

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



# **ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ  
«ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ»  
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ІНЖЕНЕРНО-ХІМІЧНОГО ТА ХІМІКО-  
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ФАКУЛЬТЕТІВ ВСІХ ФОРМ НАВЧАННЯ

КИЇВ  
НТУУ «КПІ»  
2008

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

## **ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ  
«ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ»  
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ІНЖЕНЕРНО-ХІМІЧНОГО ТА ХІМІКО-  
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ФАКУЛЬТЕТІВ ВСІХ ФОРМ НАВЧАННЯ

*Затверджено*  
*на засіданні кафедри машин та*  
*апаратів хімічних і*  
*нафтопереробних виробництв.*  
*Протокол № 4 від 15.10.2008 р.*

КИЇВ  
НТУУ «КПІ»  
2008

Дослідження кінетики процесу осадження: Метод. вказівки до виконання лабораторної роботи з дисципліни «Процеси і апарати хімічної технології» для студентів інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів всіх форм навчання / Уклад. В.В.Лукашова. – К.: НТУУ «КПІ», 2008.– 16 с.

Навчальне видання

## **ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ**

### **Методичні вказівки**

до виконання лабораторної роботи з дисципліни «Процеси і апарати хімічної технології» для студентів інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів всіх форм навчання

Укладачі: Лукашова Вікторія Володимирівна

Відповідальний редактор Я. М. Корнієнко, д-р техн. наук, проф.

Рецензент Д. Е. Сідоров, канд. техн. наук, доц.

*За редакцією укладачів  
Надруковано з оригінал-макета замовника*

## I. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

У хімічній технології проведення цілого ряду процесів пов'язане з виділенням твердої фази із рідини. Відстоювання (гравітаційне осадження) під дією сил тяжіння застосовується для розділення рідких або газових неоднорідних систем. Прикладами промислового відстоювання є розділення суспензій у виробництві піридинових основ, очистці розсолу в содовому виробництві та виробництві харчової повареної солі й т.д. Цей процес не дозволяє виділити дрібнодисперсні частки й застосовується для попереднього грубого (часткового) розділення неоднорідних систем. Швидкість осадження часток під дією сил тяжіння невелика, але безумовними перевагами процесу гравітаційного осадження є низька енергоємність, просте апаратурне оформлення та відносна дешевизна обладнання.

Для розрахунку поверхні осадження необхідно знати швидкість осадження часток. Вивчення закономірностей процесу осадження є однією із задач гідродинаміки.

У процесі руху твердої частки в рідині виникають опори, обумовлені режимом руху та формою тіла обтікання. При малих швидкостях частка долає сили тертя, а при більших – сили інерції, під дією яких відривається граничний шар від поверхні частки. Всі ці фактори впливають на швидкість осадження.

Метою даної роботи є дослідження кінетики процесу осадження та визначення кількісної залежності швидкості осадження від основних факторів, що впливають на процес осадження.

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ ПІД ДІЄЮ СИЛИ ТЯЖІННЯ

При падінні частки в рідкому середовищі під дією сили тяжіння швидкість частки спочатку зростає. Через якийсь час сила опору середовища врівноважує силу тяжіння й частка буде рухатися рівномірно з постійною швидкістю, що називається швидкістю осадження.

В умовах динамічної рівноваги рівнодіюча зовнішньої сили  $F_T$  (сили тяжіння), підйомної сили  $F_A$  (сили Архімеда) та сили опору середовища  $F_C$  дорівнює добутку маси частки на її прискорення:

$$F_T - F_A - F_C = m_T \frac{dw}{d\tau}, \quad (1)$$

де  $m_T$  – маса частинки;  $w$  – швидкість частинки;  $\tau$  – час.

Підставляючи в рівняння (1) значення маси –  $m_T = V_T \rho_T = C_1 l^3 \rho_T$ , зовнішньої сили –  $F_T = m_T g$ ; підйомної сили, що пропорційна масі середовища, яка витиснута масою частки –  $F_A = m_p g$  і сили опору середовища  $F_c = C_2 l^2 \mu \frac{\partial w}{\partial n}$ , отримаємо диференціальне рівняння осадження під дією сили тяжіння:

$$C_1 l^3 g (\rho_T - \rho_p) - C_2 l^2 \mu \frac{\partial w}{\partial n} = C_1 l^3 \rho_T \frac{dw}{d\tau}, \quad (2)$$

де  $C_1$  і  $C_2$  – фактори форми;  $l$  – визначальний лінійний розмір частки;  $\rho_T$  і  $\rho_p$  – густина частки й середовища (рідини), відповідно;  $w$  – швидкість осадження.

