

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»



**Витвицький В. М.
Сокольський О. Л.
Мікульонок І. О.**

**МЕХАНІЧНІ І ГІДРОМЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ
ТА ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА
ПОЛІМЕРНИХ І БУДІВЕЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ**

Лабораторний практикум

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за спеціальностями 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2025

УДК [691+678]:[66.021.1+66.022.5]-026.76(075.8)
В54

Рецензент: Степанюк А. Р., канд. техн. наук, доц., зав. кафедри МАХНВ

Відповідальний редактор Карвацький А. Я., д-р техн. наук, проф., с.н.с.

*Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 10.04.2025 р.)
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету (протокол № 3 від 24.03.2025 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

*Витвицький Віктор Миронович, д-р філос.
Сокольський Олександр Леонідович, д-р техн. наук, доц.
Мікульонок Ігор Олегович, д-р техн. наук, проф., с.н.с.*

МЕХАНІЧНІ І ГІДРОМЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІМЕРНИХ І БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ Лабораторний практикум

Механічні і гідромеханічні процеси та обладнання виробництва полімерних і будівельних матеріалів і виробів. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальностями 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування // В. М. Витвицький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,18 Мбайт). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 42 с.: іл. – Бібліогр.: с. 39.

Призначення лабораторного практикуму – закріпити та поглибити теоретичний програмний матеріал, оволодіти практичними навичками роботи в лабораторії механічного та гідромеханічного обладнання шляхом самостійного проведення експериментальних досліджень на обладнанні виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів.

Практикум містить опис п'яти лабораторних робіт. Кожній роботі передують коротка теоретична частина, яка знайомить студентів з поняттями, використовуваними в роботі, короткими теоретичними відомостями щодо об'єкта й методів дослідження. Для кожної роботи сформульовано мету, наведено методику проведення досліджень та наявності експериментальної установки її опис та принцип роботи. Далі наведено опис прийомів, які використовуються для виконання конкретних завдань.

Для якісного виконання роботи й самоконтролю студентів наприкінці кожної лабораторної роботи запропоновано контрольні питання. Залежно від робочої програми відповідної навчальної дисципліни, оснащення лабораторії, наявності необхідних матеріалів викладач може змінювати відповідні теми, роботи і завдання.

Наприкінці посібника наведено перелік рекомендованих навчально-методичних матеріалів.

© В. М. Витвицький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок, 2025
© КПП ім. Ігоря Сікорського (ІХФ), 2025

ВСТУП

Навчальні дисципліни «Механічні процеси і обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів» та «Гідромеханічні процеси і обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів» вивчають студенти інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», які здобувають вищу освіту за спеціальностями 131 Прикладна механіка та 133 Галузеве машинобудування. У процесі навчання студенти прослуховують курс лекцій, а також виконують практичні та лабораторні роботи.

Мета вивчення навчальної дисципліни – сформувати у студентів комплекс знань щодо основних механічних та гідромеханічних процесів, а також навчитись робити обґрунтований вибір обладнання для реалізації механічних та гідромеханічних процесів та виконувати їх розрахунки.

Лабораторний практикум складається з п'яти робіт, а саме:

- лабораторна робота № 1: Дослідження гранулометричного складу матеріалу методом ситового аналізу;
- лабораторна робота № 2: Дослідження процесу подрібнення в бігунах;
- лабораторна робота № 3: Дослідження процесу подрібнення в кульовому млині;
- лабораторна робота № 4: Дослідження процесу перемішування сипких матеріалів у лопатевому змішувачі;
- лабораторна робота № 5: Дослідження параметрів процесу перемішування в'язких рідин в апараті з роторною мішалкою.

Відповідно до кожної з наведених робіт студенти мають виконати експериментальні дослідження, обробити одержані результати досліджень, зробити висновки з проведених досліджень, після чого захистити їхні результати. Захист лабораторної роботи полягає в наданні оформленого згідно з вимогами протоколу викладачеві та співбесіді з ним, під час якої студент має продемонструвати набуті ним теоретичні й практичні знання, а також відповідні уміння й навички.

Студенти виконують лабораторні роботи самостійно або у складі бригади (за вказівкою викладача). Захист лабораторних робіт та їх оцінювання відбувається виключно індивідуально під час співбесіди з викладачем.

ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ

Основні позначення

A	коефіцієнт пропорційності;
b	показник степеня;
D	середній розмір залишку на ситі, мм; розмір сита, м; діаметр котка, м;
$D_{\text{серед}}$	середньозважений розмір насипного матеріалу, мм;
$D_{\text{сзв}}$	середньозважене значення розмірів частинок матеріалу перед подрібненням, мм;
$D_{\text{ч}}$	діаметр чаші, м;
$d_{\text{сзв}}$	середньозважене значення розмірів частинок матеріалу після подрібнення, мм;
f	коефіцієнт тертя;
i	ступінь подрібнення матеріалу;
K	кількість катків;
K_c	коефіцієнт неоднорідності, %;
k	коефіцієнт подрібнення;
L	довжина лопатей, мм;
$M_{\text{к}}$	маса котка, кг;
N	кількість частинок; потужність, Вт;
n	частота обертання, об/с;
q	залишок матеріалу на ситі, г;
R_0	середній радіус кочення котків по чаші, м;
S_{v}	площа поверхні контакту матеріалу в одиниці об'єму, мм ² ;
U	питома витрата енергії, Вт · м ³ / год;
V	об'єм барабана, м ³ ;
α	кут нахилу апроксимуючої прямої, ...°; кут захоплення, ...°; кут установлення лопатей, ...°;
δ	похибка, %;
η	коефіцієнт корисної дії;
μ	коефіцієнт тертя кочення, м;
π	число пі;
ρ	густина, кг/м ³ ;
τ	час, с;
φ	кут тертя, ...°; коефіцієнт заповнення;
P_{v}	об'ємна продуктивність, м ³ /год;

Основні індекси

max	—	стосується максимального значення;
min	—	стосується мінімального значення;
v	—	стосується об'ємного значення;
дв	—	стосується двигуна;
кр	—	стосується критичного значення
мат	—	стосується матеріалу;
пит	—	стосується питомого значення;
розр	—	стосується розрахункового значення;
рх	—	робочий хід;
т	—	стосується теоретичного значення;
		стосується подрібнювальних тіл;
ф	—	стосується фактичного значення;
хх	—	холостий хід.

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБОТИ В ЛАБОРАТОРІЯХ МЕХАНІЧНОГО ТА ГІДРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

До початку виконання роботи студент зобов'язаний вивчити правила техніки безпеки й безпечні методи роботи в лабораторіях механічного та гідромеханічного обладнання. За результатами вивчення правил техніки безпеки та проходження інструктажу з безпечних методів роботи студент розписується в журналі з техніки безпеки. Відповідальність за це несе керівник лабораторії. Студенти, що не вивчили правила техніки безпеки і не пройшли інструктаж, до виконання лабораторних робіт не допускаються.

Студент (або бригада – група студентів) виконує тільки ту роботу, яка призначена викладачем, а під час виконання роботи користується тільки тими засобами (обладнанням, приладами тощо), які знаходяться на відповідному робочому місці та наведені в описі роботи.

Правила безпеки під час перебування в лабораторії

1. Під час роботи в лабораторії дотримуйтесь чистоти, порядку і правил техніки безпеки, оскільки безладність, поспішність або неохайність у роботі часто призводять до нещасних випадків з тяжкими наслідками.

2. У лабораторії забороняється пити воду, приймати їжу, курити.

3. Усі матеріали для проведення роботи потрібно зберігати тільки у відповідно призначеному місці.

4. Студентам забороняється приступати до роботи, не погодивши плану проведення роботи з викладачем.

5. Після закінчення користування лабораторною установкою потрібно негайно відключити електроприлади, повністю їх знеструмити, а також прибрати робоче місце. Йдучи з лабораторії, потрібно перевірити закінчення всіх виробничих процесів.

6. Особи, що порушують правила безпеки, до проведення роботи не допускаються або відстороняються від її подальшого виконання.

Перша допомога в разі травмування учасника освітнього процесу

Основні заходи першої допомоги в разі травмування:

– у разі враження електричним струмом – знеструмити постраждалого (при цьому не забувати про власну безпеку!);

– у разі отримання електричних опіків і ран – накласти стерильні пов'язки;

– у разі раптової зупинки серця – нанести прекардіальний удар по грудині постраждалого, приступити до реанімаційних дій і проводити їх до прибуття бригади швидкої (екстреної) медичної допомоги;

– у разі кровотечі – накласти кровоспинний джгут (турнікет) і стерильну пов'язку;

– у разі перелому кісток кінцівок – накласти шини (можна використати будь-які підручні засоби).

У разі різкого погіршення стану здоров'я людини потрібно негайно викликати швидку (екстрену) медичну допомогу за телефоном 103.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ПРОТОКОЛУ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Перед оформленням першого протоколу потрібно ознайомитися з ДСТУ 3008:2015 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання».

Протоколи лабораторних робіт оформлюють від руки або друкують на листах формату А4 (210×297 мм), використовуючи при цьому шрифт Times New Roman розміром 14 пунктів і міжрядковим інтервалом 1,5. В окремих випадках з дозволу викладача зазначені параметри можна змінювати.

