z$  та  $Z'$  систем координат суміщено з віссю обертання. Центри  $O$  та  $O'$  суміщено та розміщено на однаковій відстані  $L/2$  від торцевих стінок. Вісь  $X$  направлено горизонтально, вісь  $Y$  – вертикально.

Заповнену камеру приводить в обертання головний приводний крутячий момент  $M_d$ , який долає головний момент опору заповнення обертання камери  $M_r$  та момент опору в

опорах  $M_{AB}$

$$M_d = M_r + M_{AB}.$$

Вираз для моменту опору заповнення  $M_r$  має вигляд

$$M_r = M_i + m_z + M_{az},$$

де  $M_i = I_z \frac{d\omega}{dt}$  – головний інерційний момент заповненої

камери відносно осі  $Z$ ,

$m_z = m_{kz} + m_{vz}$  – головний момент реактивних сил  
заповнення відносно осі  $Z$ ,

$m_{kz} = 2\rho\omega \int (r_{vx} + r_{vy}) dw$  – головний момент реактивних  
коріолісових сил,

$m_{vz} = \rho \int \left( r_{vx} \frac{du_y}{dt} - r_{vy} \frac{du_x}{dt} \right) dw$  – головний момент

реактивних варіаційних  
сил,

$M_{az} = \rho g \int r_{vx} dw$  – головний момент активних масових сил  
заповнення відносно осі  $Z$ ,

$u_x$  та  $u_y$  – проєкції відносної швидкості заповнення,

$r_{vx}$  та  $r_{vy}$  – проєкції радіальної координати.

Значення моменту опору заповнення камери обертанню барабана зручно оцінювати у відносних величинах при використанні **відносного моменту опору  $\psi_M$**

$$\psi_M = \frac{M}{M_{max}}, \quad (6.1)$$

де  $M$  – дійсний момент опору;  $M_{max}$  – умовний максимальний момент опору, який відповідає розподілу заповнення в поперечному перерізі камери у вигляді ідеального твердотілого сегмента, що повернуто разом із барабаном відносно початкового положення у стані спокою на прямий кут  $\theta$  (рис. 6.2).



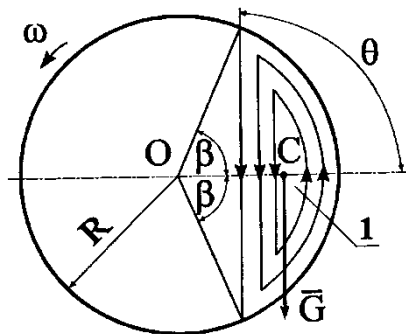


Рис. 6.2. Схема виникнення умовного максимального моменту опору текучого заповнення обертанню камери  $M_{max}$ :  
1 – ідеальний сегмент заповнення у поперечному перерізі камери

**Величина умовного максимального моменту опору  $M_{max}$  дорівнює добутку модуля сили тяжіння матеріалу  $G$  на відстань  $OC$  від осі обертання  $O$  до центра тяжіння сегмента  $C$**

$$M_{max} = \frac{2}{3} R^3 (\sin^3 \beta) L \rho g, \quad (6.2)$$

де  $\rho$  – об’ємна густина матеріалу,  $\beta$  – половина центрального кута ідеального сегмента у поперечному перерізі обертаної камери.

Величина кута  $\beta$  визначається наближено із трансцендентного рівняння

$$2\beta - \sin(2\beta) = 2\pi k. \quad (6.3)$$

Умовний максимальний момент опору  $M_{max}$  визначається уявним розподілом заповнення в камері, що відповідає виникненню теоретично максимально можливого значення моменту опору. Таке уявне розміщення заповнення в камері практично не може бути реалізовано. Проте умовно максимально можливе значення моменту опору  $M_{max}$  для певного ступеня заповнення камери  $k$ , може бути застосовано як базу відліку для оцінки дійсного моменту опору  $M$  у відносних одиницях, що дозволяє відволікатись від розмірів камери ( $R$  і  $L$ ) та густини заповнення  $\rho$ . Зазначене обумовлює використання відносного моменту опору  $\psi_M$ , значення якого змінюється у

діапазоні  $0 \dots 1$ , як додаткового критерію подібності динамічних процесів обертання заповненого барабана.

Як критерій ефективності робочих процесів барабанних машин, зумовлений режимом руху заповнення камери, зручно використовувати різновид відносного моменту опору  $\psi_{M0,5}$ , величина якого дорівнює відношенню дійсного моменту опору заповнення обертання барабана  $M$  до умовного максимального моменту при половинному заповненні камери  $M_{\max0,5}$

$$\psi_{M0,5} = \frac{M}{M_{\max0,5}}.$$

Величина умовного максимального моменту опору  $M_{\max}$  набуває максимального значення при половинному заповненні камери  $\kappa=0,5$ . Тому застосування різновиду відносного моменту опору при половинному заповненні камери  $\psi_{M0,5}$ , як динамічного критерію подібності, дозволяє абстрагуватись не тільки від  $R$ ,  $L$  та  $\rho$ , але також і від ступеня заповнення камери  $\kappa$ .

Із відносним моментом опору  $\psi_{M0,5}$  пов'язана відносна потужність опору  $\psi_{N0,5}$ , що визначає відношення дійсної потужності опору завантаження обертання барабана  $N=M\omega$ , для дійсного моменту опору  $M$  та кутової швидкості обертання  $\omega$ , до умовної максимальної потужності при половинному заповненні камери  $N_{\max0,5} = M_{\max0,5} \sqrt{g/R}$ , для умовного максимального моменту при половинному заповненні камери  $M_{\max0,5}$  та критичної кутової швидкості обертання  $\omega_{кр} = \sqrt{g/R}$

$$\psi_{N0,5} = \frac{M\omega}{M_{\max0,5} \sqrt{\frac{g}{R}}}.$$

Відносна потужність опору при половинному заповненні камери  $\psi_{N0,5}$ , значення якої також змінюється у діапазоні  $0 \dots 1$ , може бути застосована як додатковий критерій подібності енергетичних процесів обертання заповненого барабана.

На рис. 6.3 зображено типові залежності відносного моменту опору незв'язного зернистого заповнення обертання

барабана при половинному заповненні камери  $\psi_{M0,5}$ , а на рис. 6.4 – залежності відносної потужності опору такого заповнення  $\psi_{N0,5}$  від відносної швидкості обертання  $\psi_{\omega}$  при  $Dr=0,01$ ,  $R=0,106$  м та  $\kappa=0,25-045$ .

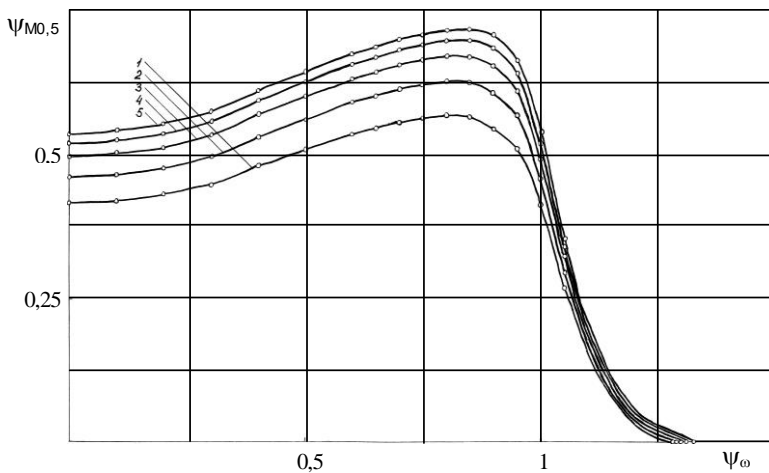


Рис. 6.3. Залежності відносного моменту опору обертанню при половинному заповненні камери незв'язним зернистим матеріалом  $\psi_{M0,5}$  від  $\psi_{\omega}$  при  $Dr=0,01$  та  $R=0,106$  м:  $\kappa=0,25$  (1);  $\kappa=0,3$  (2);  $\kappa=0,35$  (3);  $\kappa=0,4$  (4);  $\kappa=0,45$  (5)

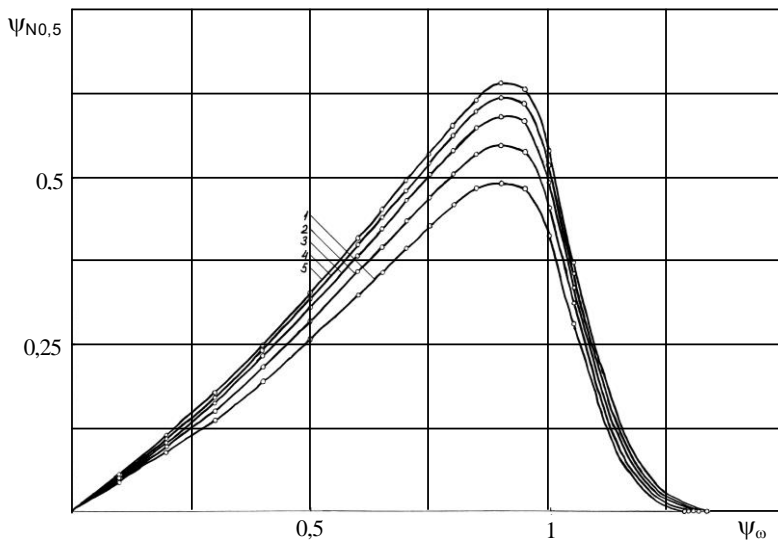


Рис. 6.4. Залежності відносної потужності опору обертанню при половинному заповненні камери незв'язним зернистим матеріалом  $\Psi_{N0,5}$  від  $\Psi_{\omega}$  при  $Dr=0,01$  та  $R=0,106$  м:  
 $\kappa=0,25$  (1);  $\kappa=0,3$  (2);  $\kappa=0,35$  (3);  $\kappa=0,4$  (4);  $\kappa=0,45$

На рис. 6.5 наведено, для порівняння, графічні залежності відносного моменту опору обертанню при половинному заповненні  $\Psi_{M0,5}$  ( $\kappa=0,5$ ) камери радіусом  $R=0,106$  м, із малов'язкою рідиною  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (індекс 1), сильнов'язкою рідиною  $\nu=10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с (індекс 2) та незв'язним зернистим матеріалом  $Dr=0,01$  (індекс 3), від швидкості обертання барабана  $\omega$ . Точки  $B_1$  та  $B_2$  на графіках відповідають переходу циркуляційного режиму руху рідини в режим пристінкового шару при прискоренні обертання барабана;  $C_1D_1$  та  $C_2D_2$  – зворотному переходу режимів при сповільненні обертання;  $A_3E_3$  – режиму руху зернистого матеріалу без підкидання частинок;  $E_3F_3$  – режиму з частковим підкиданням;  $F_3G_3$  – режиму з повним підкиданням;  $G_3B_3$  – режиму неповного центрифугування;  $B_3$  – перехід циркуляційного режиму в режим пристінкового шару та назад.

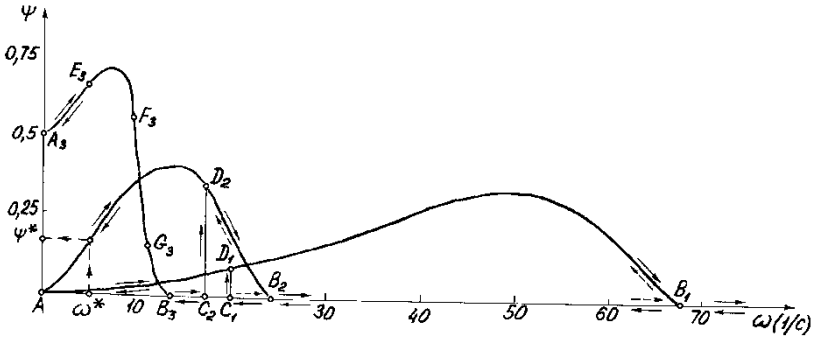


Рис. 6.5. Залежності відносного моменту опору обертанню барабана від швидкості  $\psi_m(\omega)$  із камерою радіусом  $R=0,106$  м при половинному заповненні ( $\kappa=0,5$ ) водою (індекс 1), касторовим маслом (2) та незв'язним зернистим матеріалом (3)

На рис. 6.6 показано універсальні трипараметричні залежності відносного моменту опору  $\psi_m$  в логарифмічних осях  $Re$  та  $Fr$  для рідкого матеріалу при різних значеннях  $\kappa$ . На рис. 6.7 – аналогічні залежності для незв'язного зернистого матеріалу.

Аналіз рис. 6.5-6.7 демонструє близьку подібність руху зернистого матеріалу та рідини з високою в'язкістю. Відмінною особливістю течії рідини є прилипання до твердої стінки та злипання шарів що спричиняє виникнення режимного гістерезису. Особливістю незв'язного зернистого матеріалу є твердотільний рух поблизу твердої стінки та укосоутворення при осипанні, причому при низькій швидкості обертання  $\omega$  момент  $\psi_m \rightarrow 0,5$ , що відповідає куту нахилу вільної поверхні  $\theta \approx 30 \dots 35^\circ$ . Момент  $\psi_m$  приймає помітне значення при циркуляційному режимі руху текучого матеріалу і практично відсутній при режимі пристінкового шару, а його значення залежить від характеру руху. Для рідини найбільше значення  $\psi_m$  зі зростанням  $\omega$  виникає при збільшенні  $\theta$ , а інтенсивне зниження – внаслідок зростання відокремлення з падінням за рахунок зони циркуляції. Для зернистого матеріалу в режимі без підкидання зі збільшенням  $\omega$  момент  $\psi_m$  плавно зростає від початкового значення 0,5, з частковим підкиданням – приймає максимальне значення, з повним підкиданням – інтенсивно знижується, а при

неповному центрифугуванні – плавно знижується до нуля.

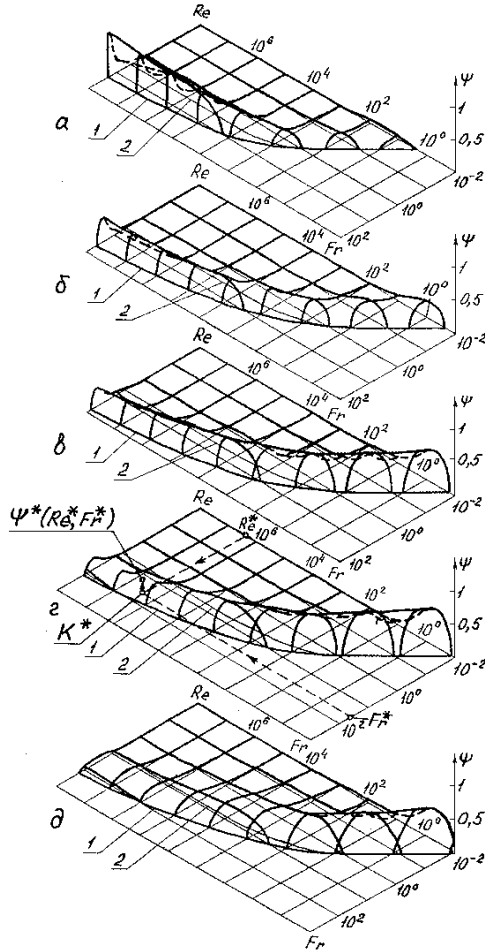


Рис. 6.6. Універсальні трипараметричні залежності відносного моменту опору  $\psi_M$  обертання барабана з рідким заповненням:

- 1 – межа переходу циркуляційного режиму руху в режим пристінкового шару при прискоренні обертання;
  - 2 – межа зворотного переходу режимів при сповільненні обертання:
- $\kappa=0,1$  (а),  $\kappa=0,3$  (б),  $\kappa=0,5$  (в),  $\kappa=0,7$  (г),  $\kappa=0,9$  (д)

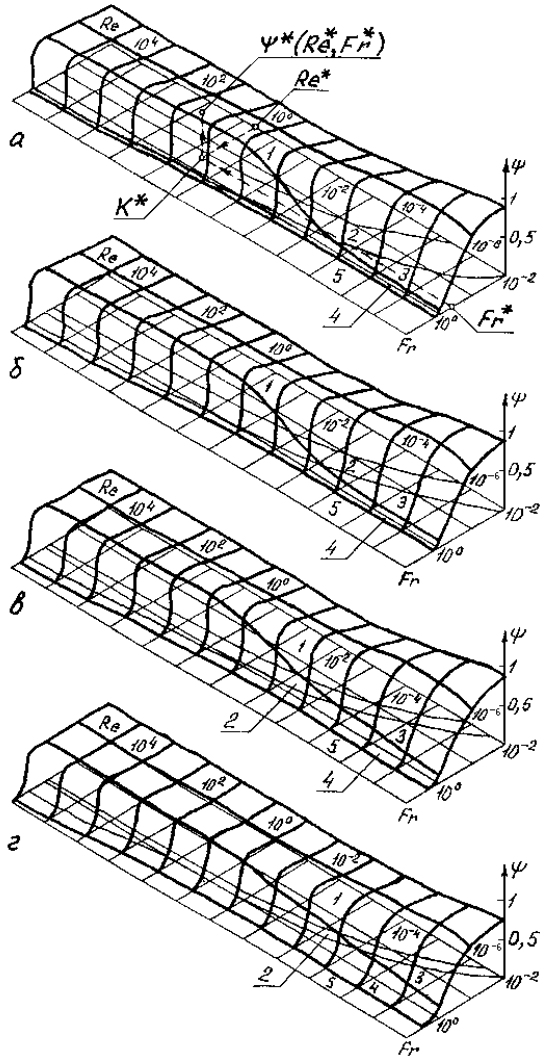


Рис. 6.7. Універсальні трипараметричні залежності відносного моменту опору  $\psi_M$  обертання барабана з незв'язним зернистим заповненням: 1 – режим руху без підкидання частинок; 2 – з частковим підкиданням; 3 – з повним підкиданням; 4 – неповного центрифугування; 5 – режим пристінкового шару:  $\kappa=0,3$  (а),  $\kappa=0,5$  (б),  $\kappa=0,7$  (в),  $\kappa=0,9$  (г)

Розрахувати момент опору текучого заповнення камери обертання барабана  $M$  за допомогою графічних універсальних залежностей (рис. 6.6 та 6.7) можна у такий спосіб. За заданими  $\omega$ ,  $R$ ,  $\nu$  та  $\kappa$  обчислюються значення чисел Рейнольдса  $Re^* = (\omega R^2) / \nu$  та Фруда  $Fr^* = (\omega^2 R) / g$ . На площині  $Re-Fr$  будується допоміжна точка  $K^*$  із координатами  $Re^*$  та  $Fr^*$  (рис. 6.6г та 6.7а). З точки  $K^*$  відновлюється вертикаль до площини  $Re-Fr$  до перетину з поверхнею залежності в точці  $\psi_m^*(Re^*, Fr^*)$ . Значення  $\psi_m$  для заданого  $\kappa$  знаходиться інтерполяванням за допомогою найближчих графіків. З (6.3) знаходиться  $\beta$ , а з (6.2) –  $M_{max}$ . Шукане значення моменту  $M$  визначається з (6.1) –  $M = \psi_m \cdot M_{max}$ .