Розв'язання даного рівняння методами теорії подібності дозволяє одержати критеріальне рівняння, що описує процес осадження часток

$$Re = C(\psi \cdot Ar)^n \quad (3)$$

де  $C$  і  $n$  – постійна й показник ступеня, відповідно;  $\psi$  – коефіцієнт форми частки (для частинок сферичної форми  $\psi=1$ );  $Re = \frac{w_0 d \rho_p}{\mu_p}$  – критерій

Рейнольда;  $Ar = \frac{g d^3 \rho_p}{\mu_p^2} (\rho_T - \rho_p)$  – критерій Архімеда;  $\mu_p$  – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини, Па·с;  $d$  – діаметр частки, м (для часток довільної форми  $d=d_{\text{екв}}$ ).

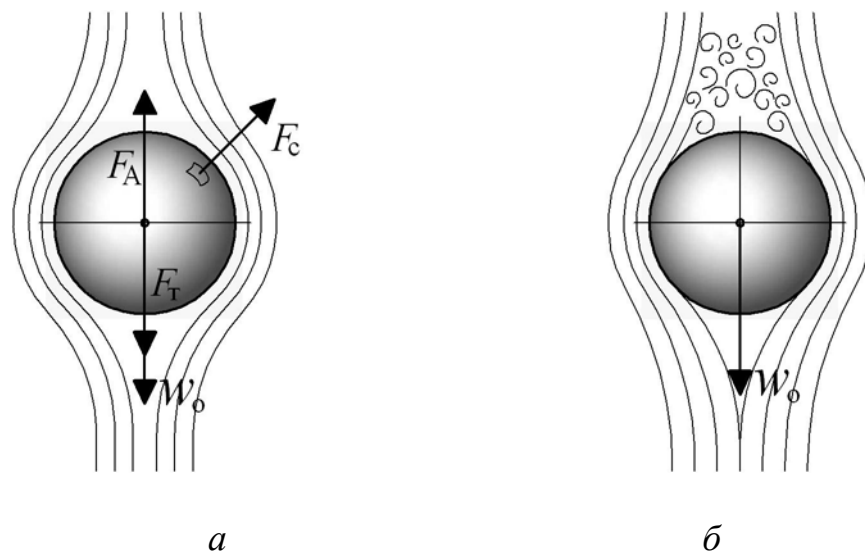


Рис. 1. Обтікання частинки сферичної форми: а – ламінарним потоком; б – турбулентним потоком.

Значення постійних  $C$  і  $n$  залежать від режиму осадження та визначаються експериментально. Рівняння (3) справедливе для ламінарного, перехідного й турбулентного режиму осадження часток. Вирішуючи дане рівняння відносно  $w_0$  – одержимо формулу для розрахунку швидкості осадження часток.

Якщо ж, з іншої сторони прийняти, що сила опору середовища пропорційна кількості руху й площі лобового перетину  $f$ :

$$F_c = \zeta \frac{\rho w^2}{2} f, \quad (4)$$

де  $f = \pi d^2/4$  – площа лобового перетину, яка визначається як площа проекції частинки на площину, перпендикулярну до напрямку руху цієї частинки, м.

З урахуванням залежності (4) рівняння (1) можна записати, як:

$$m_T g - m_p g - \zeta \frac{\rho_p w_0^2}{2} f = m_T \frac{dw}{d\tau}. \quad (5)$$

Після ряду перетворень для часток сферичної форми можна одержати формулу для розрахунку швидкості осадження, справедливу для всіх трьох режимів:

$$w_0 = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{(\rho_T - \rho_p) g d}{\rho_p \zeta}} \quad (6)$$

Коефіцієнт опору  $\zeta$  є функцією критерію Рейнольдса та вибирається за відповідними формулами для необхідного режиму обтікання (рис. 2).