Протокол кожної роботи складається з її назви, мети, теоретичних відомостей, опису методики проведення досліджень (в обсязі, який надає змогу успішно виконати всі необхідні завдання), а також переліку запитань для самоконтролю.

Далі наводять результати лабораторної роботи: результати вимірювань, схеми, необхідні розрахунки, одержані результати, таблиці, графіки, діаграми (за потреби). Закінчується протокол загальним висновком, у якому наводять отримані та усвідомлені студентом у результаті виконання лабораторної роботи результати, а також набуті ним нові вміння й навички.

Після завершення лабораторної роботи оформлений протокол надається викладачу для перевірки.

Під час оцінювання враховується:

- правильність оформлення та структури протоколу лабораторної роботи;
- послідовність, якість і точність виконання всіх етапів у ході лабораторної роботи, знання та розуміння її методики;
- знання теоретичних основ, що стосуються конкретної лабораторної роботи;
- використання під час виконання роботи не лише наведеного переліку рекомендованої літератури, а й інших джерел інформації, насамперед з мережі Інтернет, що сприяють кращому засвоєнню відповідного матеріалу.

Під час виконання лабораторних робіт потрібно бути уважним і акуратним. Незначні неточності або недотримання методики можуть спричинити незадовільний результат і потребу в повторному виконанні роботи.

1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ МАТЕРІАЛУ МЕТОДОМ СИТОВОГО АНАЛІЗУ

Мета роботи: вивчити один з основних методів визначення гранулометричного складу насипних матеріалів – ситовий аналіз, а також вплив процесів подрібнення й грохочення на гранулометричний склад сипкого матеріалу.

Основні теоретичні положення

Значний обсяг полімерних і будівельних матеріалів надходить на перероблення у сипкому стані. Масову частку фракції матеріалу, розміри якого менші від заданого значення x , можна обчислити за степеневим законом

$$Y = Ax^b, \quad (1.1)$$

де A , b – коефіцієнт і показник степеня, які визначають експериментально.

Площа поверхні контакту матеріалу в одиниці об'єму

$$S_v = \int_{x_1}^{x_2} \frac{6y'dx}{\rho x}, \quad (1.2)$$

де x_1, x_2 – мінімальний і максимальний розміри n -ї фракції; ρ – об'ємна маса матеріалу, y' – похідна від (1.1).

Кількість частинок в n -й фракції.

$$N = \int_{x_1}^{x_2} \frac{y'dx}{\rho x^3}. \quad (1.3)$$

Середньозважений розмір насипного матеріалу

$$D_{\text{серед}} = \frac{D_1K_1 + D_2K_2 + D_3K_3 + \dots + D_nK_n}{K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n}, \quad (1.4)$$

де D_i – середній розмір частинок i -го залишку на ситі, м; K_i – масова частка i -го залишку на ситі, $i = \overline{1, n}$.

Середній розмір залишку на ситі визначають як середнє арифметичне розмірів мінімальної й максимальної частинок

$$D_n = \frac{D_n^{\min} + D_n^{\max}}{2}. \quad (1.5)$$

Для верхнього сита середній розмір залишку визначають як середнє арифметичне між розміром його отворів і середнім початковим розміром часток (беремо 7 мм). Для залишку, який просипався крізь усі сита, середній розмір залишку беремо як розмір нижнього сита, поділений навпіл.

У результаті просіюванні матеріалу крізь декілька послідовно розташованих сит середній розмір фракції можна визначити як середньоарифметичне між двома ситами – більшим і меншим, між якими знаходиться фракція.

Параметр Y для залишку дорівнює його масовій частці, для нижнього сита – його масовій частці, збільшеній на масову частку залишку, для наступного з низу сита – залишку на ньому, збільшеному на попередні значення і т. д.

Параметр X дорівнює значенням D_n .

Опис лабораторної установки

Лабораторна робота виконується за допомогою набору сит (рис. 1.1) з розмірами комірок, визначеними викладачем.



Рис. 1.1. Комплект сит для проведення дослідження (умовне зображення)

Порядок виконання роботи

Набір сит складають у пакет з поступовим зменшенням отворів сит зверху донизу. У нижній частині пакету встановлюють суцільний піддон (без отворів).

Наважку масою 100 г одержаного на дробильній установці матеріалу насипають на пакет сит, після чого пакет сит разом з наважкою піддають рівномірному струшуванню, таким чином виконуючи розсіювання сипкого матеріалу на фракції за розміром частинок (час струшування пакету сит визначає викладач).

Після закінчення розсіювання пакет обережно розбирають, унеможливаючи висипання матеріалу із сит. Залишки на ситах зважують. Залишок після усіх сит не зважують, його масу визначають як масу наважки, зменшеної на суму залишків на усіх ситах. Середня частка фракції M – це величина залишку на кожному ситі, поділена на масу наважки.

Результати просіювання і зважування зводять до табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Результати проведення експериментальних досліджень

Номер сита, 10^{-3} м	Номер досліду, маса залишку на ситі						Середня частка фракції M	Параметр Y	Параметр X
	1	2	3	4	5	Середнє значення			
$D_4 = 0,50$									
$D_3 = 0,35$									
$D_2 = 0,25$									
$D_1 = 0,18$									
Залишок									

Порядок оброблення результатів

Результати обробляють у такій послідовності.

1. Значення коефіцієнтів A і b з табл. 1.1 і рівняння (1.1). Для цього потрібно побудувати графік залежності

$$\lg Y = \lg A + b \cdot \lg x \quad (1.6)$$

в координатах $\lg Y = f(\lg x)$ і провести між значеннями точок графіка апроксимуючу пряму.

2. Визначити з графіка показник степеня b як тангенс кута нахилу α одержаної апроксимуючої прямої до осі абсцис

$$b = \operatorname{tg} \alpha .$$

3. Обравши будь-яку точку на апроксимуючій прямій, визначити коефіцієнт A двома методами: за формулою (1.1) і за формулою (1.6), значення мають бути однаковими.

4. Виконати розрахунки за формулами (1.2)–(1.5), при цьому значення N і S_v розрахувати для заданої викладачем фракції між x_i та x_{i+1} .

За результатами розрахунків зробити висновки з проведеної лабораторної роботи.

Запитання для самоконтролю

1. Проаналізуйте методи проведення аналізу гранулометричного складу сипкого матеріалу.

2. Порівняйте диференціальну та інтегральну криві функції розподілу розмірів часток матеріалу.

3. Поясніть, що таке питома поверхня насипного матеріалу? Як вона визначається?

4. Проаналізуйте методику проведення ситового аналізу.

5. Проаналізуйте методику визначення інтегральної функції розподілу часток матеріалу за розмірами.

2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ В БІГУНАХ

Мета роботи: вивчити конструкцію та принцип роботи бігунів, експериментально дослідити параметри процесу подрібнення.

Основні теоретичні положення

У хімічній промисловості бігуни застосовують як для дрібного дроблення (кінцевий розмір частинок 3...8 мм), так і грубого подрібнення (розмір частинок продукту 0,2...0,5 мм).

У бігунах оброблюваний матеріал багаторазово потрапляє під котки й руйнується роздавлюванням і стиранням. Найбільший розмір захоплюваних грудок матеріалу залежить від діаметра котків.

Основні параметри, що характеризують процес дроблення й подрібнення матеріалів на бігунах: кут захоплення, ступінь подрібнення, частота обертання котків, продуктивність і споживана потужність.

Для визначення кута захоплення розглянемо рис. 2.1. На грудку матеріалу діють сили тиску котка P , тертя матеріалу по котку Pf і тертя матеріалу по чаші P_1f .

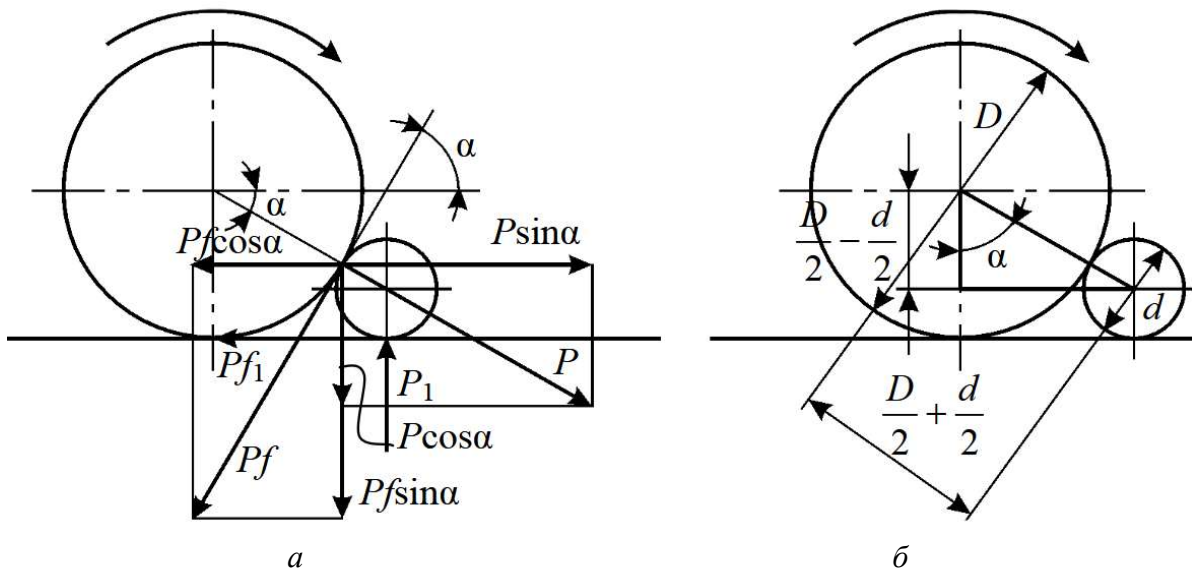


Рис. 2.1. Схема для визначення кута захоплення: *а* – діючі сили; *б* – розміри елементів; α – кут захоплення; f – коефіцієнт тертя подрібнюваного матеріалу по металу; D – діаметр котка, м; d – розмір грудки розроблюваного матеріалу, м