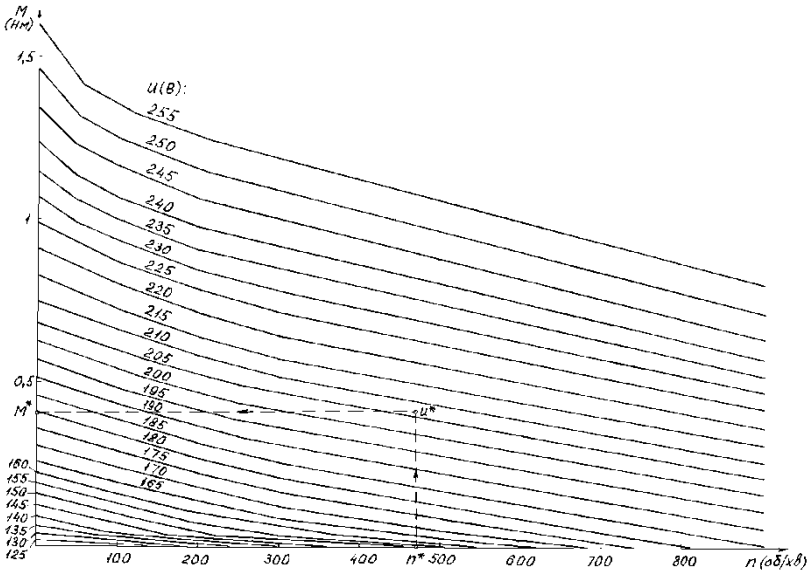


Рис 6.8. Тарирувальні графіки  $M(U, n)$  приводу обертання заповненого барабана із колекторним електродвигуном лабораторної установки, як електромеханічного датчика крутячого моменту



### Порядок виконання роботи

1. Задатись значеннями параметрів системи із половинним заповненням камери незв'язним зернистим матеріалом: вид незв'язного зернистого матеріалу; насипна густина матеріалу  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>; радіус камери барабана  $R$ , м; довжина камери  $L$ , м; ступінь заповнення камери порцією матеріалу  $\kappa=0,5$ .

2. Змонтувати в установці барабан із камерою радіусом  $R$ , ступінь заповнення якої зернистим матеріалом становить  $\kappa=0,5$  (рис. 1.13).

3. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно збільшуючи або зменшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна та візуалізуючи режим руху зернистого матеріалу через прозору торцеву стінку камери, значення частоти обертання барабана при переході режиму руху неповного центрифугування матеріалу в режим пристінкового шару  $n_{ни}$ , об./хв.

4. Визначити величини проміжних значень частот обертання барабана об./хв.:

$$n_1 = \frac{1}{6} \cdot n_{ни},$$

$$n_2 = \frac{1}{3} \cdot n_{ни},$$

$$n_3 = \frac{1}{2} \cdot n_{ни},$$

$$n_4 = \frac{2}{3} \cdot n_{ни},$$

$$n_5 = \frac{5}{6} \cdot n_{ни}.$$

5. Виміряти за допомогою вольтметра, повільно і плавно збільшуючи або зменшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна для досягнення частот обертання  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  та  $n_4$ , відповідні значення напруги живлення двигуна  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$  та  $U_5$ , В.

6. Визначити за допомогою копії тарирувальних графіків  $M(n,U)$  (рис. 6.8) приводу обертання барабана із колекторним

електродвигуном, як електромеханічного датчика крутячого моменту, для величин частот обертання  $n_1, n_2, n_3, n_4$  та  $n_5$  і напруги  $U_1, U_2, U_3, U_4$  та  $U_5$ , відповідні дослідні значення моментів опору незв'язного зернистого половинного заповнення камери обертання барабана  $M_{01}(n_1, U_1), M_{02}(n_2, U_2), M_{03}(n_3, U_3), M_{04}(n_4, U_4)$  та  $M_{05}(n_5, U_5)$ , Нм.

7. Визначити відповідні значення кутових швидкостей обертання барабана для частот обертання  $n_1, n_2, n_3, n_4$  та  $n_5$ , 1/с:

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot n_i}{30},$$

де  $i=1, 2, 3, 4$  та  $5$  – індекс.

8. Визначити за допомогою копії графіків залежності  $\psi_M(\omega)$  (рис. 6.5) для величин кутових швидкостей обертання барабана  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  та  $\omega_5$ , відповідні теоретичні значення відносних моментів опору незв'язного зернистого половинного заповнення камери обертання барабана  $\psi_{M1}(\omega_1), \psi_{M2}(\omega_2), \psi_{M3}(\omega_3), \psi_{M4}(\omega_4)$  та  $\psi_{M5}(\omega_5)$ .

9. Обчислити значення умовного максимального моменту опору обертання заповненого барабана, Нм:

$$M_{max} = \frac{2}{3} R^3 (\sin^3 \beta) \cdot L \cdot \rho \cdot g,$$

де  $\beta=90^\circ$  – половина центрального кута ідеального сегмента половинного заповнення у поперечному її перерізі камери,  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup> – гравітаційне прискорення.

10. Визначити для величин відносних моментів опору  $\psi_{M1}, \psi_{M2}, \psi_{M3}, \psi_{M4}$  та  $\psi_{M5}$  відповідні теоретичні значення моментів опору незв'язного зернистого половинного заповнення камери обертання барабана  $M_{m1}, M_{m2}, M_{m3}, M_{m4}$  та  $M_{m5}$ , Нм:

$$M_{m1} = \psi_{M1} \cdot M_{max},$$

де  $i=1, 2, 3, 4$  та  $5$  – індекс.

11. Визначити розбіжність отриманих дослідних та теоретичних значень моментів опору незв'язного зернистого половинного заповнення камери обертання барабана  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  та  $\varepsilon_5$ , %:

$$\varepsilon_i = \frac{|M_{\partial i} - M_{mi}|}{M_{mi}} \cdot 100\%,$$

де  $i=1, 2, 3, 4$  або  $5$  – індекс.

12. Результати вимірювань та обчислень звести у табл. 6.1:

Таблиця 6.1

Параметри		Значення параметрів для частот обертання барабана з індексами $i$				
		$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$
$n_{mi}$	(об./хв.)		те саме	те саме	те саме	те саме
$n_i$						
$U_i$	(В)					
$M_{\partial i}$	(Нм)					
$\omega_i$	(1/с)					
$\psi_{Mi}$	-					
$M_{max}$	(Нм)		те саме	те саме	те саме	те саме
$M_{mi}$	(Нм)					
$\varepsilon_i$	(%)					
Вид незв'язного зернистого матеріалу – ...; $\rho = \dots$ кг/м <sup>3</sup> ; $R = \dots$ м; $l = \dots$ м; $\kappa = 0,5$ .						

### Зміст звіту про виконання лабораторної роботи 6

1. Номер та назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Копія рис. 6.1 із позначеннями.
4. Визначення відносного моменту опору  $\psi_M$  та умовного максимального моменту опору  $M_{max}$  за с. 77 (виділено жирним шрифтом).
5. Копія рис. 6.6 та 6.8 із виконаними побудовами.
6. Заповнена табл. 6.1 за п. 12.

## Лабораторна робота 7

### СТІЙКІСТЬ ОБЕРТАННЯ БАРАБАНА ІЗ ТЕКУЧИМ ЗАПОВНЕННЯМ КАМЕРИ

**Мета роботи:** Експериментальним шляхом визначити межі біфуркаційного швидкісного діапазону нестійкого обертання циліндричної камери навколо горизонтальної осі із максимальною амплітудою автоколивань незв'язного зернистого заповнення.

#### Основні теоретичні відомості

Стаціонарне обертання камери із текучим заповненням, що здійснює усталений рух, за певних умов стає нестійким.

*Стійкістю системи є здатність її повертатись до початкового стану після припинення дії, що вивела її з цього стану. Стійкістю руху механічної системи (траєкторій, ліній течії, переміщень, положень вільної поверхні, швидкостей та прискорень), що рухається під дією прикладених сил, є здатність її майже не відхилитись від цього руху при яких-небудь незначних випадкових діях (легких поштовхах та інш.). Рух, що не має такої здатності, є нестійким умови, за яких має місце стійкість руху, називаються чинниками стійкості.*

Нестійке обертання заповненої камери пов'язано із самозбудженням її автоколивань.

*Автоколиваннями є незагасаючі коливання у нелінійній (властивості якої не залежать лінійно від її параметрів і змінюються у залежності від процесів, що в ній відбуваються) дисипативній (в якій відбувається розсіювання механічної енергії внаслідок дії різних сил опору, наприклад тертя, що переходить в інші форми енергії, наприклад у теплоту) динамічній системі, що підтримуються за рахунок енергії постійної, тобто неперіодичної дії, зовнішнього джерела. Параметри автоколивань (амплітуда, частота та спектр коливань) визначаються властивостями самої системи і не залежать від кінцевої зміни початкових умов. Автоколивання принципово відрізняються від інших коливальних процесів у тому, що для їх*

підтримування не потрібно коливальних дій зовні. Зокрема, автоколивання відрізняють від вимушених коливань тим, що останні викликані періодичною зовнішньою дією і відбуваються із частотою цієї дії, у той час як виникнення автоколивань та їх частота визначаються внутрішніми властивостями самої автоколивальної системи.

Явище виникнення нестійких режимів роботи машин барабанного типу було зареєстровано при експлуатації барабаних млинів. Було встановлено, що в камері обертового барабана виникають автоколивання завантаження, які проявляються у вигляді утворення змінної складової сигналу активної потужності приводного двигуна (рис. 7.1).

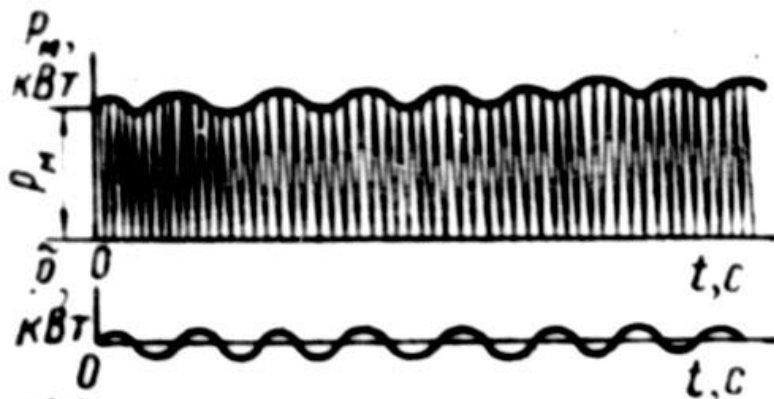


Рис. 7.1. Схема сигналу активної потужності, що споживається приводним двигуном барабанного млина та змінної складової цього сигналу

*Ефект нестійкості обертання заповненої камери* виникає переважно у випадку незв'язного зернистого заповнення і проявляється у двох формах.

Перший прояв її автоколивань є *біфуркацією* (якісною зміною поведінки динамічної системи при нескінченно малій зміні її параметрів, що пов'язана із роздвоєнням поведінки) усталеного руху системи із виникнення *періодичного атратора* (стану динамічної системи, до якого вона прагне потрапити із

будь-якого свого стану, і до якого вона притягується або залучається).

Другий прояв автоколивань є біфуркацією зсувного зернистого потоку заповнення із виникненням *дивного атрактора* (стану динамічної системи, до якого вона прагне потрапити, із довільною, що не піддається раціональному опису, поведінкою) внаслідок хаотизації руху.

Перший прояв явища нестійкості полягає у неможливості вільного обертання камери із заданою швидкістю без примусової її стабілізації. Це спричинює самовільний відхід величини швидкості від початкового значення переважно у бік збільшення.

Другий прояв ефекту виникає за умови примусової стабілізації кутової швидкості, наприклад шляхом автоматичного керування приводом обертання камери. Він полягає у самозбудженні коливань заповнення у поперечному перерізі камери у вигляді пульсацій, що ускладнюють стаціонування швидкості обертання. Під час таких пульсацій значна частина заповнення у верхній половині камери відокремлюється від поверхні і здійснює падіння із взаємодією елементів між собою. У випадку зернистого заповнення камери це спричинює істотне зменшення тверdotільної зони та значну інтенсифікацію циркуляції заповнення.

На рис. 7.2-7.9 зображено послідовні картини руху незв'язного зернистого заповнення при  $Dr=0,01$  обертової камери для одного періоду автоколивань із максимальною амплітудою та, відповідно, восьми ступенів заповнення камери  $\kappa=0,15, 0,2, 0,25, 0,3, 0,35, 0,4, 0,45$  та  $0,5$ .