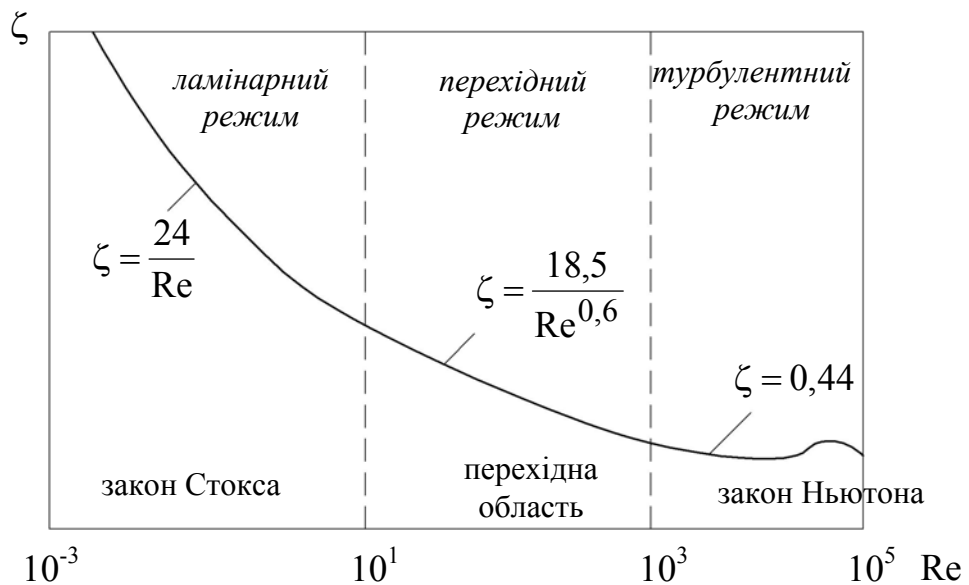


Рис. 2. Залежність коефіцієнта опору середовища від режиму обтікання часток

При ламінарному режимі осадження (рис. 1, *a*) коли сила опору середовища визначається за законом Стокса ( $F_c = 3\pi d w_0 \mu_{ж}$ ), рівняння (3) для сферичних часток можна представити так:

$$Re = 0,056 Ar \quad (7)$$

Цей режим має місце при  $Re < 2$  або  $\psi \cdot Ar < 36$ .

При турбулентному режимі осадження (рис. 1, *б*) діє закон Ньютона. В умовах автомодельності критерія  $Re$  ( $\zeta = 0,44$  (рис. 2)) рівняння (3) має вигляд:

$$Re = 1,74 Ar^{0,5} \quad (8)$$

Цей режим відбувається при  $Re \geq 500$  або  $Ar \geq 83 \cdot 10^3$ .

У перехідній області, коли частка крім опору тертя долає також деякий опір, викликаний вихровими потоками, розрахунок швидкості осадження здійснюється за формулою

$$Re = 0,152 Ar^{0,715} \quad (9)$$

Область осадження в перехідному режимі обмежується зміною критеріїв Рейнольдса й Архімеда в межах

$$36 < Ar < 83 \cdot 10^4 \quad \text{та} \quad 2 < Re < 500$$

При розрахунку швидкості осадження спочатку встановлюють режим осадження за величиною  $Ar$ , а потім визначають значення  $Re$  за рівняннями (7), (8) або (9) і визначають швидкість осадження:

$$w_0 = \frac{\mu_p \cdot Re}{d \cdot \rho_p} \quad (10)$$

Розрахунок швидкості осадження при заданому розмірі часток зручно проводити за методом Лященко, використовуючи графік залежності  $Ly = f(Ar)$  (рис. 3).

Критерій Лященко визначається за наступним виразом:

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{w_0^3 \cdot \rho_p^2}{\mu_p (\rho_T - \rho_p) g} \quad (11)$$

При цьому розраховується величина критерія  $Ar$ , потім за графіком (рис. 3) визначається значення критерія  $Ly$ , що відповідає даному значенню  $Ar$ , і за ним обчислюють швидкість осадження частки.

Примітка: У всіх розглянутих випадках мова йде про одиночне осадження часток. При об'ємній концентрації твердої фази  $C_T > (2 \div 5) \%$  має місце стиснуте осадження. При цьому відбувається взаємодія часток і значення коефіцієнта опору  $\zeta$  буде більшим. Отже у формули необхідно вводити поправку на порозність шару.