Розглянемо суму проекцій сил на осі:

$$\begin{aligned}\sum y &= P_1 - P \cos \alpha - fP \sin \alpha = 0, \\ \sum x &= fP_1 - fP \cos \alpha + P \sin \alpha = 0.\end{aligned}\tag{2.1}$$

Розв'язуючи систему (2.1) відносно $\operatorname{tg} \alpha$, дістанемо

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{2f}{1-f^2},$$

звідки

$$\alpha < 2\varphi,\tag{2.2}$$

де φ – кут тертя, $\varphi = \operatorname{arctg} f$.

Співвідношення (2.2) буде теоретичною обов'язковою умовою перебігу процесу подрібнення на бігунах.

Співвідношення між діаметром котка й максимально допустимим розміром подрібнюваної грудки можна визначити так (рис. 2.1)

$$\frac{D+d}{2} \cos \alpha = \frac{D-d}{2},$$

звідки

$$\frac{D}{d} = \frac{1 + \cos \alpha}{1 - \cos \alpha},\tag{2.3}$$

З формули (2.3) визначається значення кута захоплення α , потім з (2.2) кут тертя φ , звідки коефіцієнт тертя $f = \operatorname{tg} \varphi$.

Ступінь подрібнення матеріалу

$$i = \frac{D_{\text{сзв}}}{d_{\text{сзв}}},\tag{2.4}$$

де $D_{\text{сзв}}$, $d_{\text{сзв}}$ – середньозважене значення розмірів частинок матеріалу відповідно перед подрібненням і після нього.

Об'ємну теоретичну продуктивність бігунів сухого подрібнення розраховують за емпіричною залежністю, $\text{м}^3/\text{год}$

$$\Pi_V = 2,15 \frac{M_{\text{к}} D_{\text{ч}} n_{\text{розр}}}{\rho_{\text{мат}}},\tag{2.5}$$

де $M_{\text{к}}$ – маса котка, кг; $D_{\text{ч}}$ – діаметр чаші, м; $\rho_{\text{мат}}$ – густина подрібнюваного матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$, $n_{\text{розр}}$ – частота обертання вертикального вала для твердих порід

$$n_{\text{розр}} \leq \frac{1}{2\pi} \sqrt{g \frac{f}{R_0}},$$

де R_0 – середній радіус кочення котків по чаші, м.

Повна теоретична потужність приводу бігунів, Вт

$$N_{\text{т}} = \frac{\pi M_{\text{к}} g K n_{\text{розр}}}{2\eta} \left(\frac{4\mu R_0}{D_{\text{к}}} + \frac{B_{\text{к}} f}{2} \right), \quad (2.6)$$

де μ – коефіцієнт тертя кочення, $\mu = 1,10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-2}$ м; K – кількість котків;
 η – ККД приводу $\eta = 0,8$; $B_{\text{к}}$ – ширина котка, м.

Опис лабораторної установки

Схему лабораторної установки наведено на рис. 2.2. Бігуни сухого подрібнення складаються з приводу, який складається з електродвигуна 1 та черв'ячного редуктора 2, з'єднаних муфтою 3, від якого обертальний момент передається на вертикальний вал 4, до якого за допомогою стакана 5 і траверси 6 кріплять колінчасті осі 7 з насадженими на них котками 8 і 9. Під час обертання вала 4 котки 8 і 9 обкочуються по нерухомому споду чаші 10.

Матеріал, що перебуває на верхній поверхні чаші 10, надходить під рухомий коток і під дією сили тяжіння котка руйнується. У разі потрапляння у зону подрібнення стороннього високоміцного матеріалу коток перекочуються через нього за рахунок обертання колінчастої осі 7 навколо осі траверси 6.

До стакана 5 жорстко кріплять два скребки: ближній, що призначений для подавання матеріалу під котки, і дальній – для вивантаження подрібненого матеріалу з бігунів.

Потужність, споживану в процесі подрібнення, вимірюють електронним ватметром 11. Для обчислення повної потужності значення по кожній фазі складаються.

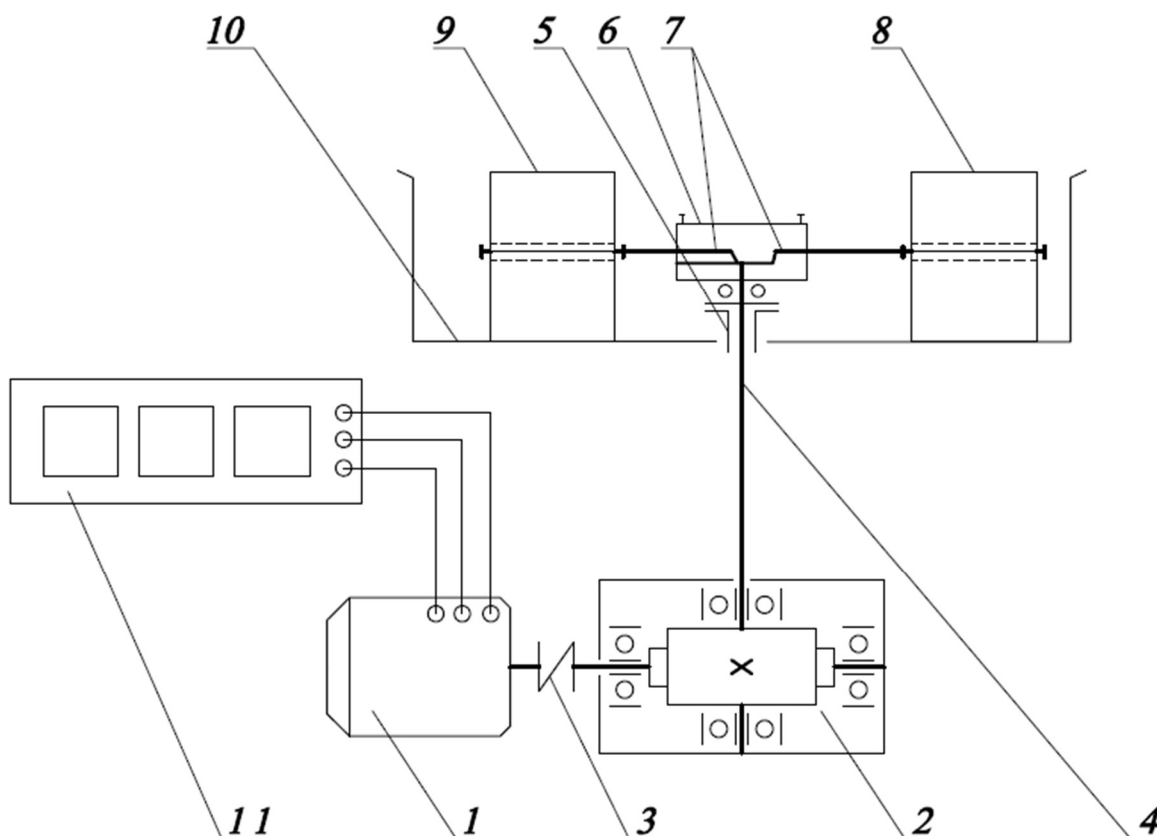


Рис. 2.2. Схема лабораторних бігунів сухого подрібнення: 1 – електродвигун; 2 – черв'ячний редуктор; 3 – муфта; 4 – вертикальний вал; 5 – стакан; 6 – траверса; 7 – колінчасті осі; 8, 9 – котки; 10 – чаша; 11 – електронний ватметр

Порядок виконання роботи

Виміряти основні геометричні розміри робочих органів бігунів. Увімкнути привод бігунів і за секундоміром визначити частоту обертання вертикального вала.

Виміряти потужність холостого ходу N_{xx} . Закласти під коток циліндрик матеріалу, що підлягає подрібненню, найменшого діаметра і увімкнути бігуни. Вимкнути бігуни й повторити те саме для циліндриків матеріалу різного діаметра. Найбільший діаметр циліндра, захоплюваного котками, беруть як розрахунковий для визначення кута захоплення.

Підготувати наважку матеріалу масою 1,5 кг для подрібнення й рівномірно розподілити її на верхній поверхні чаші. Увімкнути установку, виміряти потужність робочого ходу N_{px} . Після 3 хв роботи зупинити бігуни і взяти пробу подрібненого матеріалу масою 100 г для ситового аналізу. Перевірити ситовий аналіз на наборі сит № 0,18, 0,25; 0,35; 0,50.