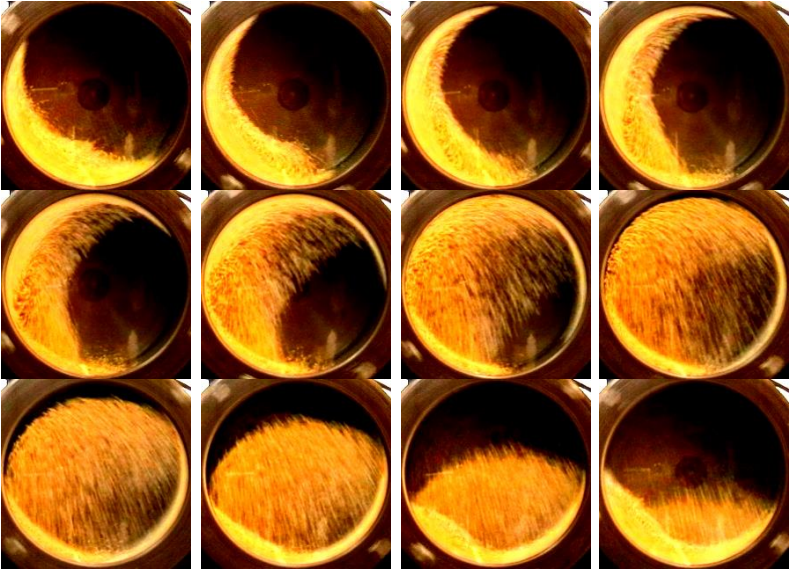


Рис. 7.2. Послідовні картини руху зернистого заповнення для одного періоду коливань із максимальною амплітудою при  $\kappa=0,15$

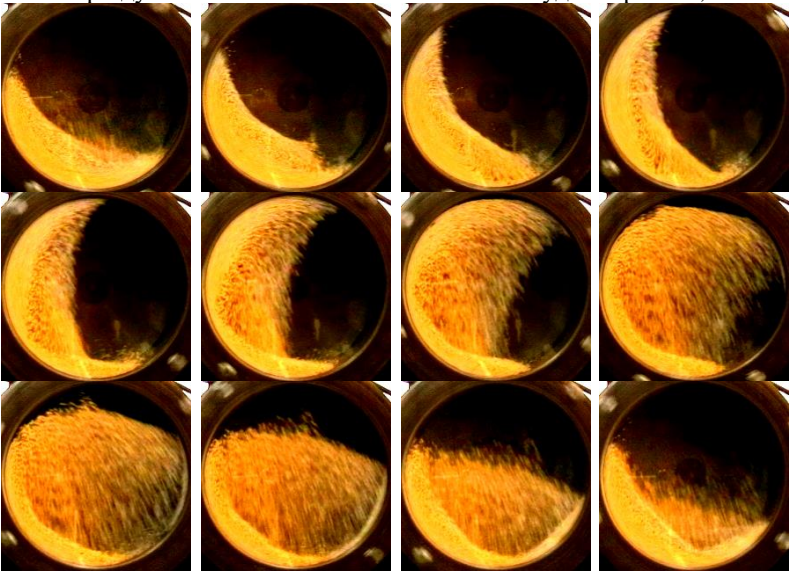


Рис. 7.3. Послідовні картини руху зернистого заповнення для одного періоду коливань із максимальною амплітудою при  $\kappa=0,2$

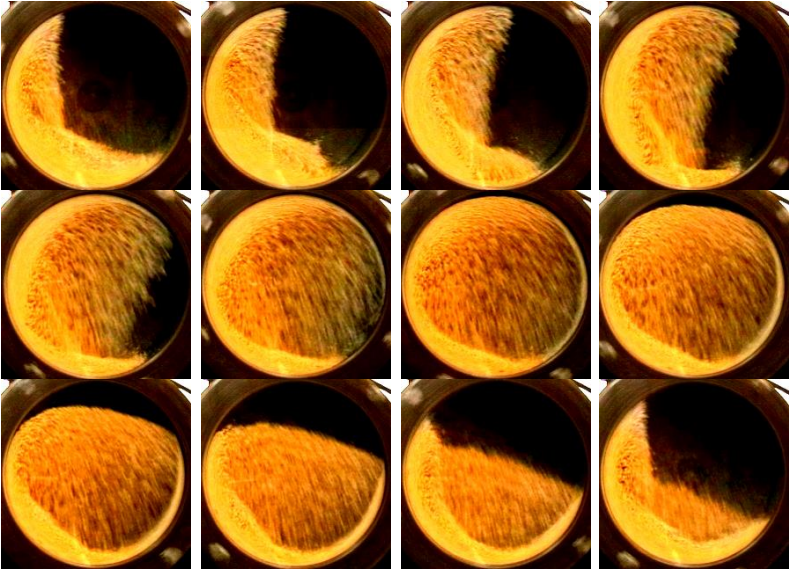


Рис. 7.4. Послідовні картини руху зернистого заповнення для одного періоду коливань із максимальною амплітудою при  $\kappa=0,25$

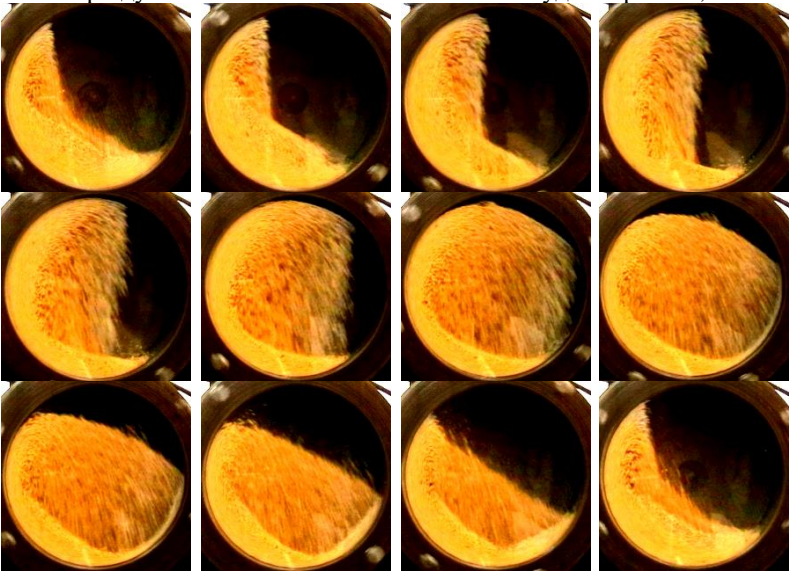


Рис. 7.5. Послідовні картини руху зернистого заповнення для одного періоду коливань із максимальною амплітудою при  $\kappa=0,3$



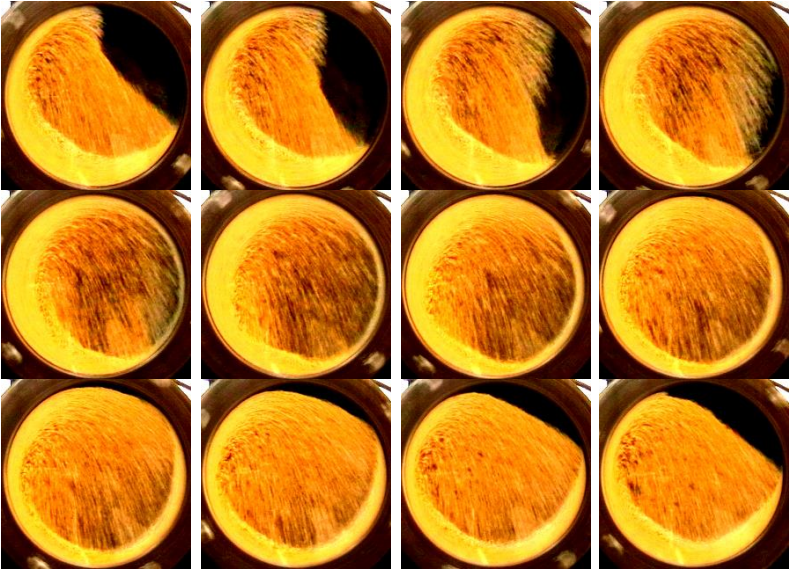


Рис. 7.6. Послідовні картини руху зернистого заповнення для одного періоду коливань із максимальною амплітудою при  $\kappa=0,35$



Рис. 7.7. Послідовні картини руху зернистого заповнення для одного періоду коливань із максимальною амплітудою при  $\kappa=0,4$

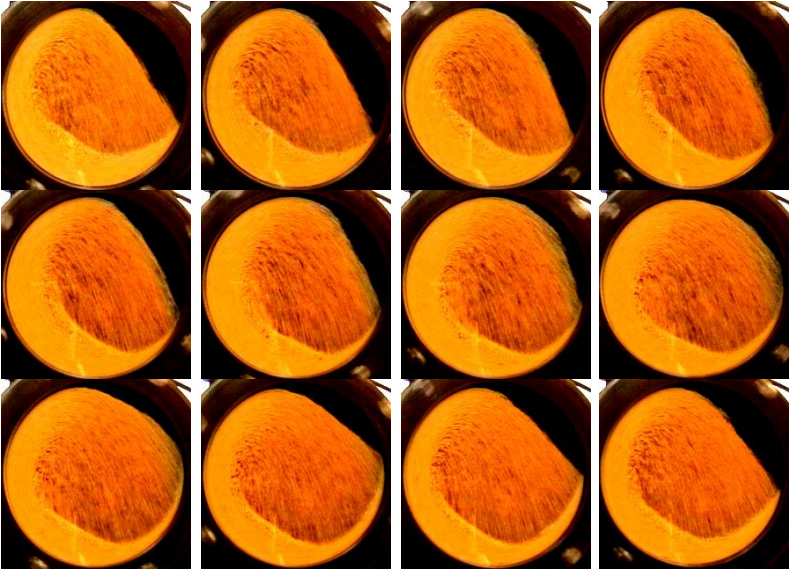


Рис. 7.8. Послідовні картини руху зернистого заповнення для одного періоду коливань із максимальною амплітудою при  $\kappa=0,45$

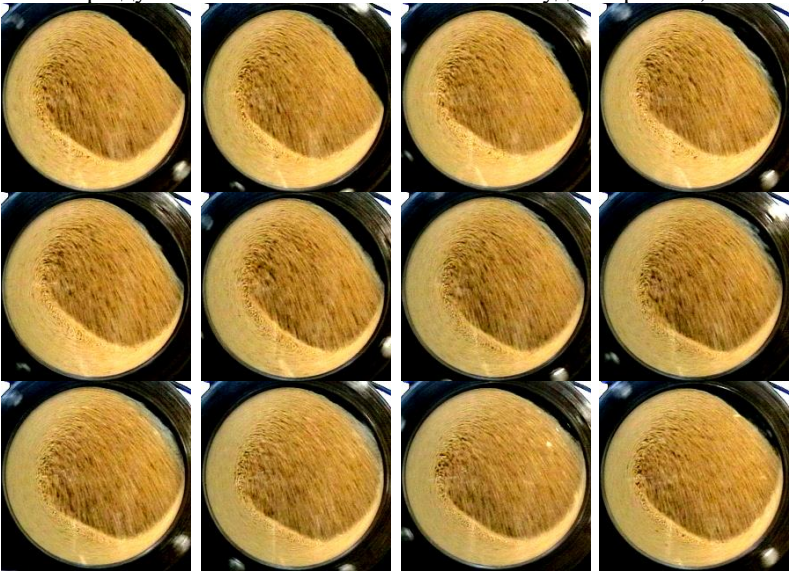


Рис. 7.9. Послідовні картини руху зернистого заповнення для одного періоду коливань із максимальною амплітудою при  $\kappa=0,5$

Рівняння руху машинного агрегату барабанної машини у формі моментів для вала двигуна, прийнятого як ланки зведення має вигляд

$$\left\{ \frac{\omega^2}{2} \frac{d^2 I_3(\omega)}{d\omega^2} + 2\omega \frac{dI_3(\omega)}{d\omega} + I_3(\omega) + I_{\delta} \right\} \frac{1}{i^2} + I_{\delta} \left\} \frac{d\omega}{dt} = \right. \\ \left. = M_{\delta}(\omega) - \frac{M_3(\omega) + M_{\delta}}{i\eta}, \right. \quad (7.1)$$

де  $I_3$  – осьовий момент інерції заповнення камери,  $I_{\delta}$  – осьовий момент інерції барабана,  $I_{\delta}$  – осьовий момент інерції обертових частин двигуна,  $M_{\delta}$  – крутячий момент приводного двигуна,  $M_3 = M_a + m$  – крутячий момент опору заповнення камери обертанню барабана,  $M_a$  – момент активних сил,  $m = m_k + m_v$  – момент реактивних сил,  $m_k$  – момент коріолісових реактивних сил,  $m_v$  – момент варіаційних реактивних сил,  $M_{\delta}$  – крутячий момент опору в опорах барабана,  $\omega$  – кутова швидкість обертання барабана,  $t$  – час,  $i$  – передаточне відношення приводу обертання барабана,  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії приводу барабана.

На підставі прямого методу Ляпунова та застосування рівняння незбуреного руху (7.1), умова асимптотичної стійкості усталеного руху машинного агрегату машини барабанного типу набуває вигляду

$$\frac{dM_3(\omega)}{d\omega} \frac{1}{i\eta} - \frac{dM_{\delta}(\omega)}{d\omega} > 0. \quad (7.2)$$

$$\left[ \frac{\omega^2}{2} \frac{d^2 I_3(\omega)}{d\omega^2} + 2\omega \frac{dI_3(\omega)}{d\omega} + I_3(\omega) + I_{\delta} \right] \frac{1}{i^2} + I_{\delta}$$

Умова (7.2) відрізняється від аналогічної умови стійкості при  $I_3 = \text{const}$  виразом у знаменнику.

Незв'язне зернисте заповнення обертової камери здійснює трифазний режим руху (рис. 7.8).

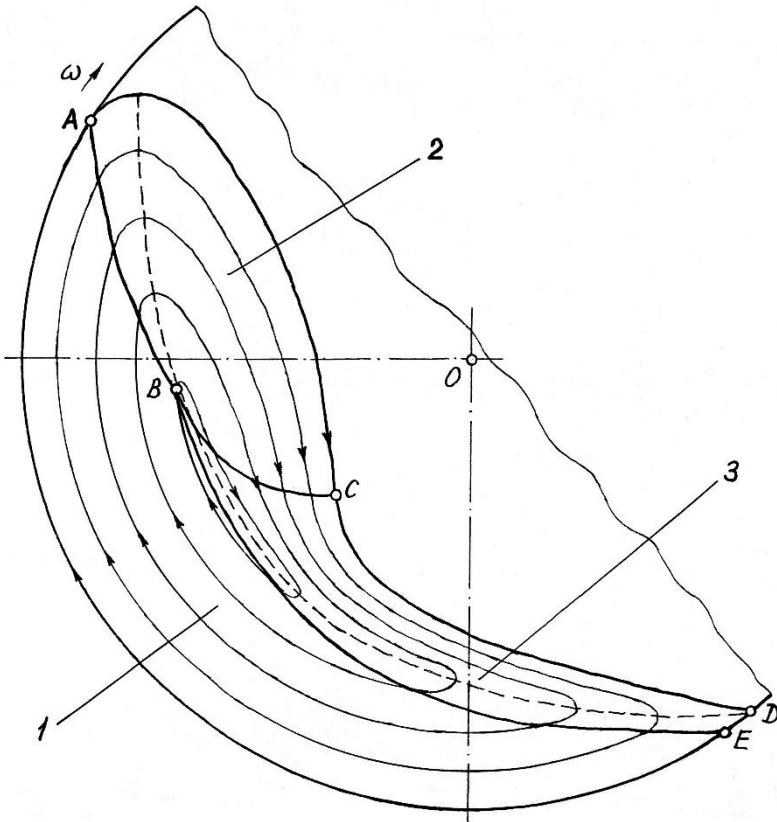


Рис. 7.8. Схема картини руху незв'язного зернистого заповнення обертової камери: 1 – зона твердотільного руху, 2 – зона невірного падіння, 3 – зона зсувної шару

У зоні невірного падіння 2 заповнення, перебуває у стані розрідженої зсувної течії. Цей режим реалізується при невеликій густині зернистого середовища та великому зсуванні швидкостей. За таких умов між частинками заповнення завжди виникають деякі зазори. Взаємодія частинок здійснюється внаслідок їх безперервного зштовхування, а ковзання грає несуттєву роль. У моменти співударянь частинки різко змінюють напрям руху, описуючи зигзагоподібні траєкторії.

Нестійкість руху зернистого заповнення зумовлена дією малих хвильових збурень на розріджений зсувний потік жорстких частинок із середнім діаметром  $a$ , середньою (макроскопічною) швидкістю поступального руху  $u$  та середньою (тепловою) швидкістю хаотичного руху упоперек площини зсування  $v_m$ , що мають довжину вільного пробігу  $s$  (рис. 7.9).

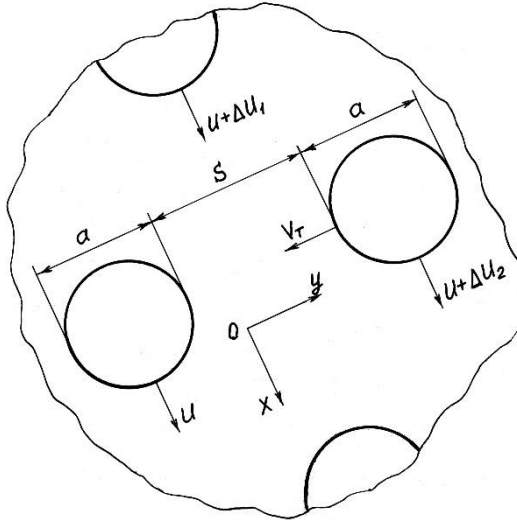


Рис. 7.9. Схема розрідженого зсувного потоку зернистого заповнення

Дисперсійне рівняння розрідженого зсувного потоку зернистого заповнення має вигляд

$$\beta^3 + (a_1 k^2 - b_1) \beta^2 + k^2 (c_1 k^2 - d_1) \beta - k^2 (e_1 k^2 + f_1) = 0, \quad (7.3)$$

де  $\beta = -iv$ ;  $v$  – збурення швидкості упоперек площини зсування;  $k$  – хвильове число;  $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1$  та  $f_1$  – коефіцієнти, що визначаються характеристиками зернистого середовища.

Біфуркаційні криві (рис. 7.10), побудовані на основі дисперсійного рівняння (7.3), розділяють області стійкості та нестійкості зсувного потоку заповнення.