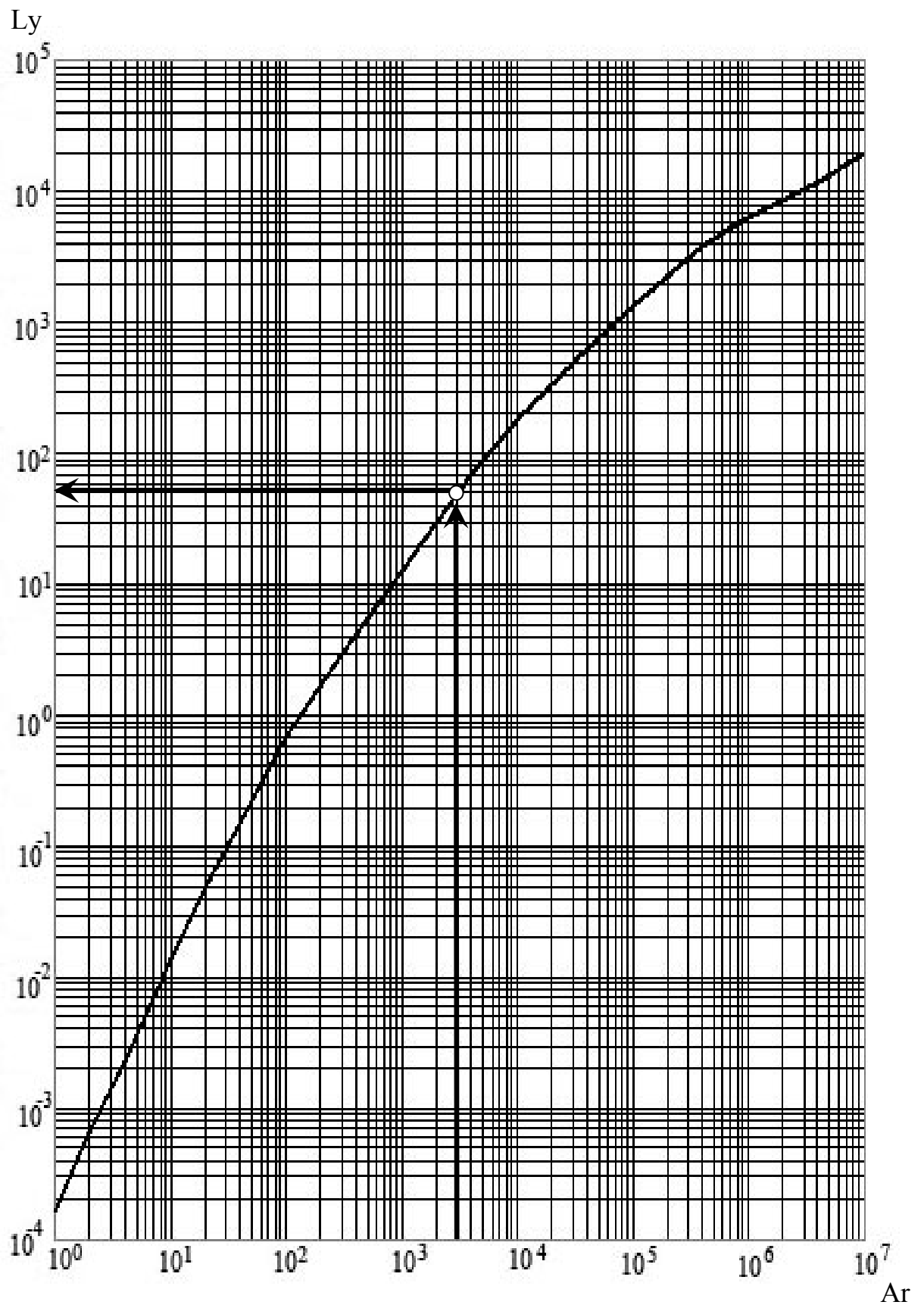


Рис. 3. Залежність критерія Ly від критерія Ar



При визначеному критерії  $Lu$  за відомою швидкістю осадження можна знайти діаметр частки. Якщо ж осаджуються одиночні частки неправильної форми (яка відрізняється від сферичної), то визначається еквівалентний діаметр –  $d_{\text{екв}}$ .