Матеріал повернути в бігуни. Ситовий аналіз повторити через 6, 9 і 12 хв роботи бігунів.

Досліди повторити для наважок 1,0 і 0,5 кг.

Результати експериментів занести до табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Результати проведення експериментальних досліджень

Маса завантаження, кг	Номер сита	Залишок на ситі, г			
		Після 3 хв	Після 6 хв	Після 9 хв	Після 12 хв
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
0,5	0,50				
	0,35				
	0,25				
	0,18				
	Залишок				
Потужність робочого ходу, Вт					
1,0	0,50				
	0,35				
	0,25				
	0,18				
	Залишок				
Потужність робочого ходу, Вт					
1,5	0,50				
	0,35				
	0,25				
	0,18				
	Залишок				
Потужність робочого ходу, Вт					

Порядок оброблення результатів

Результати обробляють у такій послідовності.

1. На основі результатів ситового аналізу середньозважене значення розміру подрібненого матеріалу після кожного інтервалу часу

$$d_{\text{сзв}} = \frac{q_1 D_{\text{серед}_1} + q_2 D_{\text{серед}_2} + \dots + q_i D_{\text{серед}_i}}{100},$$

де q_i – залишок матеріалу на i -му ситі, г; $D_{\text{серед}_i}$ – середній розмір фракції на i -му ситі, мм

$$D_{\text{серед}_i} = \frac{D_i + D_{i+1}}{2},$$

де D_i та D_{i+1} – розмір отвору у двох послідовно розташованих ситах, мм.

2. Ступінь подрібнення за залежністю (2.4);

3. Фактичну потужність, що витрачається на процес подрібнення

$$N_{\phi} = N_{\text{рх}} - N_{\text{хх}}.$$

4. Фактичну продуктивність бігунів, м³/год

$$\Pi_{\text{вф}} = \frac{60m_i}{\tau \rho_{\text{мат}}},$$

де m_i – маса завантаження, кг; τ – час подрібнення до заданого розміру, хв;

5. Теоретичну продуктивність бігунів за залежністю (2.5);

6. Теоретичну потужність бігунів за залежністю (2.6);

7. Питома витрата енергії на подрібнення матеріалу, Вт · м³ / год

$$U_{\phi_i} = \frac{N_{\phi i}}{\Pi_{\text{вф}_i}}.$$

Результати розрахунків занести до табл. 2.2.

Побудувати граничні залежності $i = f(\tau)$, $N_{\phi} = f(\tau)$ для різної маси завантаження і $N_{\phi} = f(m_i)$ для різного часу подрібнення.

Таблиця 2.2. Результати розрахунків

Маса завантаження m_i , кг	Параметр	Час подрібнення τ , хв			
		3	6	9	12
	$d_{\text{сзв}}$, мм				
	i				
	$N_{\phi i}$, Вт				
	$\Pi_{\nu\phi i}$, м ³ /год				
	$U_{\phi i}$, Вт · м ³ / год				

За результатами розрахунків та побудованими графіками зробити висновки з проведеної лабораторної роботи.

Техніка безпеки

1. Установку підготувати до роботи послідовним увімкненням автомата електрошита й пускача установки.
2. Проби матеріалу для аналізу відбирати тільки після подвійного вимкнення електромережі установки.
3. Працювати за ввімкненої вентиляції.
4. Вмикати установку винятково за умови закритої кришки.
5. По закінченні роботи очистити установку, попередньо видаливши з неї подрібнений матеріал,
6. Бути обережними під час електричних вимірювань.

Запитання для самоконтролю

1. Поясніть конструкцію установки і принцип її роботи.
2. Розкажіть порядок проведення досліду.
3. Поясніть, як визначити кут захоплення.
4. Поясніть, як визначити ступінь дроблення і середньозважений розмір подрібненого матеріалу.
5. Проаналізуйте одержані графічні залежності.
6. Поясніть, як визначити теоретичні продуктивність і потужність бігунів.

3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ В КУЛЬОВОМУ МЛИНІ

Мета роботи: вивчити конструкцію і принцип роботи кульового млина періодичної дії, визначити раціональні параметри процесу подрібнення в кульовому млині.

Основні теоретичні положення

Кульові млини використовують для подрібнення матеріалів і широко застосовують у хімічній промисловості та промисловості будівельних матеріалів, що зумовлено простотою конструкції, зручністю експлуатації і високим ступенем подрібнення. Матеріал подрібнюється за рахунок ударної дії подрібнювальних тіл і розтирання.

Основні параметри процесу подрібнення в кульовому млині: частота обертання, коефіцієнт заповнення барабана, ступінь подрібнення, продуктивність і споживана потужність.

Під час повільного обертання барабана кулі з подрібнюваним матеріалом піднімаються до кута природного укосу і потім скочуються донизу (рис. 3.1, а). Частинки матеріалу перетираються між кулями, перетворюючись на тонкий порошок. Якщо обертання барабана підвищити (рис. 3.1, б), то кулі під впливом відцентрової сили, що притискає їх до внутрішньої поверхні барабана, піднімаються вгору і під дією сили тяжіння каскадом падають на матеріал і кулі в нижній частині млина. При цьому матеріал подрібнюється не тільки тертям між кулями, але й за рахунок удару. Максимальній швидкості падіння куль відповідає найбільша енергія, використовувана для подрібнення матеріалу. Продуктивність млина в цьому разі найбільша.

Подальше збільшення колової швидкості барабана зумовлює виникнення відцентрових сил, що перевищують сили тяжіння куль. Тоді кулі, притиснуті до внутрішньої поверхні барабана, рухатимуться разом з нею (рис. 3.1, в), і подрібнювання матеріалу в млині припиниться. Колову швидкість, за якої кулі перестають відокремлюватися від внутрішньої поверхні барабана, називають критичною.

Розрахункова критична частота обертання барабана для кульових млинів, с^{-1}

$$n_{\text{кр}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{2D}}, \quad (3.1)$$

де D – внутрішній діаметр барабана, м.

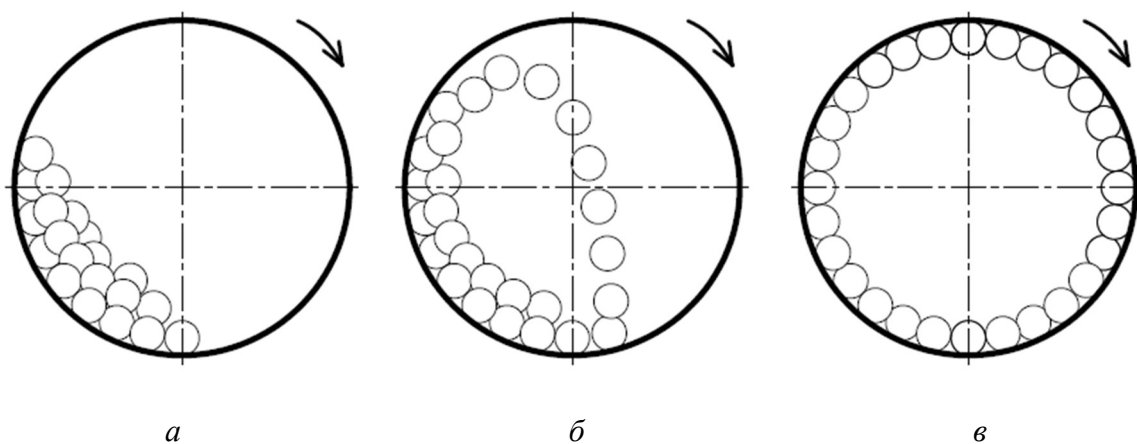


Рис. 3.1. Схема руху кульок в барабані кульового млина під час обертання в залежності від швидкості обертів: *а* – повільне обертання; *б* – оптимальне обертання; *в* – критичне обертання

Оптимальна частота обертання барабана, с^{-1}

$$n = \frac{0,5}{\sqrt{D}}. \quad (3.2)$$

Коефіцієнт заповнення барабана кулями

$$\varphi = \frac{M_{\text{т}}}{V\rho}, \quad (3.3)$$

де $M_{\text{т}}$ – маса подрібнювальних тіл, кг; V – внутрішній об’єм барабана, м^3 ; ρ – насипна густина куль, що визначається експериментально, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Ступінь подрібнення матеріалу

$$i = \frac{D_{\text{сзв}}}{d_{\text{сзв}}}, \quad (3.4)$$

де $D_{\text{сзв}}$, $d_{\text{сзв}}$ – середньозважене значення розмірів матеріалу відповідно перед подрібненням і після нього.

Потужність приводу кульового млина споживається на піднімання подрібнювальних тіл і надання їм кінетичної енергії, витрати в підшипниках барабана і втрати в приводі.

Розрахункова потужність електродвигуна кульового млина, кВт

$$N_{\text{дв}}^{\text{розр}} = \frac{0,0062(M_{\text{т}} + M_{\text{з}})\sqrt{D}}{\eta_1\eta_2}, \quad (3.5)$$

де M_3 – маса подрібнюваного матеріалу, кг; η_1 – ККД механізмів млина, $\eta_1 = 0,9 \dots 0,95$; η_2 – коефіцієнт, який враховує необхідний запас потужності електродвигуна та пусковий момент ($\eta_2 = 0,85 \dots 0,95$).