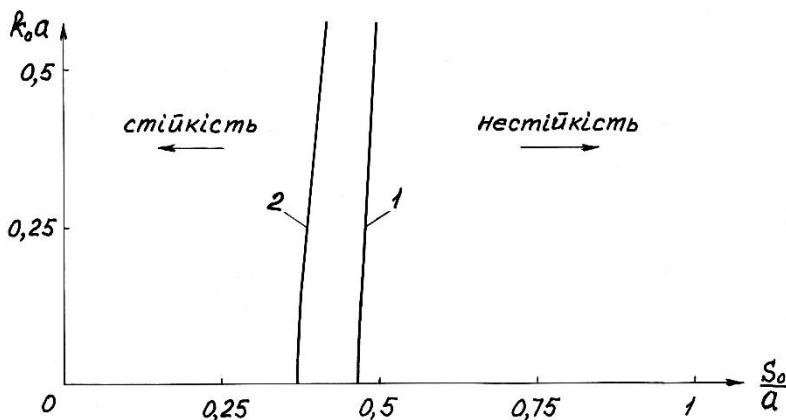


Рис. 7.10. Схема областей стійкого та нестійкого режимів руху незв'язного зернистого заповнення обертової камери:

- 1 – нейтральна біфуркаційна крива для абсолютно жорстких частинок заповнення ( $t_c=0$ ),  
 2 – нейтральна біфуркаційна крива для деформівних частинок ( $t_c=t_f$ )

Області значень на рис. 7.10 задаються в осях відносної середньої довжини вільного пробігу частинок (дилатансії заповнення)  $s_0/a$  та відносного хвильового числа  $k_0 a$ , де:  $s_0$  – середня довжина вільного пробігу,  $k_0$  – середнє хвильове число. Нейтральні біфуркаційні криві розділяють розглядуване поле на стійкі області ліворуч від кривих, для малої дилатансії зернистого заповнення, та нестійкі області праворуч, для великої дилатансії.

Нейтральна крива 1 (рис. 7.10) відповідає випадку зштовхування абсолютно жорстких частинок заповнення із тривалістю контакту  $t_c=0$ , а крива 2 – випадку взаємодії частинок, що деформуються, із тривалістю контакту  $t_f>0$ . Порівняно із випадком жорстких частинок заповнення, нейтральну біфуркаційну криву 2 для випадку деформівних частинок зсунуто у бік менших довжин вільного пробігу та більшої дилатансії. Зростання часу контакту  $t_c$  може спричинити демпфуюча дія частинок малих м'яких частинок на зштовхування великих твердих, наприклад у випадку впливу подрібнюваного матеріалу на співударяння молоткових тіл завантаження барабанного млина.

Встановлені експериментально біфуркаційні значення швидкості обертання камери у логарифмічних осях  $Re-Fr$ , що відповідають самозбудженню автоколивань незв'язного зернистого заповнення при  $Dr=0,01$  із максимальною амплітудою для ступенів заповнення  $\kappa=0,3, 0,4$  та  $0,5$ , наведено на рис. 7.11. Нижнє біфуркаційне значення  $\omega_1$  реєструвалось відповідає початку виникнення пульсацій заповнення при збільшенні швидкості обертання камери зі стану спокою, а верхнє біфуркаційне значення  $\omega_2$  – при зменшенні швидкості з режиму руху заповнення у вигляді пристінкового шару.

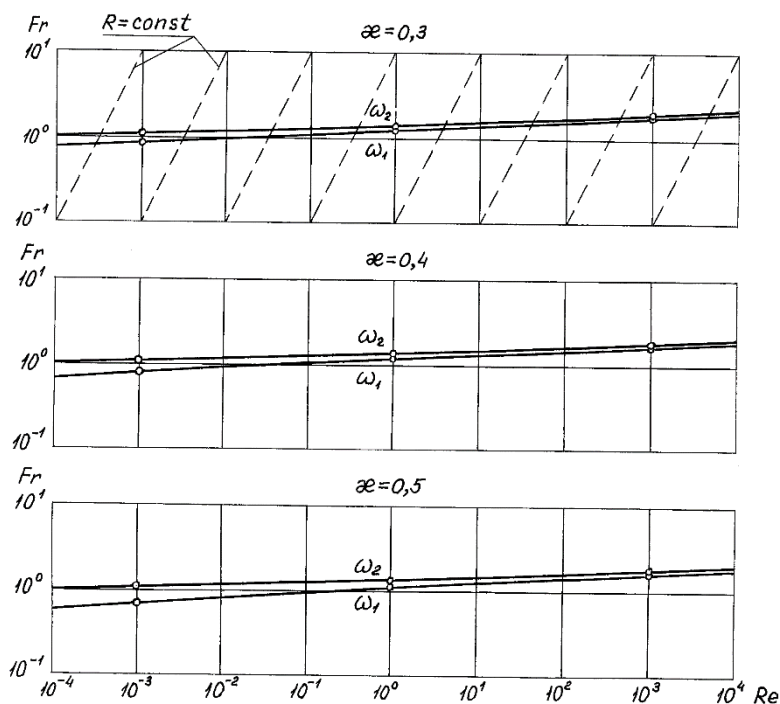


Рис. 7.11. Універсальні залежності біфуркаційних значень швидкості обертання камери із максимальною амплітудою автоколивань незв'язного зернистого заповнення при  $Dr=0,01$  для  $\kappa=0,3, 0,4$  та  $0,5$

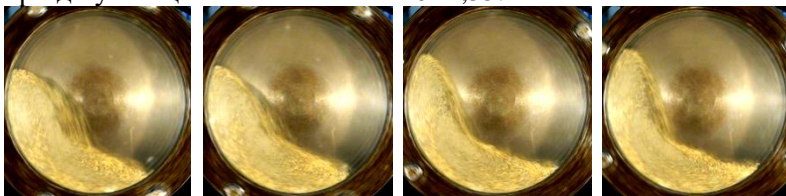
Максимального значення амплітуда автоколивань



заповнення набуває при досягнення відносних біфуркаційних швидкостей обертання меж  $\psi_{\omega_{1max}} \geq 0,85$  та  $\psi_{\omega_{2max}} \leq 1,3$ , що відповідає умові взаємного переходу циркуляційного та режиму руху у вигляді пристінкового шару незв'язного зернистого матеріалу (рис. 7.11). Такий діапазон відносних швидкостей залишається незмінним за будь якого впливу дрібнодисперсної фази на взаємодію зернистих елементів і слабо залежить від  $\kappa$ .

Практично незмінним залишається і частота автоколивань завантаження  $\nu_3$ , величина якої наближається до біфуркаційної частоти обертання камери, із максимальною амплітудою пульсацій завантаження, при  $\psi_{\omega_{max}} = 0,85 - 1,3$ , дещо не досягаючи її, і слабо залежить від поточного значення власне частоти обертання камери  $\nu_\kappa$ , ступеня її заповнення  $\kappa$  та фазної структури завантаження.

Демпфуючий вплив дрібнодисперсних частинок на взаємодію зернистих елементів заповнення знижує стійкість руху, сприяє самозбудженню автоколивань та спричинює істотне зменшення нижньої біфуркаційної швидкості  $\omega_1$  до значення, яке відповідає відносній швидкості обертання  $\psi_{\omega_{1min}} = 0,3$ . За такої умови амплітуда автоколивань має мінімальне значення. На рис. 7.12 наведено послідовні картини виникнення автоколивного режиму руху завантаження двофазної суміші зернистого та дрібнодисперсного матеріалу із мінімальною амплітудою для одного періоду пульсацій для нижньої біфуркаційної відносної швидкості  $\psi_{\omega_{1min}} = 0,3$ , при  $Dr=0,01$  та  $\kappa=0,3$ . Частота автоколивань для рис. 7.11 становить  $\nu_3=2,4$  Гц і в 5,22 рази перевищувала частоту обертання камери, що складає  $\nu_\kappa=0,46$  Гц. При цьому максимальне значення дилатансії завантаження за період пульсацій становить лише  $\nu=1,35$ .





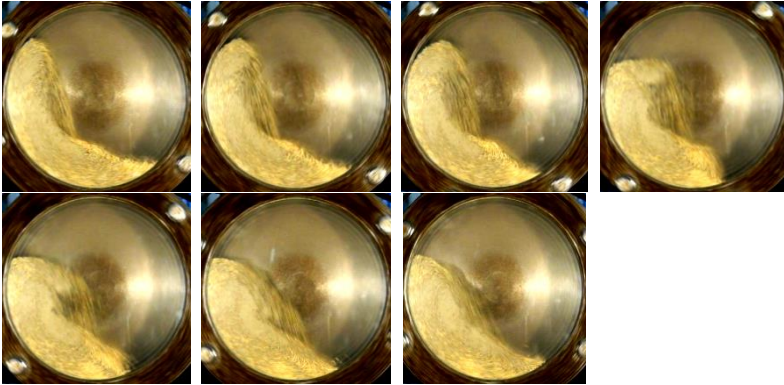


Рис. 7.12. Послідовні картини руху для одного періоду автоколивань заповнення зернистої двофазної суміші із мінімальною амплітудою для  $\psi_{\omega}=0,3$  при  $Df=0,01$  та  $\kappa=0,3$

Натомість частота автоколивань заповнення при  $\kappa=0,3$  (рис. 7.5), у межах відносних біфуркаційних швидкостей обертання  $\psi_{\omega_{1max}} \geq 0,85$  та  $\psi_{\omega_{2max}} \leq 1,15$ , становить  $\nu_3=2,18$  Гц і лише в 1,24-1,68 рази перевищує частоту обертання камери  $\nu_{\kappa}=1,3-1,76$  Гц. При цьому максимальне значення дилатансії за період автоколивань досягає  $\nu=3,23$ .

Оскільки відносна швидкість обертання традиційних барабанних млинів становить  $\psi_{\omega}=0,7-0,85$ , а мінімальне значення нижньої біфуркаційної відносної швидкості обертання, за умови демпфуючого впливу частинок подрібнюваного матеріалу на взаємодію молоткових тіл, становить лише  $\psi_{\omega_{1min}} = 0,3$ , то при експлуатації такого обладнання відбувається самозбудження автоколивань заповнення камери. Однак, внаслідок обмеженості амплітуди пульсацій заповнення при таких коливаннях, їх вплив на процес помелу є незначним.

Наочне представлення умов прояву нестійкості обертання камери із незв'язним зернистим заповненням дає схема якісних

залежностей зміни інерційних параметрів заповнення від швидкості обертання (рис. 7.13).

Значення осьового моменту інерції заповнення  $I_z$  зі збільшенні швидкості обертання  $\omega$  змінюється від мінімального значення у стані спокою  $I_c$  до максимального в режимі руху у вигляді пристінкового шару  $I_w$ . При цьому друга похідна  $d^2I_z(\omega)/d\omega^2$  набуває екстремального від'ємного значення поблизу режиму руху заповнення із повним підкиданням  $CD$  (рис. 7.14), що може спричинити невиконання умови (7.2). Залежність моменту опору заповнення  $M_z$  від  $\omega$  також поблизу режиму руху із повним підкиданням  $CD$  має найбільшу жорсткість, а похідна  $dM_z(\omega)/d\omega$  набуває екстремального від'ємного значення, що також може викликати невиконання (7.2). Нарешті, значення дилатансії завантаження  $v$  поблизу режиму із повним підкиданням  $CD$  набуває максимального абсолютного значення, що підвищує нестійкість однофазного зсувного зернистого потоку.

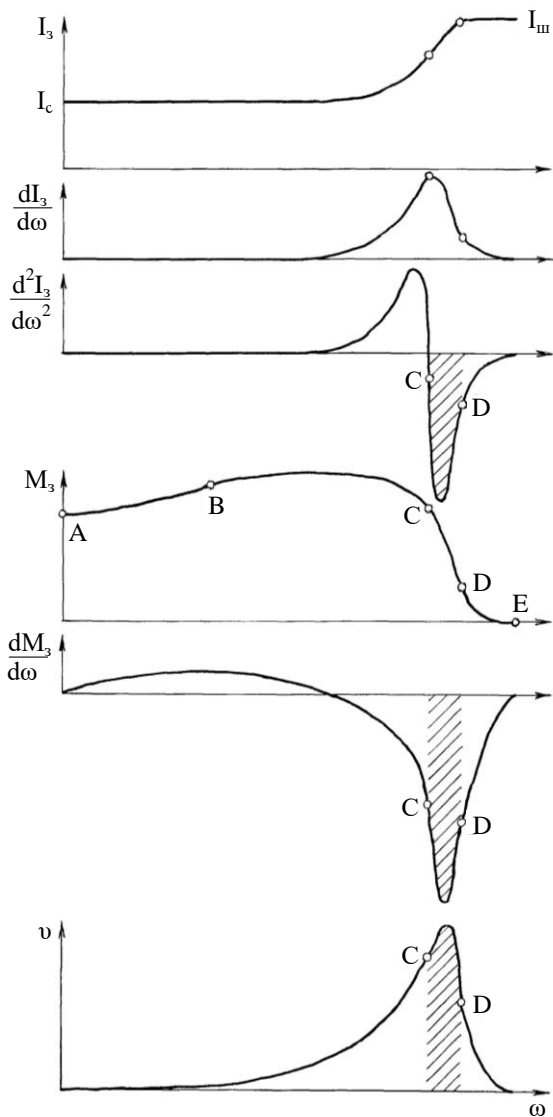


Рис. 7.13. Схема якісних залежностей зміни інерційних параметрів незв'язного зернистого заповнення від швидкості обертання камери  $\omega$ :

*AB* – режим руху заповнення без підкидання,

*BC* – з частковим підкиданням,

*CD* – з повним підкиданням, *DE* – неповного центрифугування

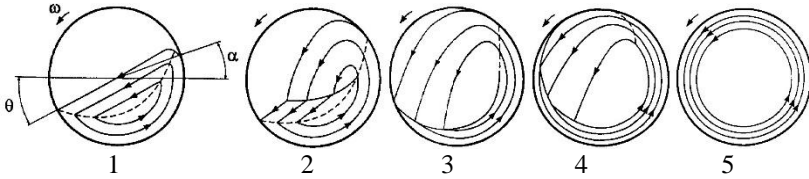


Рис. 7.14. Схеми режимів руху незв'язного зернистого заповнення обертової камери: 1 – режим без підкидання ( $AB$ ), 2 – з частковим підкиданням ( $BC$ ), 3 – з повним підкиданням ( $CD$ ), 4 – неповного центрифугування ( $DE$ ), 5 – пристінкового шару

**Чинниками першого прояву ефекту нестійкості обертання заповненої камери, що пов'язано із біфуркацією усталеного руху машинного агрегату барабанної машини, є варіації жорсткості залежностей осьового моменту інерції та моменту опору завантаження від швидкості обертання.**

**Чинниками другого прояву ефекту нестійкості, що пов'язано із біфуркацією зсувного зернистого потоку, є дилатансія заповнення в обертовій камері та демпфуюча дія малих м'яких частинок заповнення на взаємодію великих твердих.**

Умови стійкості (7.2) та (7.3) встановлюють лише якісні передумови прояву ефекту нестійкого обертання заповненої камери. Кількісні умови самозбудження автоколивань системи визначаються встановленими залежностями зміни інерційних параметрів заповнення камери. Для зручності порівняльного аналізу та узагальнення його результатів значення інерційних параметрів представляються у безрозмірному вигляді (рис. 7.16).

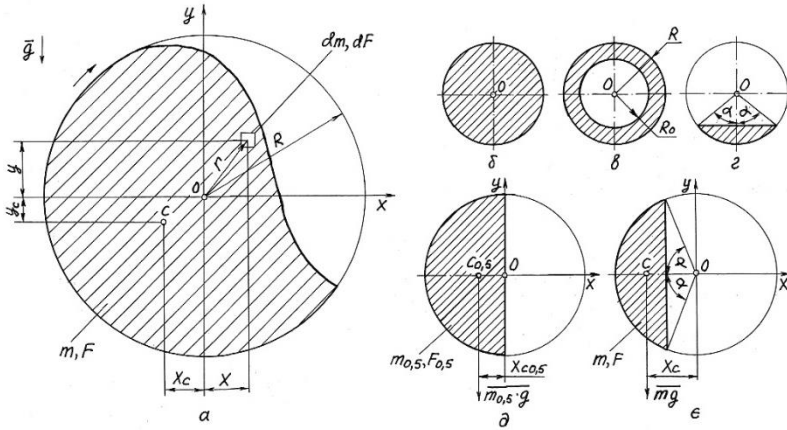


Рис. 7.15. Розрахункові схеми: а – для поточного значення інерційних параметрів, б – для осевого моменту інерції при  $\kappa=1$ , в – для осевого моменту інерції в режимі пристінкового шару при поточному  $\kappa$ , г – для осевого моменту інерції в стані спокою, д – для умовного максимального моменту опору при  $\kappa=0,5$ , е – для умовного максимального моменту опору при поточному  $\kappa$

Інерційні параметри визначаються методом візуалізації картин руху заповненні у поперечному перерізі обертової камери. Застосовуються розрахункові сітки, що покривають зареєстровану картину руху – рис. 7.16, де:  $i=r_i/\Delta r$  – індекс радіальної координати,  $r_i$  – безрозмірна радіальна координата комірки,  $\Delta r$  – безрозмірний радіальний розмір комірки,  $j_i = \varphi_{j_i} / \Delta \varphi_{j_i}$  – індекс кутової координати в кільцевому шарі з радіальним індексом  $i$ ,  $\varphi_{j_i}$  – кутова координата комірки в шарі  $i$ ,  $\Delta \varphi_{j_i}$  – кутовий розмір комірки в шарі  $i$ . Для визначення моменту інерції використовується сітка з концентричним розташуванням комірок у вигляді кільцевого сектора із центром  $c_{ij}$  (рис. 7.16а), а для визначення моменту опору – сітка з рядним розташуванням квадратних комірок із безрозмірним розміром  $h$  та таким же центром (рис. 7.7б).