Розрахунок здійснюється в наступному порядку: за рівнянням (11) знаходять величину критерія  $Lu$ , потім за графіком (рис. 3) визначають відповідне значення  $Ar$  і розраховують еквівалентний діаметр частки неправильної форми за формулою:

$$d_{\text{екк}} = \psi \sqrt[3]{\frac{Ar \mu_p^2}{(\rho_T - \rho_p) \rho_p g}} \quad (12)$$

де  $\psi$  – коефіцієнт форми частинки, який є відношенням площі поверхні кулі, об'єм якої дорівнює об'єму частинки, до площі поверхні частинки. Для частинок сферичної форми коефіцієнт форми дорівнює  $\psi = 1$ ; для куба  $\psi = 0,806$ ; для циліндра, висота якого в 10 разів перевищує його радіус,  $\psi = 0,69$ .

### 3. ОПИС СХЕМИ УСТАНОВКИ

Установка для дослідження кінетики процесу осадження складається з трьох скляних циліндрів, заповнених водою, трансформаторним маслом і поліметилсилоксаном – ПМС-700.

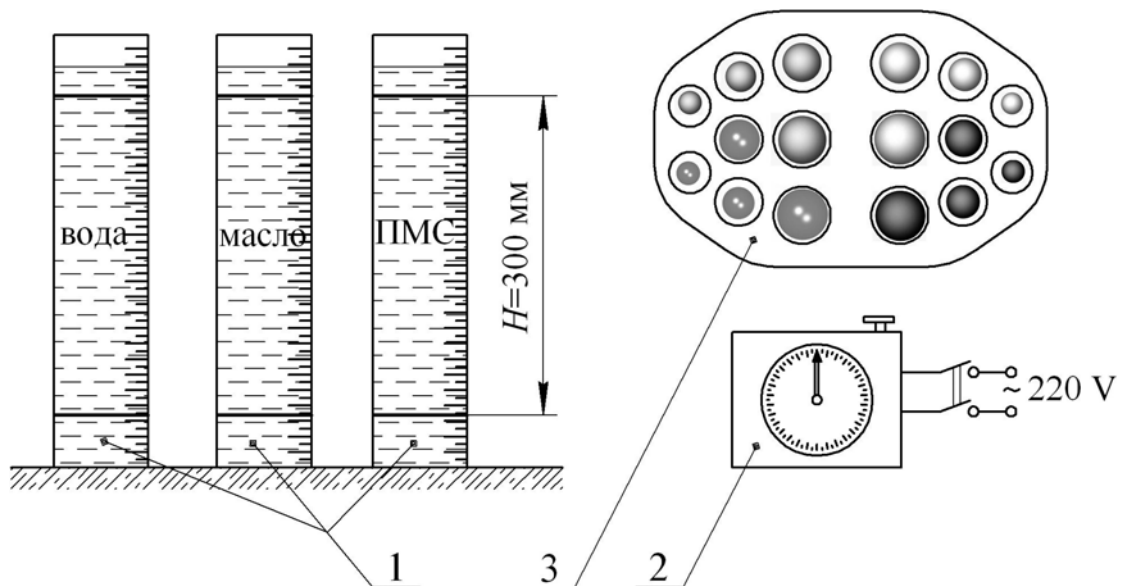


Рис. 4. Схема дослідної установки:  
 1 – мірні циліндри; 2 – секундомір;  
 3 – набір кульок із скла, свинцю, пластика та сталі

Поруч розташована підставка із гніздами для 15 кульок різного розміру зі скла, свинцю, пластмаси й сталі. На кожному циліндрі є 2 червоні мітки, відстань між якими 0,3 м. Для визначення часу осадження передбачено електричний секундомір, а для визначення маси й об'єму кульок – ваги та мікрометр. Схема установки представлена на рис.4.

#### 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Після ознайомлення зі схемою установки необхідно знайти масу кожної кульки та її діаметр відповідно до номера лунки. Дані вимірювань заносяться в таблицю 1. Густина матеріалу розраховується на основі проведених вимірювань:  $\rho_T = G/V$  і для кульок з того самого матеріалу приймається середнє значення густини –  $\rho_T$ .

Данні про фізичні властивості рідин наведено в таблиці 2.

Кожна кулька опускається пінцетом на поверхню рідини в центрі циліндра та при проходженні нею верхньої мітки вмикається секундомір, а при досягненні нижчої мітки – вимикається. Кожен дослід проводиться три рази й потім знаходиться середнє значення.