Опис лабораторної установки

Схему лабораторної установки наведено на рис. 3.1. Кульовий млин складається з оснащеного люком 1 барабана 2, що обертається навколо горизонтальної осі 3. Люк 1 призначений для завантаження й розвантаження матеріалу і подрібнювальних тіл у барабан 2.

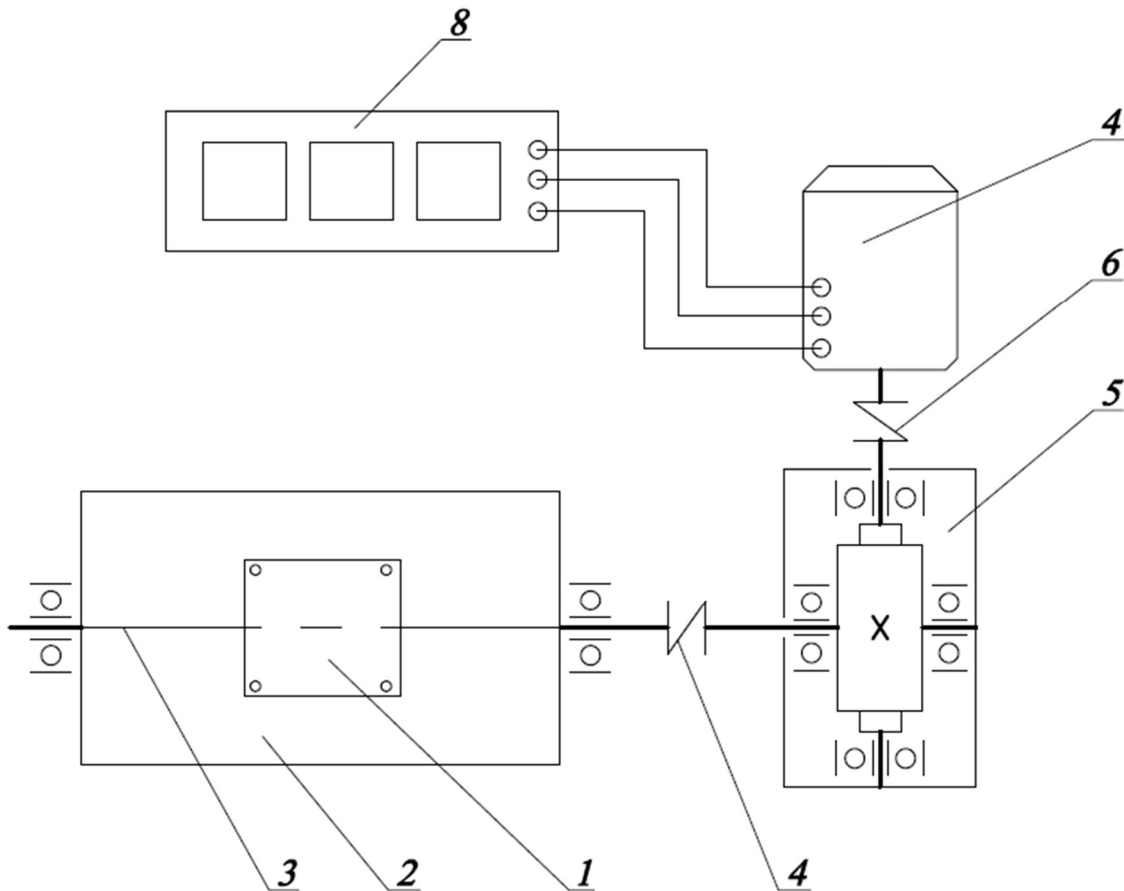


Рис. 3.2. Схема лабораторного кульового млина: 1 – люк; 2 – барабан; 3 – ось горизонтальна; 4 – електродвигун; 5 – черв'ячний редуктор; 6, 7 – муфти; 8 – електронний ватметр

Вертикальний вал 3 приводиться до руху приводом, до якого входять електродвигун 4 та черв'ячний редуктор 5 з передаточним числом $i = 25$, які з'єднані муфтами 6 і 7.

Потужність, споживану в процесі подрібнення, вимірюють електронним ватметром 8. Для обчислення повної потужності значення по кожній фазі складаються.

Крім того, під час проведення досліду буде використовуватись тахометр, секундомір, ваги, набір сит, визначених викладачем і металеві кулі.

Порядок виконання роботи

Підготувати 2 кг подрібнюваного матеріалу, визначити середній розмір його частинок. Визначити розміри барабана млина. Підрахувати критичну й оптимальну частоти обертання барабана.

Встановити оптимальну частоту обертання барабана за допомогою цифрового регулятора і тахометра (вимірювача частоти). Виміряти витрату потужності холостого ходу N_{xx} .

Завантажити в барабан 5 кг подрібнювальних тіл. Увімкнути млин і виміряти його потужність N_T . Повторити для маси подрібнювальних тіл 10, 15 і 20 кг.

Завантаживши 20 кг, довести частоту обертання барабана до критичної і знову встановити оптимальну частоту обертання барабана. Проаналізувати звукові ефекти під час обертання з різними швидкостями. Експериментально досягнення критичної частоти обертання чутно за припиненням гуркоту подрібнювальних тіл, оскільки їхні падіння припиняються і вони обертаються разом з барабаном.

Підготовлений попередньо матеріал завантажити в барабан, виміряти потужність N_3 . Увімкнути його і через 2, 4, 6 та 10 хв роботи робити зупинки й провести ситовий аналіз проб матеріалу масою 100 г, проби по закінченні аналізу повернути до барабану.

Результати вимірювань і ситового аналізу внести до табл. 3.1.

Звільнити барабан від куль і матеріалу, кулі відокремити і скласти у ящик.

Порядок оброблення результатів

Результати обробляють у такій послідовності.

1. Внутрішній об'єм барабана

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L,$$

де D – внутрішній діаметр барабана, м; L – довжина порожнини барабана, м.

2. Критичну й робочу частоту обертання барабана за залежностями (3.1) і (3.2), відповідно.

3. Коефіцієнт завантаження млина за залежністю (3.3) – для максимального завантаження.

Таблиця 3.1. Результати проведення експериментальних досліджень

Маса, кг		Витрата потужності, Вт			Час подріб- нення τ , с	Залишок на ситі, г				
Подріб- нювальних тіл $M_{\text{т}}$	заван- тажен- ня $M_{\text{з}}$	на обер- тання барабана $N_{\text{хх}}$	з подріб- нювальними тілами $N_{\text{т}}$	із за- ванта- женням $N_{\text{з}}$		сито № 1	сито № 2	сито № 3	сито № 4	залишок
5	-			-	-					
10	-			-	-					
15	-			-	-					
20	2				120					
					240					
					360					
					600					

4. На основі результатів ситового аналізу середньозважене значення розміру подрібненого матеріалу після кожного інтервалу часу

$$d_{\text{сзв}} = \frac{q_1 D_{\text{серед}_1} + q_2 D_{\text{серед}_2} + \dots + q_i D_{\text{серед}_i}}{100},$$

де q_i – залишок на ситі, г; $D_{\text{серед}_i}$ – середній розмір фракції на i -му ситі, мм.

5. Ступінь подрібнення для різних періодів подрібнення, використовуючи рівняння (3.4);

6. Розрахункову потужність електродвигуна за (3.5) – для максимального завантаження.

7. Фактична потужність на обертання завантаженого кулями барабана

$$N_{\text{ф}}^{\text{ті}} = N_{\text{т}}^i - N_{\text{хх}}.$$

8. Фактична потужність, що витрачається на подрібнення

$$N_{\text{ф}}^{\text{роб}} = N_z - N_{\text{хх}}.$$

9. Продуктивність млина для j -ї тонини подрібнення матеріалу, $\text{м}^3/\text{год}$

$$\Pi_{vi} = \frac{3600M_3}{\tau_i \rho_m} k_j,$$

де M_3 – маса завантаженого матеріалу, кг; τ_i – час подрібнення до одержання заданого залишку на i -му ситі; ρ_m – густина матеріалу, кг/м³; k_j – коефіцієнт подрібнення до заданої тонини j .

Під заданою тониною слід розуміти розміри частинок матеріалу, менших за розмір отворів сита j . Тоді коефіцієнт подрібнення до заданої тонини

$$k_j = \frac{q_{\text{залишка}} + q_1 + \dots + q_j}{100}.$$

10. Питома витрата енергії

$$N_{\text{пит}_i} = \frac{N_{\Phi}^{\text{роб}}}{\Pi_{vi}}.$$

Результати розрахунків занести до табл. 3.2 і 3.3.

За даними табл. 3.1 і 3.2 побудувати графічні залежності розмірів одержаного продукту від часу подрібнення $d_{\text{сзв}} = f(\tau)$, ступеня подрібнення від часу подрібнення $i = f(\tau)$, продуктивності від ступеня подрібнення $\Pi_{vi} = f(i)$, питомої витрати енергії від ступеня подрібнення $N_{\text{пит}_i} = f(i)$, фактичної потужності від маси завантаження $N_{\Phi}^i = f(M)$.