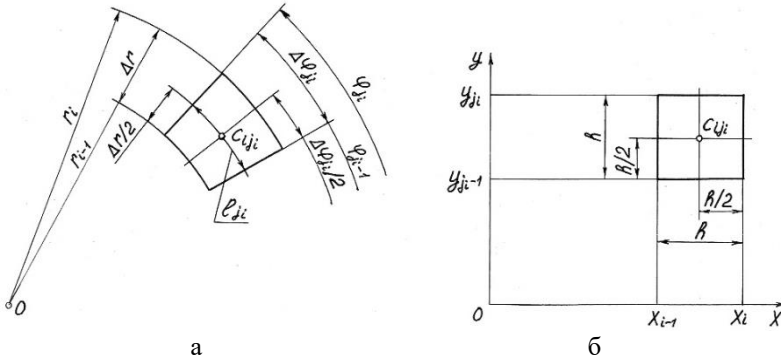


Рис. 7.16. Схеми комірок розрахункових сіток:  
 а – для полярного моменту інерції, б – для статичного моменту

Величина осевого моменту інерції заповнення оцінюється по відношенню до значення моменту при повному заповненні камери, що є максимальним для певного її радіуса  $R$ , а жорсткість характеристики – по відношенню до значення моменту для пристінкового шару заповнення, що є максимальним для певного  $R$  та ступеня заповнення камери  $\kappa$ .

Вираз для відносного моменту інерції по відношенню до значення при повному заповненні камери ( $\kappa=1$ ) має вигляд

$$\psi_{I1} = \frac{I}{I_1} = \frac{I_{p\bar{b}}}{I_{p1\bar{b}}} = \frac{2I_{p\bar{b}}}{\pi},$$

де  $I = \int_m r^2 dm$  – поточне значення моменту інерції заповнення

відносно осі обертання (рис. 7.15а),  $m$  – маса,  $r$  – радіальна координата маси,  $I_1 = m_1 R^2/2$  – момент інерції при  $\kappa=1$  (рис. 7.15б),

$m_1$  – маса заповнення при  $\kappa=1$ ,  $I_{p\bar{b}} = \int_F r^2 dF$  – поточне значення

безрозмірного полярного моменту інерції перерізу заповнення (при  $R=1$ ),  $F$  – площа перерізу заповнення,  $I_{p1\bar{b}} = \pi/2$  – безрозмірний полярний момент інерції перерізу при  $\kappa=1$ .

Вираз для відносного моменту інерції по відношенню до значення для пристінкового шару заповнення має вигляд

$$\psi_{I_{uu}} = \frac{I}{I_{uu}} = \frac{I_{p\bar{b}}}{I_{pu}} = \frac{2I_{p\bar{b}}}{\pi[1 - (1 - \kappa)^2]},$$

де  $I_{uu} = \pi(R^4 - R_0^4)l\rho/2$  – момент інерції пристінкового шару заповнення (рис. 7.6в),  $I_{pu} = \pi[1 - (1 - \kappa^2)]/2$  – безрозмірний полярний момент інерції перерізу пристінкового шару заповнення (при  $R=1$ ),  $R_0$  – радіус вільної поверхні пристінкового шару,  $l$  – довжина камери,  $\rho$  – густина заповнення.

Вираз для поточного значення безрозмірного полярного моменту інерції заповнення, що визначається за допомогою розрахункової сітки із концентричним розташуванням комірок (рис. 7.16а), має вигляд

$$I_{p\bar{b}} = \frac{\pi}{2k^4 m_{j_1}} \sum_{i=1}^k \sum_{j_i=1}^{m_{j_i}} \frac{i^4 - (i-1)^4}{2i-1} n_{ij_i},$$

де  $k=1/\Delta r$  – число кільцевих шарів комірок в сітці,  $m_{j_i} = 2\pi/\Delta\varphi_{j_i}$  – число комірок в кільцевому шарі  $i$ ,  $n_{ij_i}$  – число комірок сітки, що заповнено заповненням.

Величина моменту опору заповнення обертанню камери оцінюється по відношенню до значення умовного максимального моменту при половинному заповненні камери, що є максимальним для певного  $R$ , а жорсткість характеристики – по відношенню до умовного максимального моменту при поточному значенні  $\kappa$ , що є максимальним для певного  $R$  та  $\kappa$ .

Умовний максимальний момент (рис. 7.6д,є) відповідає розподілу заповнення в поперечному перерізі у вигляді ідеального твердотілого сегмента, що повернуто разом із камерою відносно стану спокою на прямий кут.

Вираз для відносного моменту опору по відношенню до умовного максимального значення при половинному заповненні ( $\kappa=0,5$ ) має вигляд

$$\psi_{M0,5} = \frac{M}{M_{0,5max}} = \frac{S_{y\bar{b}}}{S_{y0,5max\bar{b}}} = \frac{3S_{y\bar{b}}}{2},$$

де  $M = g \int_m x dm$  – момент активних масових сил опору

заповнення (рис. 7.15а),  $x$  – горизонтальна центральна вісь перерізу камери,  $g$  – гравітаційне прискорення,  $M_{0,5max} = gsm_{0,5}x_{C0,5}$  – умовний максимальний момент опору при  $\kappa=0,5$  (рис. 7.15д),  $m_{0,5}$  – маса половинного заповнення,  $x_{C0,5}$  – горизонтальна координата центра мас  $C_{0,5}$  ідеального сегмента половинного заповнення в перерізі,  $S_{y\delta} = \int_F x dF$  – поточне значення безрозмірного

статичного моменту перерізу заповнення (при  $R=1$ ),  $S_{y0,5max\delta} = 2/3$  – безрозмірний умовний максимальний статичний момент при  $\kappa=0,5$ .

Вираз для відносного моменту опору по відношенню до умовного максимального при поточному значенні  $\kappa$  має вигляд

$$\psi_{Mc} = \frac{M}{M_{cmax}} = \frac{S_{y\delta}}{S_{ymax\delta}} = \frac{3S_{y\delta}}{2\sin^3 \alpha},$$

де  $M_{cmax} = m_3 x_C g$  – умовний максимальний момент опору при поточному  $\kappa$  (рис. 7.15е),  $m_3$  – маса заповнення,  $x_C$  – горизонтальна координата центра мас  $C$  ідеального сегмента заповнення в перерізі,  $S_{ymax\delta} = 2\sin^3 \alpha / 3$  – безрозмірний умовний максимальний статичний момент перерізу заповнення при поточному  $\kappa$ .

Вираз для поточного значення безрозмірного статичного моменту заповнення, що визначається за допомогою розрахункової сітки із рядним розташуванням комірок (рис. 7.15б), має вигляд

$$S_{y\delta} = \frac{1}{2k^3} \sum_{i=-k}^k \sum_{j_i=-m_{ji}}^{m_{ji}} (2i-1) N_{ij_i},$$

де  $i=x_i/h$  – індекс горизонтальної координати,  $x_i$  – безрозмірна горизонтальна координата комірки,  $k=1/h$  – половина числа вертикальних шарів комірок,  $j_i = y_{j_i}/h$  – індекс вертикальної координати у вертикальному шарі з горизонтальним індексом  $i$ ,



$y_{j_i}$  – безрозмірна вертикальна координата комірки у вертикальному шарі  $i$ ,  $m_{j_i} = \{1/[2\arccos x_{i-1} - \sin(2\arccos x_{i-1})] - 1/[2\arccos x_i - \sin(2\arccos x_i)]\}/4h$  – половина числа комірок у вертикальному шарі  $i$ ,  $N_{ij_i}$  – число комірок сітки, що заповнено заповненням.

Вираз для дилатансії заповнення в камері має вигляд

$$\nu = \frac{F}{\pi R^2 \kappa},$$

де  $F = \int_F dF$  – поточне значення заповненої площі перерізу камери.

Вирази для дилатансії, що визначається за допомогою розрахункової сітки із концентричним (рис. 7.7а)  $\nu_I$  та рядним (рис. 7.15б)  $\nu_M$  розташуванням комірок, мають вигляд

$$\nu_I = \frac{1}{k^2 m_{j_i} \kappa} \sum_{i=1}^k \sum_{j_i=1}^{m_{j_i}} n_{ij_i},$$

$$\nu_M = \frac{1}{\pi k^2 \kappa} \sum_{i=-k}^k \sum_{j_i=-m_{j_i}}^{m_{j_i}} N_{ij_i}.$$

При використанні концентричної розрахункової сітки із числом кільцевих шарів комірок 20 (рис. 7.17) та рядної сітки із числом вертикальних шарів комірок 20 (рис. 7.18), вирази для визначення безрозмірних моментів  $I_{p\bar{b}}$  і  $S_{y\bar{b}}$  та дилатансії  $\nu_I$  і  $\nu_M$  мають вигляд

$$I_{p\bar{b}(20)} = \frac{\pi}{960000} (n_1 + 5n_2 + 13n_3 + 25n_4 + 41n_5 + 61n_6 + 85n_7 + 113n_8 + 145n_9 + 181n_{10} + 221n_{11} + 265n_{12} + 313n_{13} + 365n_{14} + 421n_{15} + 481n_{16} + 545n_{17} + 613n_{18} + 685n_{19} + 761n_{20});$$

$$S_{y\bar{b}(20)} = \frac{1}{16000} [N_1 - N'_1 + 3(N_2 - N'_2) + 5(N_3 - N'_3) + 7(N_4 - N'_4) +$$

$$\begin{aligned}
& + 9(N_5 - N'_5) + 11(N_6 - N'_6) + 13(N_7 - N'_7) + 15(N_8 - N'_8) + \\
& + 17(N_9 - N'_9) + 19(N_{10} - N'_{10}) + 21(N_{11} - N'_{11}) + 23(N_{12} - N'_{12}) + \\
& + 25(N_{13} - N'_{13}) + 27(N_{14} - N'_{14}) + 29(N_{15} - N'_{15}) + 31(N_{16} - N'_{16}) + \\
& + 33(N_{17} - N'_{17}) + 35(N_{18} - N'_{18}) + 37(N_{19} - N'_{19}) + 39(N_{20} - N'_{21}) \Big]; \\
v_{I(20)} &= \frac{1}{1200\kappa} (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + n_7 + n_8 + n_9 + n_{10} + \\
& + n_{11} + n_{12} + n_{13} + n_{14} + n_{15} + n_{16} + n_{17} + n_{18} + n_{19} + n_{20}); \\
v_{M(20)} &= \frac{1}{\pi 400\kappa} (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8 + N_9 + N_{10} + \\
& + N_{11} + N_{12} + N_{12} + N_{13} + N_{14} + N_{15} + N_{16} + N_{17} + N_{18} + N_{19} + N_{20} + \\
& + N'_1 + N'_2 + N'_3 + N'_4 + N'_5 + N'_6 + N'_7 + N'_8 + N'_9 + N'_{10} + N'_{11} + \\
& + N'_{12} + N'_{13} + N'_{14} + N'_{15} + N'_{16} + N'_{17} + N'_{18} + N'_{19} + N'_{20});
\end{aligned}$$

де  $n_1, n_2, \dots, n_{20}$  – число заповнених комірок у кільцевих шарах концентричної сітки;  $N_1, N_2, \dots, N_{20}$ , та  $N'_1, N'_2, \dots, N'_{20}$  – число заповнених комірок у вертикальних шарах ліворуч та праворуч від центра рядної сітки.

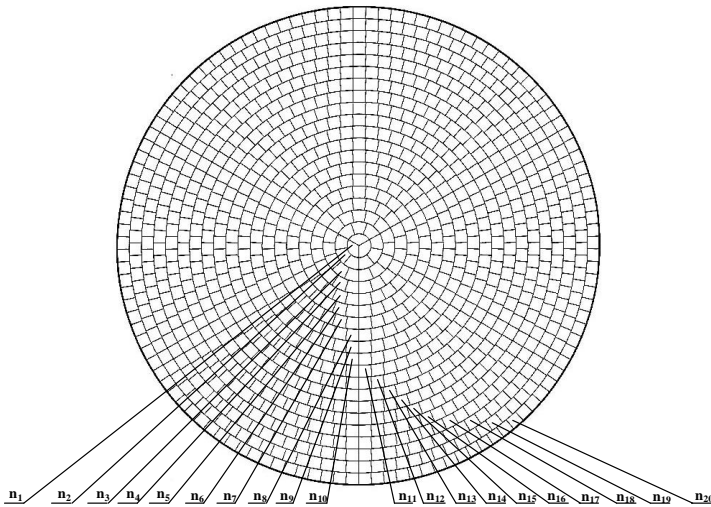


Рис. 7.17. Схема розрахункової сітки із концентричним розташуванням шарів комірок

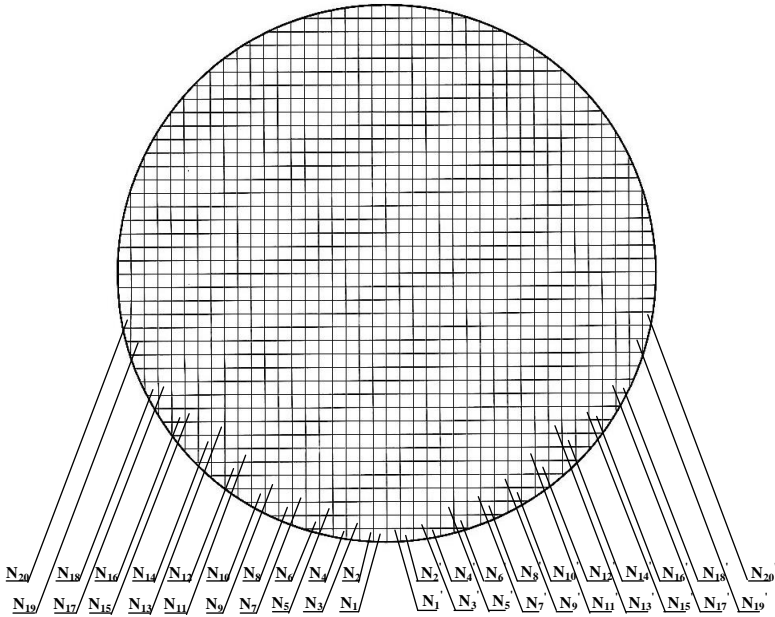


Рис. 7.18. Схема розрахункової сітки із рядним розташуванням шарів комірок

Графіки залежностей  $\psi_{11}$ ,  $\psi_{11u}$ ,  $\psi_{M0,5}$ ,  $\psi_{Mc}$  та середньої дилатансії  $v$  при усталеному режимі руху незв'язного зернистого заповнення із  $Dr=0,1$  для п'яти ступенів заповнення камери  $\kappa=0,25-0,45$  зображено на рис. 7.19.

Графіки таких залежностей для декількох періодів перехідного автоколивного руху незв'язного зернистого заповнення із  $Dr=0,1$  для восьми ступенів заповнення камери  $\kappa=0,15-0,5$  зображено на рис. 7.20, де  $t$  – час,  $t_n$  – тривалість періоду коливань.