Досліди варто починати з осадження найменших кульок у найбільш в'язкій рідині.

Результати досліджень заносяться в таблицю 1.

#### 5. ОБРОБКА ТА АНАЛІЗ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ

##### 5.1. Одержання критеріального рівняння

Швидкість осадження часток визначається за формулою:

$$w_0 = \frac{H}{\tau}, \text{ м/с} \quad (13)$$

де  $H = 0,3$  м – відстань між мітками на циліндрі;  $\tau$  – час проходження міток, с.

За даними досліджень розраховуються значення критеріїв Рейнольдса ( $Re = \frac{w_0 d \rho_p}{\mu_p}$ ) для кожного досліді і Архімеда

$$(Ar = \frac{g d^3 \rho_p}{\mu_p^2} (\rho_T - \rho_p)).$$

Результати розрахунків наносяться у таблицю 3.

Таблиця 1. Результати досліджень

Номер кульки	Маса кульки G, кг	Діаметр кульки d, м	Густина матеріалу $\rho_T$ , кг/м <sup>3</sup>	Матеріал	Час осадження $\tau$ , с			Еквівалентний діаметр $d_{\text{екв}}$ , м
					вода	масло	ПМС	

Таблиця 2. Фізичні властивості рідин [3]

Рідина	Густина $\rho_p$ , кг/м <sup>3</sup>	В'язкість $\mu_p$ , Па·с
Вода	$1,00 \cdot 10^3$	$1,00 \cdot 10^{-3}$
Трансформаторне масло	$0,89 \cdot 10^3$	$124,20 \cdot 10^{-3}$
Поліметилсилоксан ПМС-700	$0,97 \cdot 10^3$	$678,00 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 3. Результати досліджень

№ п/п	Номер кульки	Швидкість осадження $w_0$ , м/с	Re	Ar	lg Re	lg Ar	Ly	за графіком $w_0$ , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Подальша обробка здійснюється для кожного з гідродинамічних режимів окремо. На основі дослідних даних знаходять показник степені  $n$  і постійну  $C$  у рівнянні (3).

$$Re = C Ar^n .$$

Існує два методи обробки дослідних даних: графічний (спрощений) і точний (метод найменших квадратів). Перший метод використовують для швидкої оцінки результатів.

### **Графічний метод**

Прологарифмуємо рівняння (3):

$$\lg Re = \lg C + n \lg Ar. \quad (14)$$

Введемо нові позначення:

$$Y = \lg Re; \quad X = \lg Ar; \quad B = \lg C.$$

Рівняння (14) набуває вигляду:

$$Y = n X + B. \quad (15)$$

Це лінійне рівняння та у логарифмічних координатах буде становити пряму лінію.

Порядок узагальнення наступний:

1. Всі дослідні точки ( $Ar$ ,  $Re$ ) для даного режиму наносяться на графік у логарифмічних координатах (колонки 4 і 5, табл. 3).
2. Через дослідні точки проводиться апроксимуюча пряма лінія.
3. За графіком (рис. 5) визначається показник степені  $n$  (що є тангенсом кута нахилу прямої  $n = \operatorname{tg} \alpha$ ) та координату відрізка  $OB$  на осі ординат –  $B = \lg C$ .

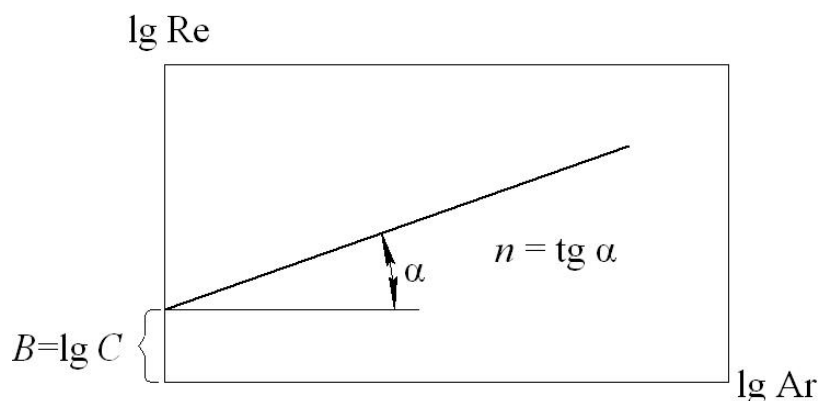


Рис. 5. Графічне визначення постійних у рівнянні (3)

### **Аналітичний метод**

Визначення постійних у рівнянні (3) здійснюється за методом найменших квадратів на ЕОМ. З цією метою необхідно розрахувати значення  $x_i = \lg Ar$  й  $y_i = \lg Re$ , а також значення  $x_i^2$  й  $x_i y_i$ . Визначають суми  $\sum x_i$ ;  $\sum y_i$ ;  $\sum (x_i)^2$  і  $\sum (x_i y_i)$ . Всі дані заносяться в таблицю 4.