Таблиця 3.2. Результати розрахунків фактичної потужності

Маса завантаження M_i , кг	Фактична потужність N_{Φ}^i , Вт
5	
10	
15	
20	
20+2	

Таблиця 3.3. Результати розрахунків

Час подрібнення до заданої тонини τ , с	Середньозважене значення розміру подрібненого матеріалу $d_{сзв}$, мм	Ступінь подрібнення матеріалу i	Продуктивність Π_{vi} , м ³ /год	Питома витрата енергії $N_{пит_i}$, Вт·год/м ³

За результатами розрахунків та побудованими графіками зробити висновки з проведеної лабораторної роботи

Техніка безпеки

1. Установку підготувати до роботи послідовним увімкненням автомата.
2. Кульовий млин запускати послідовним вмиканням електрошита й пускача.
3. Під час роботи не перебувати в площині обертання барабана млина.
4. Бути обережними під час електричних вимірювань.
5. Працювати, коли вентиляцію увімкнено.
6. Після монтажу люка перевірити ретельність його закріплення.
7. Люк знімати тільки після подвійного вимкнення електромережі млина.
8. По закінченні роботи спочатку видалити з барабана подрібнювальні тіла, а потім подрібнений матеріал.
9. Барабан млина обернути поворотом муфти двигуна.
10. Не регулювати частоту обертання, коли установку вимкнено.

Запитання для самоконтролю

1. Поясніть, з чого складається установка і як вона працює.
2. Розкажіть порядок проведення досліду.
3. Розкажіть, як здійснюється подрібнення матеріалу в кульовому млині.

4. Поясніть, як визначити і встановити оптимальну й критичну частоти обертання барабана.

5. Проаналізуйте, як споживана на подрібнення потужність залежить від коефіцієнта заповнення.

6. Поясніть, від яких чинників залежать витрата енергії та продуктивність кульового млина.

7. Розкажіть, як треба робити ситовий аналіз.

8. Проаналізуйте графічні залежності.

4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІШУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У ЛОПАТЕВОМУ ЗМІШУВАЧІ

Мета роботи: вивчити будову й роботу однофазного лопатевого змішувача й дослідити параметри процесу змішування сухих сипких матеріалів.

Основні теоретичні положення

Основне завдання перемішування матеріалів – рівномірний розподіл частинок компонентів у суміші. Якість змішування визначається якістю кінцевого продукту.

Найпростіше якість механічних сумішей оцінюють коефіцієнтами неоднорідності, %

$$K_c = \frac{100}{C_0} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_0)^2}{n-1}}, \quad (4.1)$$

де C_i , C_0 – масова частка компонента бінарної суміші в i -й пробі та згідно з рецептурою в суміші, відповідно, % (мас.); n – загальна кількість проб (мінімум три).

Коефіцієнт K_c звичайно визначають за компонентою суміші, яка має найбільшу концентрацію.

Продуктивність лопатевих змішувачів періодичної дії у випадку, коли якість змішування задано

$$\Pi_{v,i} = Vm,$$

де V – об'єм завантаження, м; m – кількість завантажень за годину.

Час замісу визначає сума часу змішування (як правило, основного часу), завантаження, пуску, зупинки й вивантаження.

Споживана потужність лопатевого змішувача витрачається на подолання опору тертя маси об стінки корита, на транспортування маси і її перелопачування

$$N = \frac{V\rho_V L\omega g}{\eta},$$

де ρ_V – об'ємна густина матеріалу, кг/м³; L – довжина корита змішувача, м, ω – коефіцієнт опору, $\omega = 4...4,5$; η – ККД змішувача.

Опис лабораторної установки

Схему лабораторної установки наведено на рис. 4.1. Лабораторний лопатевий змішувач складається з корпусу 1 і робочого вала 2 з закріпленими на ньому лопатями 3. Робочий вал 2 приводиться до обертання приводом, який складається з черв'ячного редуктора 4, клинопасової передачі 5 та електродвигуна 6, з'єднаних за допомогою муфт 7.

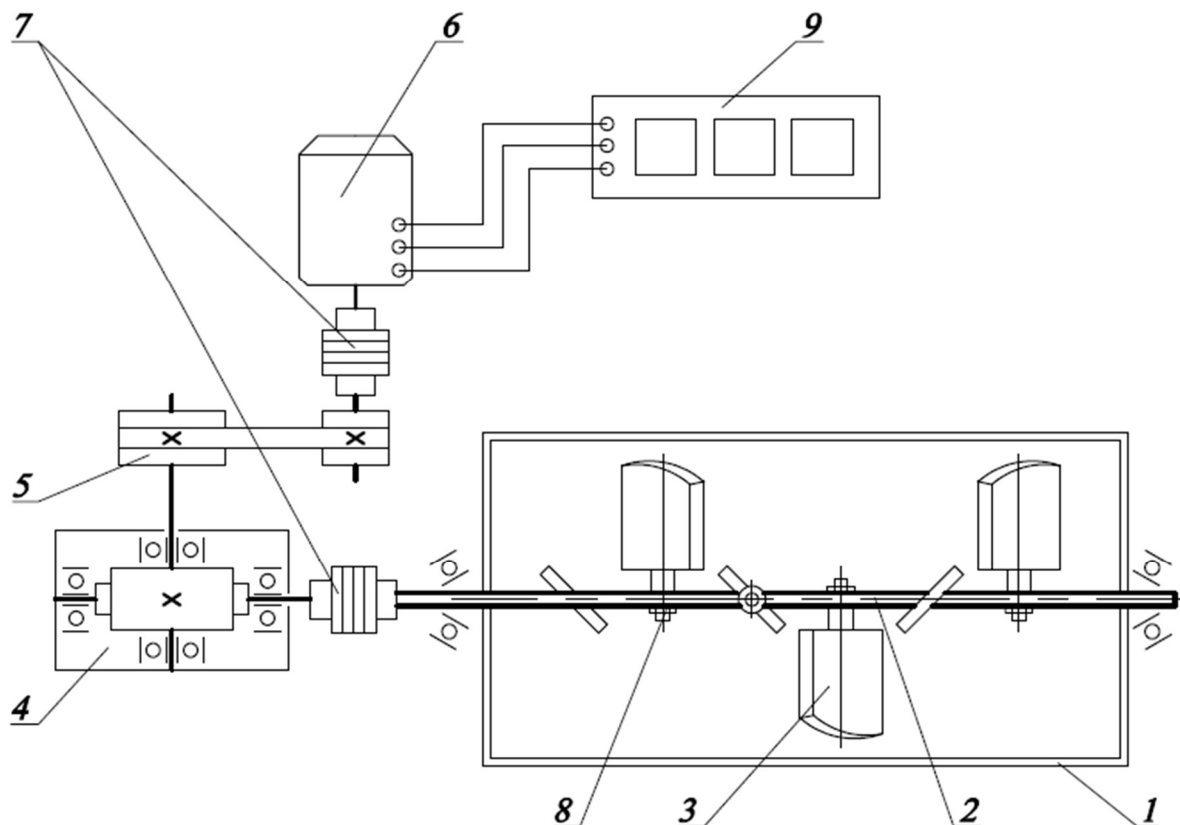


Рис. 4.1. Схема лабораторного лопатевого змішувача: 1 – корпус; 2 – робочий вал; 3 – лопаті; 4 – черв'ячний редуктор; 5 – клинопасова передача; 6 – електродвигун; 7 – муфти; 8 – гвинти; 9 – електронний ватметр

Конструкція лабораторного лопатевого змішувача передбачає регулювання кутів нахилу лопатей 3 на робочому валу 2 за допомогою гвинтів 8 і вивантаження матеріалу поворотом корпусу 1 відносно опор.

Потужність, споживану в процесі перемішування, вимірюють електронним ватметром 9. Для обчислення повної потужності значення по кожній фазі складаються.

Крім того, під час проведення досліду використовуватимуться тахометр, секундомір, ваги, набір сит, визначених викладачем, і кутомір.

Порядок виконання роботи

Визначити розміри корпусу змішувача, встановити лопаті за шаблоном-кутоміром під кутом $22^{\circ}30'$ до осі горизонтального вала. Виміряти потужність холостого ходу N_{xx} й частоту обертання робочого вала n .

Рівномірно по висоті засипати у змішувач 4 кг матеріалу такого складу: в ліву частину – 2 кг з розміром частинок більш як 0,5 мм, у праву частину – 2 кг з розміром частинок меншим як 0,5 мм. Матеріал – річковий пісок, для якого з довідникових даних об'ємна густина $\rho_v = 1520 \text{ кг/м}^3$.

Увімкнути установку й виміряти потужність змішування. Через 30 с узяти пробу матеріалу масою 100 г з одного з країв корита-змішувача мінімум тричі. Для кожного з дослідів провести ситовий аналіз матеріалу на ситі 0,5 і зважити залишок. Матеріал повернути до змішувача.

Виконати відбір проб і вимірювання через кожні 30 с.

Досліди провести, встановлюючи лопаті спочатку під кутом 45° , а потім під кутом $67^{\circ}30'$ і на частоті обертання вала n .