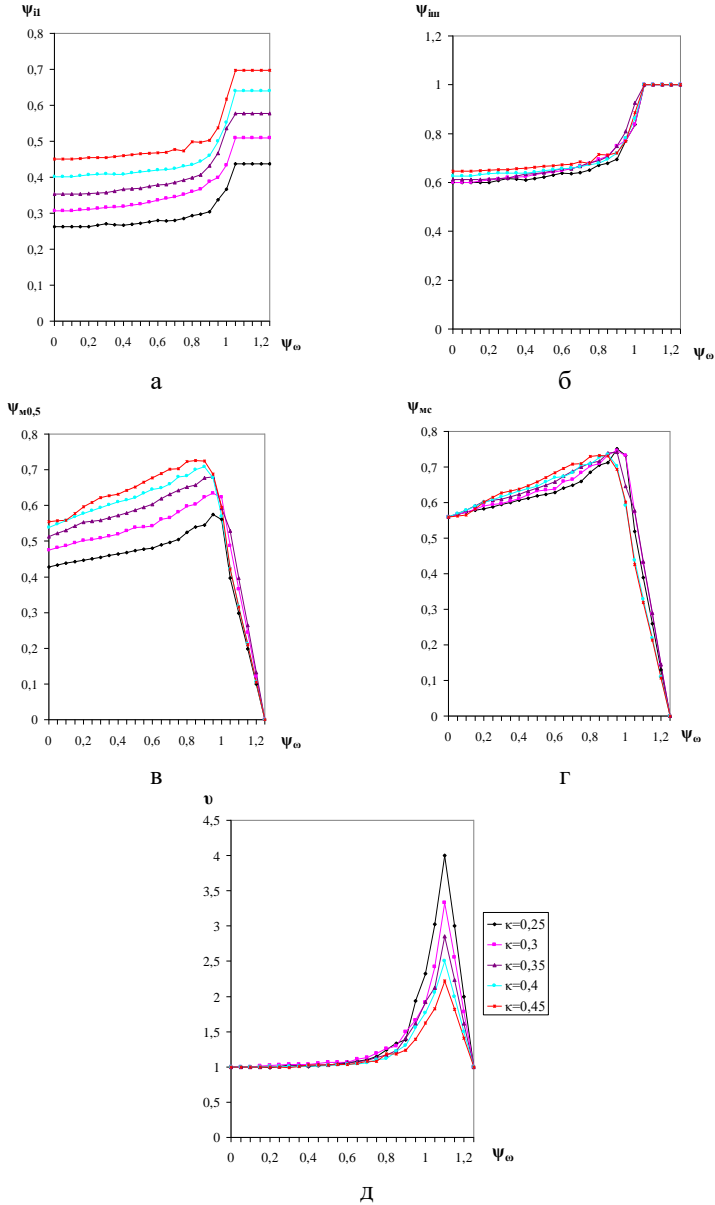


Рис. 7.19. Залежності  $\psi_{II}$  (а),  $\psi_{III}$  (б),  $\psi_{M0,5}$  (в),  $\psi_{Mc}$  (г) та  $v$  (д) від відносної швидкості обертання  $\psi_\omega$  при  $\kappa=0,25-0,45$  для  $Dr=0,01$

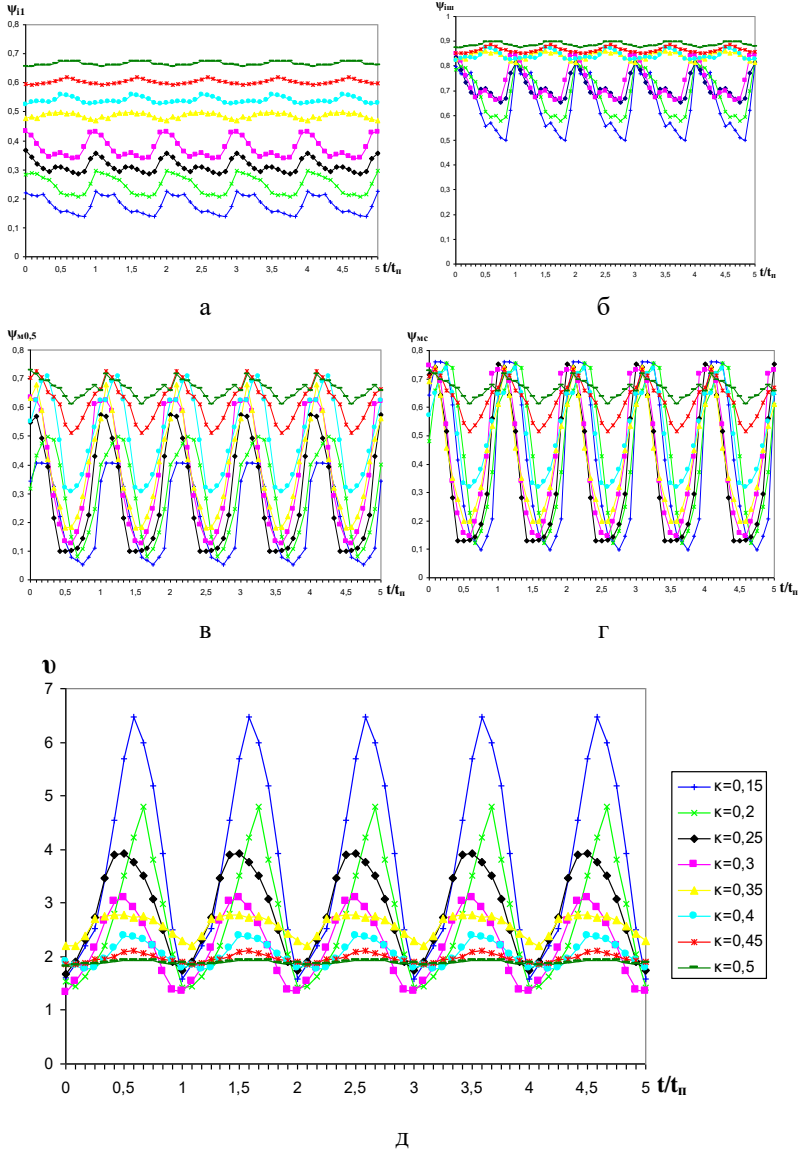


Рис. 7.20. Залежності  $\psi_{11}$  (а),  $\psi_{1m}$  (б),  $\psi_{m0,5}$  (в),  $\psi_{mс}$  (г) та  $v$  (д) від часу для декількох періодів автоколивань із максимальною амплітудою зернистого заповнення при  $Df=0,01$  та  $\kappa=0,15-0,5$

**Кількісні умови самозбудження автоколивань із максимальною амплітудою незв'язного зернистого заповнення обертової камери:**

- відносна швидкість обертання  $\psi_{\omega}=0,85-1,15$  і задається функціональними залежностями;
- ступінь заповнення камери  $\kappa=0,25$ ;
- ступінь заповнення м'якими дисперсними частинками  $\kappa_{мз}<0,4$ .

### **Порядок виконання роботи**

1. Задатись значеннями параметрів системи: вид незв'язного зернистого матеріалу; радіус камери барабана  $R$ , м.

2. Змонтувати в установці барабан із камерою, ступінь заповнення якої матеріалом становить  $\kappa=0,5$  (рис. 1.13).

3. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно збільшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна, зі стану спокою, та візуалізуючи режим руху заповнення через прозору торцеву стінку камери, частоту обертання барабана, що відповідає нижній біфуркаційній швидкості обертання камери  $\omega_1$  при самозбудження автоколивань заповнення із максимальною амплітудою, під час прискорення обертання барабана за першим дослідом  $n'_1$ , об./хв.

4. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно зменшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна, починаючи від режиму руху заповнення у вигляді пристінкового шару, та візуалізуючи режим руху заповнення через прозору торцеву стінку камери, частоту обертання барабана, що відповідає верхній біфуркаційній швидкості обертання камери  $\omega_2$  при самозбудження автоколивань заповнення із максимальною амплітудою, під час сповільнення обертання барабана за першим дослідом  $n'_2$ , об./хв.

5. Повторити виконання п.п. 3 та 4 ще два рази та виміряти біфуркаційні частоти обертання за другим та третім дослідом  $n''_1$ ,  $n''_2$ ,  $n'''_1$  та  $n'''_2$ , об./хв.

6. Визначити за трьома дослідом середні значення біфуркаційних частот обертання  $n_{1с}$  та  $n_{2с}$ , об./хв.:

$$n_{ic} = \frac{n_i' + n_i'' + n_i'''}{3},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

7. Визначити значення біфуркаційних кутових швидкостей обертання барабана  $\omega_1$  та  $\omega_2$ , 1/с:

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot n_{ic}}{30},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс,  $\pi=3,14$ .

8. Визначити значення відносних біфуркаційних кутових швидкостей обертання барабана  $\psi_{\omega 1}$  та  $\psi_{\omega 2}$ , 1/с:

$$\psi_{\omega i} = \omega_i \sqrt{\frac{R}{g}},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

9. Визначити координати біфуркаційних точок на діаграмі  $Re-Fr$ :

$$Re_i^* = \frac{\omega_i \cdot R^2}{\nu}, \quad Fr_i^* = \frac{\omega_i^2 \cdot R}{g},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекси,  $\nu=1$  м<sup>2</sup>/с – аналог кінематичної в'язкості зернистого заповнення,  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup> – гравітаційне прискорення.

10. Визначити десяткові логарифми координат біфуркаційних точок:

$$\log(Re_i^*), \quad \log(Fr_i^*),$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекси.

11. Побудувати на копії діаграми  $Re-Fr$  для  $\kappa=0,5$  (рис. 7.21) в логарифмічних осях за одержаними логарифмами координат  $\log(Re_1^*)$ ,  $\log(Fr_1^*)$ ,  $\log(Re_2^*)$  та  $\log(Fr_2^*)$  біфуркаційні точки  $K_1^*$  та  $K_2^*$ .

12. Визначити, за положення на діаграмі  $Re-Fr$  одержаних біфуркаційних точок  $K_1^*$  та  $K_2^*$ , режими або межі переходу режимів руху заповнення, що відповідають самозбудженню автоколивань при  $\kappa=0,5$ .

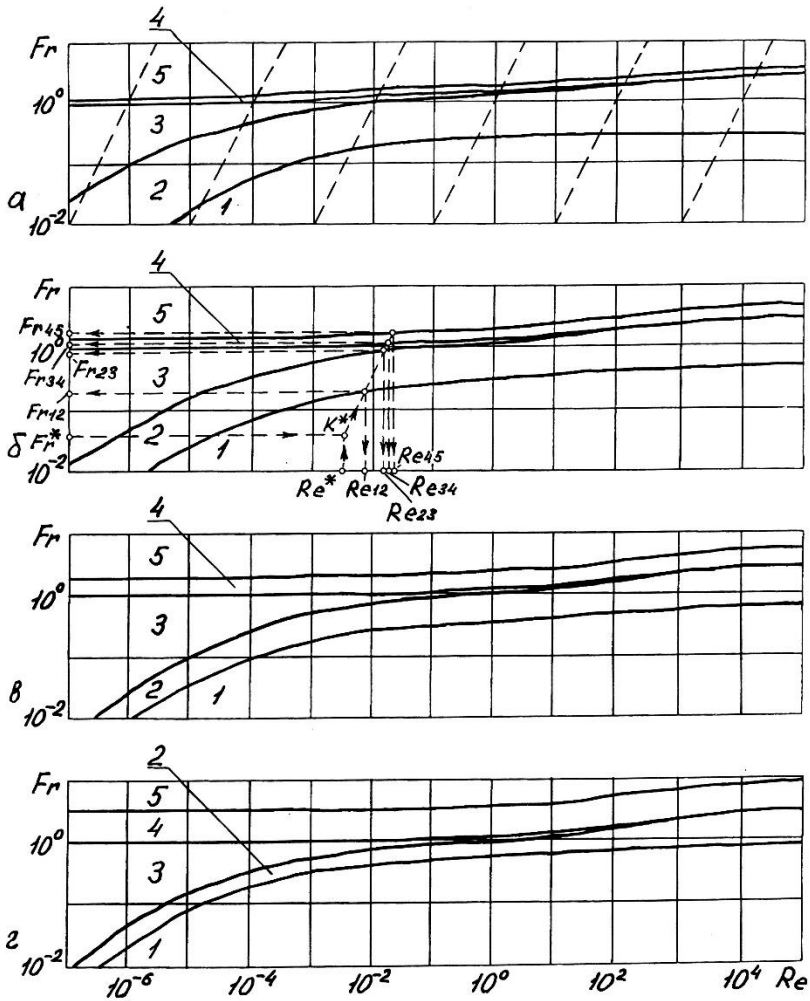


Рис. 7.21. Універсальні діаграми переходу режимів руху незв'язного зернистого матеріалу в обертвовій камері та послідовність виконання побудов при розрахунку меж переходу режимів руху за діаграмами (позначення режимів за рис. 3.2):  
 $\kappa=0,3$  (а);  $\kappa=0,5$  (б);  $\kappa=0,7$  (в);  $\kappa=0,9$  (г)



13. Змонтувати в установці барабан із камерою, ступінь заповнення якої матеріалом становить  $\kappa=0,4$  (рис. 1.13).

14. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно збільшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна, зі стану спокою, та візуалізуючи режим руху заповнення через прозору торцеву стінку камери, частоту обертання барабана, що відповідає нижній біфуркаційній швидкості обертання камери  $\omega_1$  при самозбудження автоколивань заповнення із максимальною амплітудою, під час прискорення обертання барабана за першим дослідом  $n'_1$ , об./хв.

15. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно зменшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна, починаючи від режиму руху заповнення у вигляді пристінкового шару, та візуалізуючи режим руху заповнення через прозору торцеву стінку камери, частоту обертання барабана, що відповідає верхній біфуркаційній швидкості обертання камери  $\omega_2$  при самозбудження автоколивань заповнення із максимальною амплітудою, під час сповільнення обертання барабана за першим дослідом  $n'_2$ , об./хв.

16. Повторити виконання п.п. 14 та 15 ще два рази та виміряти біфуркаційні частоти обертання за другим та третім дослідом  $n''_1$ ,  $n''_2$ ,  $n'''_1$  та  $n'''_2$ , об./хв.

17. Визначити за трьома дослідом середні значення біфуркаційних частот обертання  $n_{1c}$  та  $n_{2c}$ , об./хв.:

$$n_{ic} = \frac{n'_i + n''_i + n'''_i}{3},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

18. Визначити значення біфуркаційних кутових швидкостей обертання барабана  $\omega_i$  та  $\omega_2$ , 1/с:

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot n_{ic}}{30},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс,  $\pi=3,14$ .

19. Визначити значення відносних біфуркаційних кутових швидкостей обертання барабана  $\psi_{\omega_1}$  та  $\psi_{\omega_2}$ , 1/с:

$$\psi_{\omega_i} = \omega_i \sqrt{\frac{R}{g}},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

20. Змонтувати в установці барабан із камерою, ступінь заповнення якої матеріалом становить  $\kappa=0,3$  (рис. 1.13).

21. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно збільшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна, зі стану спокою, та візуалізуючи режим руху заповнення через прозору торцеву стінку камери, частоту обертання барабана, що відповідає нижній біфуркаційній швидкості обертання камери  $\omega_1$  при самозбудженні автоколивань заповнення із максимальною амплітудою, під час прискорення обертання барабана за першим дослідом  $n'_1$ , об./хв.

22. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно зменшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна, починаючи від режиму руху заповнення у вигляді пристінкового шару, та візуалізуючи режим руху заповнення через прозору торцеву стінку камери, частоту обертання барабана, що відповідає верхній біфуркаційній швидкості обертання камери  $\omega_2$  при самозбудженні автоколивань заповнення із максимальною амплітудою, під час сповільнення обертання барабана за першим дослідом  $n'_2$ , об./хв.

23. Повторити виконання п.п. 21 та 22 ще два рази та виміряти біфуркаційні частоти обертання за другим та третім дослідом  $n''_1$ ,  $n''_2$ ,  $n'''_1$  та  $n'''_2$ , об./хв.

24. Визначити за трьома дослідом середні значення біфуркаційних частот обертання  $n_{1c}$  та  $n_{2c}$ , об./хв.:

$$n_{ic} = \frac{n'_i + n''_i + n'''_i}{3},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

25. Визначити значення біфуркаційних кутових швидкостей обертання барабана  $\omega_1$  та  $\omega_2$ , 1/с:

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot n_{ic}}{30},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс,  $\pi=3,14$ .

26. Визначити значення відносних біфуркаційних кутових швидкостей обертання барабана  $\psi_{\omega_1}$  та  $\psi_{\omega_2}$ ,  $1/c$ :

$$\psi_{\omega_i} = \omega_i \sqrt{\frac{R}{g}},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

27. Визначити координати біфуркаційних точок на діаграмі  $Re-Fr$ :

$$Re_i^* = \frac{\omega_i \cdot R^2}{\nu}, \quad Fr_i^* = \frac{\omega_i^2 \cdot R}{g},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекси,  $\nu=1 \text{ м}^2/\text{с}$  – аналог кінематичної в'язкості зернистого заповнення,  $g=9,81 \text{ м}/\text{с}^2$  – гравітаційне прискорення.

28. Визначити десяткові логарифми координат біфуркаційних точок:

$$\log(Re_i^*), \quad \log(Fr_i^*),$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекси.

29. Побудувати на копії діаграми  $Re-Fr$  для  $\kappa=0,3$  (рис. 7.21) в логарифмічних осях за одержаними логарифмами координат  $\log(Re_1^*)$ ,  $\log(Fr_1^*)$ ,  $\log(Re_2^*)$  та  $\log(Fr_2^*)$  біфуркаційні точки  $K_1^*$  та  $K_2^*$ .

30. Визначити, за положення на діаграмі  $Re-Fr$  одержаних біфуркаційних точок  $K_1^*$  та  $K_2^*$ , режими або межі переходу режимів руху заповнення, що відповідають самозбудженню автоколивань при  $\kappa=0,3$ .