Таблиця 4. Обробка дослідних даних

Режим осадження	№ п/п	Re	Ar	$x_i = \lg Ar$	$y_i = \lg Re$	$x_i^2 = (\lg Ar)^2$	$x_i y_i = \lg Ar \cdot \lg Re$
Сума							

Коефіцієнти регресії рівняння (15) розраховуються за формулами (16) і (17).

$$n = \frac{m \left( \sum_i^m x_i y_i \right) - \sum_i^m x_i \sum_i^m y_i}{m \sum_i^m x_i^2 - \left( \sum_i^m x_i \right)^2} \quad (16)$$

$$B = \frac{\sum_i^m y_i \sum_i^m x_i^2 - \sum_i^m x_i \sum_i^m x_i y_i}{m \sum_i^m x_i^2 - \left( \sum_i^m x_i \right)^2} \quad (17)$$

Тоді значення постійної  $C$  у рівнянні (3) дорівнює:  
 $C=10^B$ .

Після визначення  $n$  і  $C$  записується одержана розрахункова залежність (3). Всі ці розрахунки проводяться окремо для кожного режиму осадження.

На підставі результатів обробки будуються графіки залежності (для кожного режиму окремо), на які наносяться всі дослідні точки та проводиться апроксимуюча пряма за визначеним рівнянням. На цей же графік слід нанести пряму одержану за рівняннями (7), (8) або (9) і пояснити розбіжність.

## 5.2. Перевірка значень швидкості

Для ознайомлення з методом Лященко здійснюється перевірка вимірної швидкості осадження за допомогою графіка рис. 3. Для кожного розрахованого значення критерія Архімеда  $Ag$  (стовпець 5, табл. 3) за графіком 3 визначається відповідне значення критерія Лященко  $Ly$ . Величина швидкості осадження розраховується за відомим значенням критерія  $Ly$  з формули (11):

$$w_0 = 3 \sqrt{\frac{Ly}{\mu_p (\rho_T - \rho_p) g \cdot \rho_p^2}}.$$

Результати розрахунків заносяться в таблицю 3 і порівнюються з вимірними значеннями швидкості  $w_0$ .

## 5.3. Визначення еквівалентного діаметра

Еквівалентний діаметр часток визначається за вимірною швидкістю осадження. Для кожного значення швидкості осадження розраховується значення критерія  $Ly$ . За графіком на рис. 3 визначається відповідне значення критерія  $Ag$  та по формулі (12) обчислюється  $d_{екв}$ , що заноситься в таблицю 5.

Таблиця 5. Визначення еквівалентного діаметра

№ п/п	Діаметр кульки $d$ , м	Швидкість осадження $w_0$ , м/с	$Ly$	$Ar$	$d_{екв}$ , м



## ЛІТЕРАТУРА

1. Мікульонок І.О. Механічні, гідромеханічні й масообмінні процеси та обладнання хімічної технології: Навч. посіб. – 2-ге вид., переробл. і допов. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2002. – 304 с.

2. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М.: Химия, 1992. – 416 с.

3. Исследование кинетики процесса осаждения. Методические указания к проведению НИРС по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». Сост. Ю.М. Тананайко. – К.: КПІ, 1981. – 16 с.

### Контрольні запитання

1. Що таке швидкість осадження?
2. Які режими осадження мають місце при осадженні під дією сили тяжіння?
3. Які сили діють на частку, що падає?
4. Як зміниться швидкість осадження, якщо збільшити температуру середовища у якому вона осаджується?
5. Які фактори впливають на швидкість осадження?
6. Як знайти швидкість осадження часток неправильної форми?
7. Що таке стиснуте осадження?
8. Коли при осадженні має місце автотельний режим?