Дослідні дані внести до табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Результати проведення експериментальних досліджень

Кут установлення лопатей α	Частота обертання робочого вала n , с^{-1}	Завантаження $M_i = 4 \text{ кг}$		Час змішування τ , с	Залишок на ситі, г
		Потужність холостого ходу N_{xx} , Вт	Потужність робочого ходу N_{px} , Вт		
$22^{\circ}30'$				30	
				60	
				90	
				120	
45°				30	
				60	
				90	
				120	
$67^{\circ}30'$				30	
				60	
				90	
				120	

Порядок оброблення результатів

Результати обробляють у такій послідовності.

1. Потужність, що витрачається на змішування

$$N_{\text{зм}} = N_{\text{рх}} - N_{\text{хх}},$$

де $N_{\text{рх}}, N_{\text{хх}}$ – потужність робочого й холостого ходу за заданої частоти обертання вала, відповідно, Вт.

2. За залежністю (4.1) оцінити якість суміші. При цьому $C_0 = 0,5$; $C_i = (\text{Залишок, г}) / 100$.

3. Продуктивність лопатевого змішувача залежно від кута повороту лопатей та завантаження за заданого коефіцієнта нерівномірності, м³/год

$$\Pi_{v,i} = \frac{3600 M_i}{\tau_i \rho_V},$$

де M_i – маса завантаженого матеріалу, кг; τ_i – час змішування до одержання порівнянної ефективності перемішування, с.

4. Питому витрату енергії, Вт·год/м³

$$N_{\text{пит}_i} = \frac{N_{\text{зм}}}{\Pi_{v,i}}.$$

Результати розрахунків звести в табл. 4.2.

За даними табл. 4.2 побудувати графічні залежності питомої витрати енергії $N_{\text{пит}} = f(\tau)$, що витрачається на змішування, й продуктивності від часу змішування $\Pi_v = f(\tau)$, коефіцієнта неоднорідності від часу змішування $K_c = f(\tau)$.

За результатами розрахунків та побудованими графіками зробити висновки з проведеної лабораторної роботи.

Таблиця 4.2. Результати розрахунків

Кут установ- лення лопатей α	Частота обертання робочого вала $n, \text{с}^{-1}$	Фактична потужність змішування $N_{\text{зм}}, \text{Вт}$	Час змішу- вання $\tau, \text{с}$	Коефіцієнт неоднорід- ності K_C	Продуктив- ність $P_{v,i},$ $\text{м}^3/\text{год}$	Питома витрата енергії $N_{\text{пит}_i},$ $\text{Вт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$
22°30'			30			
			60			
			90			
			120			
45°			30			
			60			
			90			
			120			
67°30'			30			
			60			
			90			
			120			

Техніка безпеки

1. Змішувач запускати послідовним вмиканням автомата електроцита і пускача.
2. Установка має працювати тільки із закритою кришкою.
3. Бути обережними під час електричних вимірювань.
4. Проби відбирати тільки після подвійного вимкнення електромережі млина.

Запитання для самоконтролю

1. Поясніть, з чого складається установка і як вона працює?
2. Розкажіть порядок проведення досліду.
3. Проаналізуйте залежність питомої витрати енергії, що витрачається на перемішування, від часу перемішування.
4. Проаналізуйте залежність продуктивності від часу перемішування.
5. Розкажіть, як оцінюють ефективність змішування?
6. Проаналізуйте залежність ефективності змішування від кута повороту лопатей.
7. Проаналізуйте одержані графічні залежності.

5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІШУВАННЯ В'ЯЗКИХ РІДИН В АПАРАТІ З РОТОРНОЮ МІШАЛКОЮ

Мета роботи: вивчити теорію розмірностей і її практичне використання для визначення потужності процесу перемішування рідкого середовища лопатевою мішалкою.

Основні теоретичні положення

Процес перемішування в рідкому середовищі залежить від режиму руху рідини в посудині. Потужність, яка при цьому витрачається, можна визначити в результаті розв'язання рівняння руху, суцільності та енергії. Розв'язання таких рівнянь є досить складним.

Більш простий метод розв'язання завдання перемішування рідини в об'ємі лопатевою мішалкою – метод теорії розмірностей. Відомо, що витрата потужності N під час перемішування залежить від динамічної в'язкості μ , густини ρ рідини, частоти обертання n мішалки й ширини L лопаті

$$N = f(\mu, \rho, n, L). \quad (5.1)$$

Функціональну залежність (5.1) можна подати у вигляді степеневого аналізу закону

$$N = c\mu^x \rho^y n^z L^k. \quad (5.2)$$

Зв'язок між величинами (5.2) можна замінити зв'язком між їхніми одиницями

$$\left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right]^x \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]^y \left[\frac{1}{\text{с}} \right]^z [\text{м}]^k.$$

або з урахуванням того, що

$$[\text{Н}] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \right],$$

$$\left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3} \right] = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \right]^x \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]^y \left[\frac{1}{\text{с}} \right]^z [\text{м}]^k. \quad (5.3)$$

На основі рівності (5.3) дістанемо систему рівнянь

$$\begin{cases} x + y - 1 = 0; \\ x + 3y - k + 2 = 0; \\ x + z - 3 = 0. \end{cases} \quad (5.4)$$

Виражаючи всі невідомі системи (5.4) через x , дістанемо

$$\begin{cases} y = 1 - x; \\ z = 3 - x; \\ k = 5 - 2x. \end{cases} \quad (5.5)$$

Підставимо вирази (5.5) у (5.2)

$$N = c\mu^x \rho^{1-x} n^{3-x} L^{5-2x}. \quad (5.6)$$

Шляхом простих перетворень дістанемо рівність

$$\frac{N}{\mu n^2 L^3} = c \left(\frac{\rho n L^2}{\mu} \right)^{1-x}, \quad (5.7)$$

ліва частина якого – критерій Ейлера

$$\varepsilon u_m = \frac{N}{\mu n^2 L^3}, \quad (5.7)$$

а права (в дужках) – критерій Рейнольдса

$$\text{Re}_m = \frac{\rho n L^2}{\mu}. \quad (5.8)$$

Позначимо величину $(1-x)$ через b і запишемо рівняння процесу (5.7) у вигляді

$$\varepsilon u_m = A \text{Re}_m^b, \quad (5.10)$$

де A – коефіцієнт пропорційності.

Для визначення значень A і b проведемо експеримент.

Опис лабораторної установки

Схему лабораторної установки наведено на рис. 5.1. Апарат з роторною мішалкою складається з корпусу 1, що містить всередині електродвигун, який обертає вал 2 з лопатями 3.