31. Результати вимірювань та обчислень занести у табл. 7.1:

### **Зміст звіту про виконання лабораторної роботи 7**

1. Номер та назва роботи.

2. Мета роботи.

3. Визначення двох проявів ефекту самозбудження автоколивань заповненої обертової камери за с. 90 (виділено жирним шрифтом).

Таблиця 7.1

Параметри		Значення біфуркаційних параметрів для умов самозбудження автоколивань заповнення з індексами $i$					
		$\kappa=0,5$		$\kappa=0,4$		$\kappa=0,3$	
		$i=1$	$i=2$	$i=1$	$i=2$	$i=1$	$i=2$
$n_i'$	(об./хв.)						
$n_i''$							
$n_i'''$							
$n_{ic}$							
$\omega_{i\partial}$	(1/с)						
$\psi_{\omega_i}$	п.п. 7, 18, 25						
$Re_i^*$	п.п. 8, 19, 26			-	-		
$Fr_i^*$				-	-		
$\log(Re_i^*)$	п.п. 9, 27			-	-		
$\log(Fr_i^*)$				-	-		
Режим руху або межа переходу режимів руху	п.п. 12, 30			-	-		
Вид нез'язного зернистого матеріалу – ...; $R = \dots$ м							

4. Копія рис. 7.13 із позначеннями.

5. Визначення чинників нестійкості обертання заповненої камери за с. 107 (виділено жирним шрифтом).

6. Кількісні умови самозбудження автоколивань із максимальною амплітудою нез'язного зернистого заповнення обертової камери за с. 114 (виділено жирним шрифтом).

6. Копія діаграми  $Re-Fr$  на рис. 7.21 із виконаними побудовами.

7. Заповнена табл. 7.1 за п. 31.

## Лабораторна робота 8

### КРАЙОВИЙ ЕФЕКТ РУХУ ТЕКУЧОГО ЗАПОВНЕННЯ КАМЕРИ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА

**Мета роботи:** Експериментальним шляхом визначити швидкості стаціонарного обертання циліндричної камери навколо горизонтальної осі, що відповідають змінам меж переходу режимів усталеної течії рідкого заповнення, які спричинено крайовим ефектом.

#### Основні теоретичні відомості

**Крайовий ефект руху заповнення обертової камери** полягає у суттєвому зростанні впливу на режим руху торцевих поверхонь камери, порівняно із впливом циліндричної поверхні (рис. 8.1). При цьому *рух заповнення стає тривимірним*.

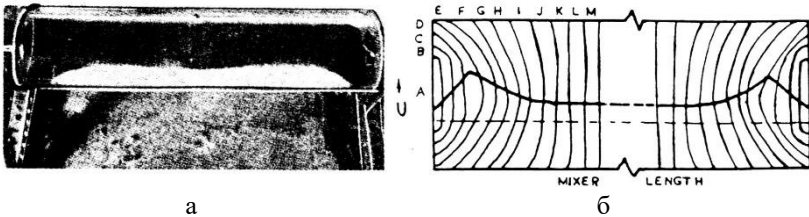


Рис. 8.1. Візуалізація картини руху зернистого заповнення в осьовому перерізі обертової камери за умови істотного впливу торцевих поверхонь на режим руху: а – картина руху, б – схема руху

У випадку рідкого заповнення крайовий ефект руху супроводжується *налипанням рідини на торцеві стінки*.

**Прояв крайового ефекту** полягає у збільшенні загального фрикційного впливу поверхні камери на рух заповнення. Такий вплив може спричинити зниження швидкісних меж переходу режимів руху заповнення та зростання моменту опору заповнення обертанню камери. Крім того, дія торцевих поверхонь може викликати перехід циркуляційного режиму руху незв'язного зернистого

заповнення в режим у вигляді пристінкового шару при малому ступені заповнення камери,  $\kappa < 0,25$ , без збільшення висоти виступів на поверхні камери.

**Прояв крайового ефекту руху посилюється зі зменшенням відносної довжини камери  $l_r = L/(2R)$  та збільшенням внутрішнього тертя заповнення.**

У випадку довгої камери, коли  $L/(2R) > 0,5$ , впливом торцевих стінок на рух заповнення можна знехтувати і вважати такий рух двовимірним. Тоді критеріями подібності двовимірного усталеного руху заповнення в стаціонарно обертовій камері будуть динамічний критерій – число Рейнольдса на циліндричній поверхні камери

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

динамічний критерій – число Фруда на циліндричній поверхні

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g},$$

та геометричний критерій – ступінь заповнення камери

$$\kappa = \frac{w}{\pi R^2 L},$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання камери,  $R$  – радіус камери,  $\nu$  – кінематичні в'язкість заповнення,  $g$  – гравітаційне прискорення,  $w$  – об'єм заповнення,  $L$  – довжина камери.

За умов **короткої камери, коли  $L/(2R) < 0,3$** , вплив стінок стає суттєвим і рух заповнення тривимірним. Тоді, крім основних параметрів подібності руху для випадку довгої камери –  $Re$ ,  $Fr$  та  $\kappa$ , необхідно врахувати додатковий геометричний критерій – **відносну довжину камери**

$$l_r = \frac{L}{2R}.$$

Крайовий ефект руху заповнення обертової камери використовується для підвищення фрикційної взаємодії поверхні камери із заповненням при реалізації робочих процесів низки машин барабанного типу із короткими камерами – барабанних млинів самоподрібнення і напівсамоподрібнення, міксерів та

реометрів. Для посилення прояву крайового ефекту на торцевих поверхнях млинів само подрібнення (рис. 8.2) застосовуються виступаючі елементи, що підвищують фрикційну взаємодію із заповненням.

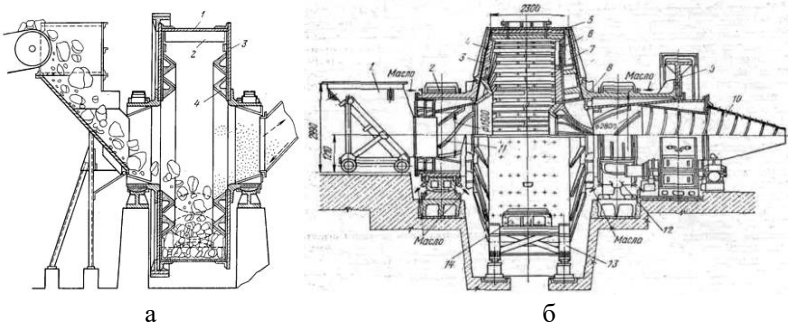


Рис. 8.2. Барабанні млини самоподрібнення:  
а – сухого подрібнення, б – мокрого подрібнення

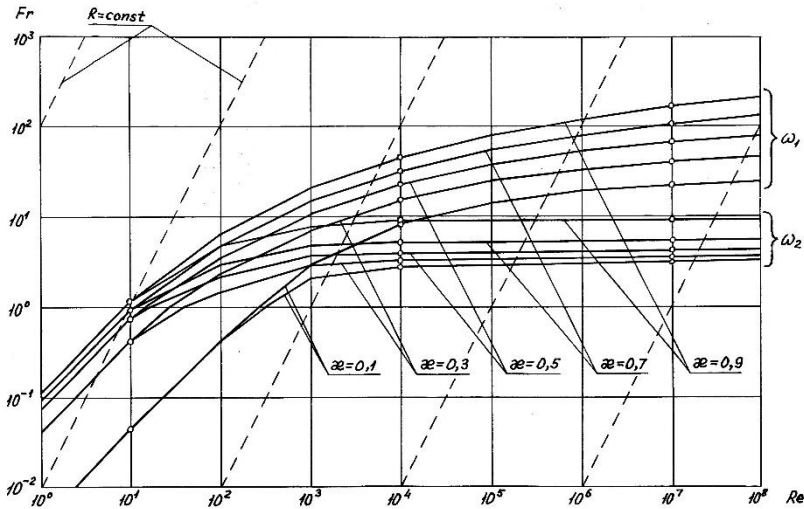


Рис. 8.3. Універсальні діаграми переходу режимів течії рідини в оборотній камері для ступеня заповнення камери  $\kappa=0,1, 0,3, 0,5, 0,7$  та  $0,9$ :  $\omega_1$  – межа переходу циркуляційного режиму у режим течії у вигляді пристінкового шару при прискоренні обертання;  $\omega_2$  – межа зворотного переходу режимів течії при сповільненні обертання

### Порядок виконання роботи

1. Задатись значеннями параметрів системи: вид рідини; кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с; радіус обертової камери  $R$ , м; довжина камери  $L$ , м; ступінь заповнення камери порцією рідини  $\kappa$ .

2. Визначити відносну довжину камери  $l_r$ :

$$l_r = \frac{L}{2R}.$$

3. Змонтувати в установці барабан із камерою радіусом  $R$ , ступінь заповнення якої рідиною в'язкістю  $\nu$  становить  $\kappa$  (рис. 1.13).

4. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно збільшуючи за допомогою автотрансформатора швидкість обертання електродвигуна зі стану спокою та візуалізуючи режим течії рідини через прозору торцеву стінку камери, частоту обертання барабана при переході циркуляційного режиму течії рідини в режим пристінкового шару під час прискорення обертання барабана за першим дослідом  $n'_1$ , об./хв.

5. Виміряти за допомогою тахометра, повільно і плавно зменшуючи автотрансформатором швидкість обертання, частоту обертання барабана при переході режиму пристінкового шару в циркуляційний режим течі під час сповільнення обертання барабана за першим дослідом  $n'_2$ , об./хв.

6. Повторити виконання п.п. 3 та 4 ще два рази та виміряти частоти обертання при переході режимів течії за другим та третім дослідом  $n''_1$ ,  $n''_2$ ,  $n'''_1$  та  $n'''_2$ , об./хв.

7. Визначити за трьома дослідом середні значення частот обертання при переході режимів течії  $n_{1c}$  та  $n_{2c}$ , об./хв.:

$$n_{ic} = \frac{n'_i + n''_i + n'''_i}{3},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

8. Визначити дослідні значення кутових швидкостей обертання барабана при переході режимів течії  $\omega_{1\partial}$  та  $\omega_{2\partial}$ , 1/с:



$$\omega_{i\partial} = \frac{\pi \cdot n_{ic}}{30},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс,  $\pi=3,14$ .

9. Визначити, надаючи, для спрощення, кутовій швидкості  $\omega$  значення  $\omega=1$  1/с, координати  $Re^*=(\omega R^2)/\nu$  та  $Fr^*=(\omega^2 \cdot R)/g$  допоміжної точки на діаграмі  $Re-Fr$ :

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

де  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup> – гравітаційне прискорення.

10. Визначити десяткові логарифми координат допоміжної точки:

$$\log(Re^*), \quad \log(Fr^*).$$

11. Побудувати на копії діаграми  $Re-Fr$  (рис. 8.2) в логарифмічних осях за одержаними логарифмами координат  $\log(Re^*)$  та  $\log(Fr^*)$  допоміжну точку  $K^*$ .

12. Провести на діаграмі  $Re-Fr$  через одержану точку  $K^*$  допоміжну похилу пряму із кутовим коефіцієнтом 2, яка відповідає умові  $R=\text{const}$ , до перетину із лініями графіку  $\omega_1$  та  $\omega_2$  для відповідного значення ступеня заповнення камери  $\kappa$ .

13. Виміряти на логарифмічних осях діаграми  $Re-Fr$  логарифмічні координати одержаних точок перетину допоміжної прямої із лініями графіку ( $\omega_1$  та  $\omega_2$ ):

$$\log(Re_1), \quad \log(Fr_1), \quad \log(Re_2), \quad \log(Fr_2).$$

14. Визначити, за одержаними логарифмічними координатами точок перетину допоміжної прямої із відповідними лініями графіку ( $\omega_1$  та  $\omega_2$ ), їх координати  $Re_1$  і  $Fr_1$  та  $Re_2$  і  $Fr_2$ :

$$Re_i = 10^{\log(Re_i)}, \quad Fr_i = 10^{\log(Fr_i)},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

15. Визначити теоретичні значення кутових швидкостей обертання барабана при переході режимів течії  $\omega_{1m}$  та  $\omega_{2m}$ , 1/с:

$$\omega_{im} = \frac{Re_i \cdot \nu}{R^2} + \sqrt{\frac{Fr_i \cdot g}{R}},$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

16. Визначити розбіжність отриманих дослідних та теоретичних значень кутових швидкостей обертання камери при переході режимів течії  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$ , %:

$$\varepsilon_i = \frac{|\omega_{\partial i} - \omega_{mi}|}{\omega_{mi}} \cdot 100\%,$$

де  $i=1$  або  $2$  – індекс.

17. Результати вимірювань та обчислень занести у табл. 8.1:

Таблиця 8.1

Параметри		Значення параметрів для меж переходу режимів течії з індексами $i$	
		$i=1$	$i=2$
$l_r$			те саме
$n_i'$	(об./хв.)		
$n_i''$			
$n_i'''$			
$n_{ic}$			
$\omega_{i\partial}$	(1/с)		
$Re^*$	(п. 9)		те саме
$Fr^*$			те саме
$\log(Re^*)$	(п. 10)		те саме
$\log(Fr^*)$			те саме
$\log(Re_i)$	(п. 13)		
$\log(Fr_i)$			
$Re_i$	(п. 14)		
$Fr_i$			
$\omega_{im}$	(1/с)		
$\varepsilon_i$	(%)		
Вид рідини – ...; $\nu = \dots \text{ м}^2/\text{с}$ ; $R = \dots \text{ м}$ ; $L = \dots \text{ м}$ ; $\kappa = \dots$			

18. Сформулювати, на основі аналізу значень розбіжностей отриманих дослідних та теоретичних значень кутових

швидкостей обертання камери при переході режимів течії  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$ , висновок щодо кількісної зміни (зниження) швидкісних меж переходу режимів усталеної течії рідкого заповнення обертової камери, які спричинено крайовим ефектом.

### **Зміст звіту про виконання лабораторної роботи 8**

1. Номер та назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Копія рис. 8.1 із позначеннями.
4. Визначення крайового ефекту руху заповнення обертової камери за с. 121 (виділено жирним шрифтом).
5. Визначення форм прояву крайового ефекту та умов посилення такого прояву за с. 121-122 (виділено жирним шрифтом).
6. Визначення довгої і короткої камери та відносної довжини камери за с. 122 (виділено жирним шрифтом).
7. Копія діаграми  $Re-Fr$  на рис. 8.3 із виконаними побудовами.
8. Заповнена табл. 8.1 за п. 17.
9. Висновок за п. 18.



## Список літератури

1. 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>
2. Науменко Ю. В., Дейнека К. Ю. Теоретичні основи робочих процесів машин барабанного типу : монографія. Рівне : НУВГП, 2014. 531 с.
3. Науменко Ю. В. Основи теорії робочих процесів барабанних млинів : монографія. Рівне : НУВГП, 2014. 336 с.
4. Науменко Ю. В. Основи теорії режимів роботи барабанних млинів : монографія. Рівне : Видавництво СПД Зелент О. І., 2009. 282 с.
5. Науменко Ю. В. Рекомендації до розрахунку, проектування та експлуатації барабанних млинів багатостадійного подрібнення. Рівне : Видавництво СПД Зелент О. І., 2009. 88 с.
6. 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>
7. 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>
8. 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>
9. 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

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МАШИНИ БАРАБАННОГО ТИПУ ДЛЯ ОБРОБКИ ЗЕРНИСТИХ (ДИСПЕРСНИХ) МАТЕРІАЛІВ

#### Область застосування

Важко назвати галузь промисловості, в якій не використовуються машини, головним робочим органом яких є горизонтальний або нахилений під невеликим кутом до горизонту обертовий барабан. Різноманітні як технологічне призначення машин барабанного типу, так і їх розміри: від грохотів, у яких реалізується суто механічний процес, до реакторів, де проводяться тепломасообмінні процеси, хімічні та біологічні перетворення, та від змішувачів з об'ємом барабана менше 1 м<sup>3</sup> до цементних печей з діаметром барабана до 7,5 м і завдовжки понад 200 м. Однак, незважаючи на таку відмінність, всі ці машини належать до одного класу. Загальними ознаками є однотипність конструкції; об'єкт переробки – дрібнодисперсний зернистий матеріал; загальні закономірності руху сипучого матеріалу. Розглянемо кілька прикладів використання машин та апаратів барабанного типу.

У технологічній схемі отримання карбаміду із сірчаним покриттям використовуються п'ять машин барабанного типу. Підігрів гранул, покриття їх плавом сірки, а потім ізолюючим шаром парафіну або воску можуть здійснюватися в одному трисекційному барабані. Враховуючи, що процеси охолодження можуть бути успішно реалізовані в барабанних грануляторах-сушарках-холодильниках відомих конструкцій, весь технологічний процес можна реалізувати в одному багатосекційному барабані, при цьому повністю відпадає необхідність використання проміжних транспортних засобів. коштів, зокрема елеваторів.