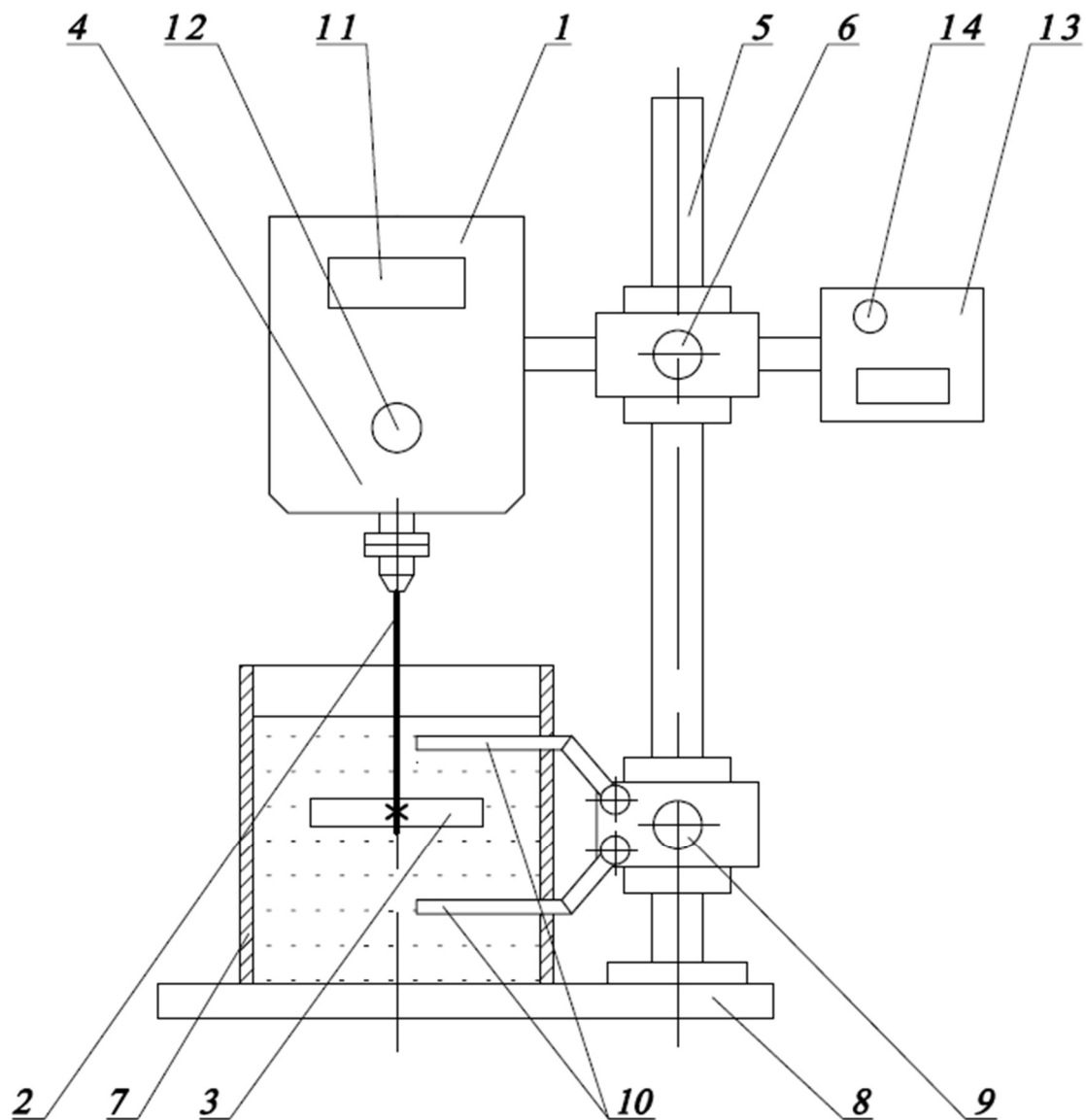


Рис. 5.1. Схема лабораторного апарату з роторною мішалкою: 1 – корпус; 2 – вал; 3 – лопаті; 4 – патрон; 5 – вертикальна стойка; 6, 9 – затискачі; 7 – посудина з рідиною; 8 – плита; 9 – затискач; 10 – тримачі; 11 – цифрове табло; 12 – регулятор обертів; 13 – цифровий ватметр; 14 – перемикач діапазонів вимірювань

Вал 2 кріпиться до корпусу 1 за допомогою патрона 4, а корпус 1 прикріплено до вертикальної стойки 5 за допомогою затискача 6, що дозволяє змінювати висоту установки під різні змішувальні елементи та виймати вал 2 з лопатями 3 з посудини з рідиною 7. Це потрібно для заміни лопатей.

Вертикальна стойка 5 встановлена на плиті 8. Також на вертикальній стойці розміщено затискач 9, що дозволяє вертикально переміщувати тримачі 10, які фіксують посудину з рідиною 7.

Також на корпусі 1 розміщено цифрове табло 11 для зняття показників швидкості обертання і регулятор 12 для їх регулювання та вимикання.

Потужність знімається за допомогою цифрового ватметра 13, який розміщено на вертикальній стойці 3 і підключений до приводу електродвигуна. На корпусі цифрового ватметра 13 розміщено перемикач діапазонів вимірювань 14.

Порядок виконання роботи

Виміряти довжину L змінних лопатей (їх ширина B не використовується у розрахунках і є однаковою для усіх лопатей). На валу мішалки закріпити найменшу лопать. Увімкнути установку, установити регулятором задану частоту обертання вала мішалки. Виміряти потужність холостого ходу $N_{\text{хх}}$. Повторити вимірювання потужності для різних значень частоти обертання. Вимкнути обертання двигуна натисканням на регулятор 12. Залити посудину рідиною і опустити корпус 1, закріпивши його затискачем 6. Установити регулятором задану частоту обертання вала мішалки. Виміряти робочу потужність $N_{\text{рх}}$.

Вимірювання виконати для трьох частот обертання. Виконати аналогічні вимірювання для другої лопаті (середньої) та третьої лопаті (великої), на трьох частотах обертання для кожної. Результати вимірювань занести до табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Результати проведення експериментальних досліджень

n , об/хв	n , с ⁻¹	$N_{\text{хх}}$, Вт	Номер і довжина лопаті L , м	Номер дослідів	$N_{\text{рх}}$, Вт	$N_{\text{досл}}$, Вт
			1 0,033	1 2 3		
			2 0,045	1 2 3		
			3 0,070	1 2 3		

Порахувати n , с⁻¹ та $N_{\text{досл}} = N_{\text{рх}} - N_{\text{хх}}$ і записати в табл. 5.1.

Для проведення досліду використовується гліцерин з $\rho = 1260 \text{ кг/м}^3$ і $\mu = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ або масло індустріальне з $\rho = 880 \text{ кг/м}^3$ і $\mu = 0,012 \text{ Па}\cdot\text{с}$, дані вірні за температури навколишнього середовища 15°C .

Порядок оброблення результатів

Результати обробляють у такій послідовності.

1. Розрахувати критерії ϵu_m за формулою (5.8) і Re_m за формулою (5.9) для кожного досліду за відомими значеннями густини ρ і в'язкості μ рідини.
2. Результати обробки в критеріальному вигляді внести до табл. 5.2.

Таблиця 5.2. Результати обробки дослідів

Номер і довжина лопаті L , м	Номер досліду	ϵu_m	$\lg \epsilon u_m$	Re_m	$\lg Re_m$
1 $0,033$	1				
	2				
	3				
2 $0,045$	1				
	2				
	3				
3 $0,070$	1				
	2				
	3				

3. У логарифмічних координатах побудувати графік в координатах $\lg \epsilon u_m = f(\lg Re_m)$ з таблиці 5.2 і провести між значеннями точок графіка апроксимуючу пряму.

4. Визначити з графіка показник степеня b як тангенс кута нахилу α одержаної апроксимуючої прямої до осі абсцис

$$b = \operatorname{tg} \alpha.$$

5. Визначити коефіцієнт A , обравши будь-яку точку на апроксимуючій прямій, за формулою (5.10).

6. Записати критеріальне рівняння $\epsilon u_m = A Re_m^b$ через визначені коефіцієнти A і b та занести його у висновки лабораторної роботи.

7. Розрахувати теоретичну потужність N_T мішалки за даними третьої лопаті за формулою (5.6) й порівняти одержане значення з дослідним для третьої лопаті $N_{\text{досл}}$ з табл. 5.1 за похибкою δ

$$\delta = \frac{|N_T - N_{\text{досл}}|}{N_{\text{досл}}} \cdot 100\%.$$

Зробити висновки для визначеної потужності за даними третьої лопаті за похибкою δ і оформити у висновках лабораторної роботи.

Примітка. Для визначення теоретичної потужності N_T мішалки за даними третьої лопаті за формулою (5.6) треба знайти коефіцієнт x . Враховуючи, що на початку експерименту прийнято $b = 1 - x$, тоді визначивши ще у п. 4 b знаходимо $x = 1 - b$.

Техніка безпеки

1. Працювати тільки тоді, коли кришку посудини закрито.
2. Бути обережними під час електричних вимірювань.
3. Заміну лопатей виконувати спеціальним інструментом.
4. Після заміни лопаті перевірити ретельність її закріплення.

Запитання для самоконтролю

1. Поясніть, з чого складається установка і як вона працює.
2. Розкажіть порядок проведення дослідів.
3. Сформулюйте загальні поняття теорії розмірностей.
4. Сформулюйте поняття про логарифмічні координати. Чому обробку експериментальних даних виконують у логарифмічній системі координат?
5. Проаналізуйте, від чого залежить потужність лопатевої мішалки.
6. Поясніть фізичний зміст критеріїв Рейнольдса й Ейлера.
7. Назвіть сферу застосування одержаної залежності.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Мікульонок І. О. Механічні та гідромеханічні процеси, апарати і машини хімічної технології : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 172 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66408>
2. Мікульонок І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології : підруч. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 340 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169>
3. Процеси та обладнання хімічної технології. Ч. 1: підруч. / Я. М. Корнієнко, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок та ін. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 300 с.
4. Процеси та обладнання хімічної технології. Ч. 2: підруч. / Я. М. Корнієнко, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок та ін. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 416 с.
5. Мікульонок І. О. Механічні та гідромеханічні процеси, апарати і машини хімічної технології: Практикум : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 174 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41037>
6. Коваленко І. В., Малиновский В. В. Навчальні дослідження процесів, машин та апаратів хімічних виробництв : навч. посіб.. Київ : «Норіта-плюс», 2006. 160 с.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Основні позначення та скорочення.....	4
Техніка безпеки під час роботи в лабораторіях переробки полімерів..	6
Вимоги до оформлення протоколу лабораторної роботи.....	8
1. Лабораторна робота № 1. Дослідження гранулометричного складу матеріалу методом ситового аналізу	9
2. Лабораторна робота № 2. Дослідження процесу подрібнення в бігунах	13
3. Лабораторна робота № 3. Дослідження процесу подрібнення в кульовому млині.....	20
4. Лабораторна робота № 4. Дослідження процесу перемішування сипких матеріалів у лопатевому змішувачі	28
5. Лабораторна робота № 5. Дослідження параметрів процесу перемішування в'язких рідин в апараті з роторною мішалкою.....	33
Перелік рекомендованих джерел інформації.....	39

ДЛЯ НОТАТОК

[illegible]

Електронне мережне навчальне видання

Витвицький Віктор Миронович
Сокольський Олександр Леонідович
Мікульонок Ігор Олегович

**МЕХАНІЧНІ І ГІДРОМЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ
ТА ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІМЕРНИХ
І БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ**

Лабораторний практикум

*для здобувачів ступеня бакалавра
за спеціальностями 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування*

Комп'ютерна правка та верстка – *авторські*