Застосовуються машини барабанного типу і при виробництві складнозмішаних добрив з використанням шламів станції нейтралізації стічних вод. Так, наприклад, при отриманні добрив на крім барабанних сушарок та грануляторів

використовуються барабани для кондиціонування, тобто. для опудрювання гранул. Машини барабанного типу широко використовуються у технологічних схемах збагачення корисних копалин.

Зі зростанням промислового та житлового будівництва значно зростає потреба в коагулянтах, призначених для водоочищення. Розроблений безперервний спосіб отримання сірнокислого алюмінію з коаліну. Випалення коаліну здійснюється в барабанній печі, а грануляція – в барабанному грануляторі-сушарці. Гранульований коагулянт за сукупністю фізико-хімічних та технологічних показників не поступається очищеному сульфату алюмінію і на відміну від негранульованого коагулянту не є гігроскопічним, не злежується та не припадає пилом.

При утилізації відходів виробництва також використовуються машини барабанного типу, наприклад барабанні сушарки та змішувачі в технологічній схемі отримання з фосфогіпсу сірки та окису кальцію, сірчаного газу та окису кальцію, сірчистого газу та портландцементу, сульфату амонію та карбонату кальцію.

Барабанні печі для прокалювання використовуються, наприклад, при виробництві вуглекислого стронцію способом відновлення целестинової руди, метафосфату алюмінію реактивної чистоти та інш.

У різних виробництвах знайшли широке застосування барабанні грохоти, наприклад, при отриманні ванадієвих каталізаторів, при розсіві гранул полістиролу, який необхідний для виготовлення точних відливок у магнітних формах тощо. У біотехнології виробництва ферментів, настоянок культури тканини та продуктів гідролізу широко використовуються барабанні екстрактори. У технологічній схемі переробки побутових відходів застосовуються біотермічний барабан, барабанний грохот, барабанна сушарка, барабанна піч піролізу. У порошковій металургії, наприклад при виробництві порошкових дротів, знайшли застосування барабанні змішувачі.

Використовуються барабани в харчовій промисловості, наприклад при солодуванні зерна, сільському господарстві для класифікації та сушіння.

Нові перспективи широкого застосування машин барабанного типу відкриваються у зв'язку з розробкою нової технології гранулювання методом обкочування ультрадисперсних порошків при додаванні водорозчинних полімерів, а також під час виробництва наноматеріалів.

### Класифікація машин барабанного типу

Перш ніж приступити до класифікації машин барабанного типу, розглянемо загальну схему цих машин, виділивши функціональні системи (рис. 1), характерні будь-якої машини.

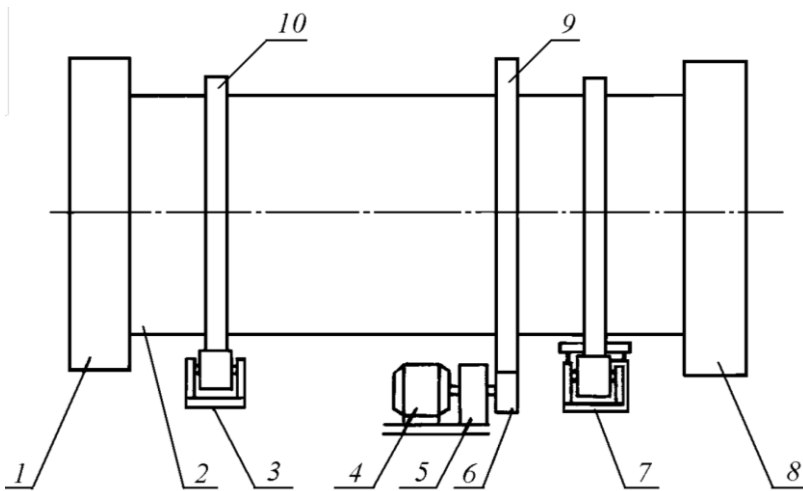


Рис. 1. Схема машини барабанного типу

1. Корпус. Це основна несуча конструкція машини, закріплена на фундаменті або встановлена іншим способом. Корпус є циліндричним барабаном 2 (рис. 1). Барабан забезпечений бандажми 10, що передають навантаження від ваги барабана, заповненого матеріалом, на ролики опорної 3 і опорно-упорної станції 7. На опорно-упорній станції є пристрої, наприклад упорні ролики, щоб запобігти осьовому переміщенню



барабана. Число опорних і опорно-упорних станцій залежить, в основному, від розмірів барабана.

2. Пристрої для подачі та відведення основних та допоміжних матеріалів. У машинах барабанного типу зазвичай використовуються дві камери для завантаження 1 і вивантаження матеріалу 8 (рис. 1), а також для підведення та відведення газу. У грануляторах і реакторах є також пристрої для подачі зав'язуючої рідини, газоподібних та рідких агентів. Іноді замість камер встановлюють так звані голівки, що являють собою рухомі камери, що притискаються до барабана. Місця з'єднань обертового барабана з нерухомими камерами або головками ущільнюються спеціальними пристроями.

3. Виконавчі механізми. Робочі органи цих механізмів виконують необхідні для реалізації заданого технологічного процесу кінематичні та силові функції, виконуючи корисну роботу. В машинах барабанного типу роль виконавчих механізмів грають різні внутрішні пристрої (лопати, шнеки тощо).

4. Привод машини включає двигуни та передавальні механізми. Найчастіше барабан приводиться у обертання від електродвигуна 4 через редуктор 5, шестерню 6, що сидить на вихідному валу редуктора, та вінцеве колесо 9, яке укріплено на барабані 2 (рис. 1). Електродвигун, редуктор та шестерня утворюють приводну станцію. Барабан може також приводитися у обертання за допомогою потужної ланцюгової передачі, фрикційної та інш.

5. Система обігріву або охолодження робочих зон машин. Ця система може являти собою вузли подачі та відведення газоподібного теплоносія, а при кондуктивному обігріві – камери, установлені зі зовнішнього боку барабана 2, нагрівальні плити, змонтовані всередині барабана, та інші.

6. Система контролю технологічних параметрів та управління машиною. Найчастіше як контрольованих і змінних параметрів використовують температури матеріалу і газу, тиск газу.

7. Система та пристрої для мащення. У машинах барабанного типу вони встановлені у приводі, опорних та опорно-упорних станціях.

Машини барабанного типу зазвичай класифікують за видом технологічних процесів, конструктивним особливостям, неперервності або періодичності роботи, способу тепло- та масопереносу. У технічній літературі машини барабанного типу зазвичай розглядаються як один з типів обладнання, що застосовується в конкретній галузі промисловості, або як пристрій для реалізації певного процесу, наприклад, гранулювання. Такий вузький підхід до машин барабанного типу не дозволив створити єдину класифікацію, яка необхідна для розробки загальних методик їх розрахунку і могла бути використана для синтезу нових конструкцій, наприклад, методом морфологічного ящика.

Видається доцільним використовувати таку класифікацію машин барабанного типу

1. За наявності внутрішніх пристроїв барабана та кутової швидкості його обертання: барабани, що повільно обертаються, без внутрішніх пристроїв (обертові печі, охолоджувальні барабани тощо), барабани, що швидко обертаються, без внутрішніх пристроїв (гранулятори, змішувачі та інш.); повільно обертові барабани з внутрішніми пристроями (сушарки, гранулятори-сушарки, дозатори тощо).

2. За видом внутрішніх пристроїв: жорстко з'єднані з барабаном (лопати, сектори, штирі тощо), рухомо з'єднані з барабаном (лопати, квоши, ланцюги тощо), нерухомі, не з'єднані з барабаном (плити, скребки тощо), рухомі, не з'єднані з барабаном (роторні лопатки, шнеки тощо), рухома насадка (кулі, хрести, стрижні тощо).

3. За схемою руху матеріалу та за кількістю барабанів: одноходові та багатоходові.

4. За приводом: зі зубчастою, ланцюговою, фрикційною, пасовою передачею, із фрикційною через опорні ролики.

5. За конструкцією вузлів завантаження та вивантаження: з камерами, з відкатними головками.

6. За кількістю опорних станцій: двоопорні та багатоопорні.

7. За способом кріплення упорних роликів: з нерухомим упорним роликом, з рухомих упорних роликів та нерухомим

гідроциліндром, з рухливими наполегливими роликами та гідроциліндром із закріпленим штоком.

8. За кількістю опорних роликів: з одинарними опорними роликами, з подвійними опорними роликами.

9. За способом кріплення вінцевого колеса до барабана: жорстке кріплення, кріплення тангенціальними пружинами, кріплення аксіальними пружинами.

10. За способом кріплення бандажа: вільно одягнений бандаж, кріплення бандажа на опорних компенсаторах, жорстке кріплення бандажа до барабана.

11. За напрямом руху зернистого матеріалу та обробного рідкого або газоподібного агенту: прямотокові, протитокові, з поперечною подачею обробного агенту, комбіновані.

12. За типом установки: стаціонарні та пересувні.

13. За технологічним призначенням: обертові печі, сушильні барабани, сушильні парові циліндри, охолодники, гранулятори, грудкоутворювачі, дражиратори, змішувачі, гідратори, кристалізатори, розчинники, запарники, вакуум-фільтри, важкосередовищні сепаратори класифікатори, мийки, скрубери, галтувальні машини, екстрактори, фізико-хімічні реактори, біотермічні барабани, обертові транспортуючі труби, обертові теплові труби, живильники, дозатори, віскозіметри, реометри, барабанні млини, центрифуги, відцентрово-ливарні машини, центрифуги, автоматичні зрівноважуючі пристрої, рушії самохідних транспортних засобів.

14. За агрегатним станом обробних агентів: тверде + тверде, тверде + рідке, тверде + газоподібне, тверде + рідке + газоподібне.

Слід зазначити, що наведена класифікація не є детальною, оскільки, наприклад, для внутрішніх пристроїв, жорстко з'єднаних з барабаном, відомі десятки різних конструкцій, що враховують специфіку процесу, який реалізується в барабані.

Якщо прийняти перші дванадцять ознак за осі морфологічного ящика, можна одержати мільйони варіантів поєднань різних елементів. Реально корисна кількість аналізованих варіантів, звісно, є значно меншою. Перш ніж аналізувати поєднання вузлів, що розкриваються мор-

фологічним ящиком, необхідно в залежності від заданих конкретних умов скоротити до мінімуму кількість аналізованих вузлів тотожного призначення, тобто тих, що відносяться до однієї осі, і тоді число варіантів можна скоротити до кількох сотень, а в окремих випадках до десятків.

Останні дві ознаки класифікації не враховуються, оскільки не містять нових конструктивних ознак, а лише конкретизують вибір вузлів машини в цілому з урахуванням процесу, що реалізується в барабані, та агрегатного стану обробних агентів. Саме ці ознаки дозволяють істотно скоротити кількість розглядуваних варіантів. Морфологічний аналіз може привести до створення нових раціональних конструкцій, і це не суперечить завданням уніфікації щодо двох причин. По-перше, уніфікація дає найбільший ефект, коли в її основу закладено найбільш прогресивні варіанти рішення, а щоб їх знайти, необхідно проаналізувати всі відомі множини рішень. По-друге, враховуючи різноманітність процесів, що реалізуються в барабанах, доцільним є не тільки уніфікація машини в цілому, а й уніфікація окремих елементів конструкцій, наприклад опорних станцій, що дозволить у барабанів різного технологічного призначення використовувати одні й ті ж самі опорні станції. Найвищим рівнем уніфікації в цьому сенсі є модульна конструкція машини барабанного типу.

### **Зернисті (дисперсні) матеріали як об'єкт обробки в машинах барабанного типу**

Під зернистим матеріалом мається на увазі дисперсна система, що складається з твердих частинок довільної форми, що перебувають у контакті. Залежно від діаметра  $d$  частинок зернистий матеріал може бути у таких станах: пилоподібному ( $d < 0,05$  мм), порошкоподібному ( $0,05$  мм  $< d < 0,5$  мм), дрібнозернистому ( $0,5$  мм  $< d < 2$  мм), крупнозернистому ( $2$  мм  $< d < 10$  мм), кусковому ( $d > 10$  мм).

Фізико-механічні властивості зернистого матеріалу, що визначають його динамічну поведінку та структуроутворення, вивчені поки слабо і немає єдиної думки, які з властивостей треба регламентувати та враховувати при описі руху такого матеріалу.

Вважається, що розмір і форма частинок є найбільш фундаментальними характеристиками зернистого матеріалу, і вони відносяться до так званих первинних властивостей. Гранулометричний або дисперсний склад зернистого матеріалу – характеристика, що показує, яку частку або відсоток за масою, обсягом, поверхнею або кількістю частинок складають певні частинки або групи частинок у всій масі аналізованої проби. Гранулометричний склад визначають за стандартною методикою. Для експериментального визначення гранулометричного складу зернистих матеріалів використовуються різні методи та відповідні їм прилади.

До фізичних властивостей зернистих матеріалів, що найчастіше використовуються на практиці, відносять вологість, гігроскопічність, густину, насипну густину, температури плавлення і займання, вибухо- та пожежонебезпека тощо. Способи визначення фізико-механічних властивостей описані у технічній літературі.

Як характеристики другого порядку зазвичай використовують кути природного укосу, обрушення, тертя, ковзання, тертя об поверхню, межу текучості, початковий опір зсуву, модуль деформації, коефіцієнт Пуассона, стеження тощо. Способи визначення цих характеристик та приладове оформлення стандартизовані. Особливий інтерес становить взаємозв'язок між параметрами зернистих матеріалів та їх поведінкою.

Вибір характеристик другого порядку, які будуть використані при описі руху зернистого матеріалу, залежить від специфіки цього руху, а також від застосовуваних математичних моделей. Для опису поведінки зернистого матеріалу в обертовому барабані використовуються кути і коефіцієнти тертя руху та спокою.

Коефіцієнти тертя руху та спокою зернистого матеріалу є комплексними величинами, що характеризують властивості частинок, включаючи вплив зіткнень між окремими частинками в процесі їхнього руху. Чисельно коефіцієнт тертя руху дорівнює тангенсу кута нахилу відкритої поверхні зернистого матеріалу до горизонту, при якому відбувається перехід частинок зернистого

матеріалу від стану руху до стану спокою, а коефіцієнт тертя спокою – тангенсу кута, за якого відбувається перехід від спокою до руху.

Куту тертя руху та спокою зернистих матеріалів можуть бути визначені за допомогою барабанного реометра (рис. 2), що містить барабана 1 з прозорим торцем 7. На внутрішній поверхні обичайки барабана встановлена лопать 4, причому її вільний край збігається з віссю обертання барабана, яке здійснюється приводом 8. Зернистий матеріал завантажується в барабан через люк 2 з кришкою. Співвісно з барабаном встановлена кутова шкала 5, а на прозорій торцевій стінці 7 є рухомий прапорець 3. Барабан, привід та кутова шкала змонтовані на підставі 6.

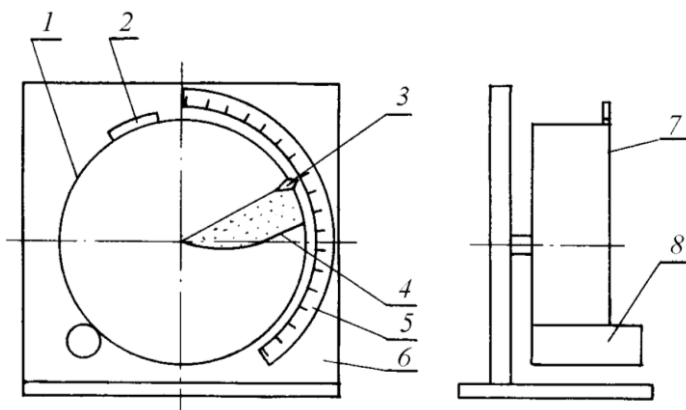


Рис. 2. Схема пристрою для визначення кутів тертя спокою та руху в барабанному реометрі

Послідовність визначення кутів така. Порцію досліджуваного матеріалу засипають у барабан через люк 2. За допомогою приводу барабан приводиться в обертання. При обертанні барабана матеріал потрапляє на увігнуту лопату, піднімається вгору і при певному положенні лопати зсипається з неї. Після початку зсипання припиняють обертання барабана і, дочекавшись, коли зсипання закінчиться, сумістивши рухомий прапорець з відкритою поверхнею матеріалу, що знаходиться на лопаті, за шкалою 5 визначають кут нахилу цієї поверхні до

горизонту. Як зазначалося вище, тангенс цього кута є коефіцієнтом тертя руху. Барабан повторно приводять у обертання, яке припиняють, як тільки матеріал почне зсипатися з лопаті. За положенням прапорця визначають кут тертя спокою і потім коефіцієнт тертя спокою.