

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ № 1
«ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ РУХУ РІДИНИ»
З ДИСЦИПЛІНИ
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ»
ЗА ОСВІТНІМ РІВНЕМ «БАКАЛАВР»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ
181 – ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Затверджено на засіданні
кафедри ПАтаЗХТ.
Протокол № 1 від 28.08.2020 р

Методичні вказівки до лабораторних занять № 1 «Визначення режимів руху рідини» з дисципліни «Процеси та апарати харчових виробництв» за освітнім рівнем «Бакалавр» для студентів спеціальності 181 – Харчові технології / Укл.: Скнар Ю.Є., Гриднєва Т.В., Ляшенко А.О., Рябік П.В. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2021. – 14 с.

Укладачі: Ю.Є. Скнар, д-р хім. наук
Т.В. Гриднєва, канд. техн. наук
А.О. Ляшенко
П.В. Рябік, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск Барський В.Д., д-р техн. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки
до лабораторних занять № 1 «Визначення режимів руху рідини» з дисципліни
«Процеси та апарати харчових виробництв» за освітнім рівнем «Бакалавр» для
студентів спеціальності 181 – Харчові технології

Укладачі: СКНАР Юрій Євгенович
ГРИДНЄВА Тетяна Василівна
ЛЯШЕНКО Анна Олександрівна
РЯБІК Павло Васильович

Авторська редакція
Комп'ютерна верстка О.Г. Нефедова

Підписано до друку 21.05.21. Формат 60×84/16. Папір ксерокс. Друк різнограф.
Умов. друк. арк. 0,48. Обл.-вид. арк. 0,54. Тираж 100 прим. Зам. № 198.
Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015.

ДВНЗ УДХТУ, просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005

Редакційно-видавничий відділ

Лабораторна робота № 1

«РЕЖИМИ РУХУ РІДИН»

Мета роботи – візуально встановити характер руху рідини в трубопроводі за допомогою струменя підфарбованої рідини та порівняти з режимом руху, визначеним за критерієм Рейнольдса.

1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

В гідравліці прийнято об'єднувати рідини, гази та пару під однією назвою – *рідини*, тому що закони їх руху практично однакові.

При виведенні основних закономірностей у гідравліці вводять поняття про гіпотетичну ідеальну рідину.

Ідеальна рідина, на відміну від *реальної*, абсолютно не піддається стисканню, не змінює густини при зміні температури та не має в'язкості.

Реальні рідини поділяються на краплинні та пружні.

Краплинні рідини практично не піддаються стисканню та мають низький коефіцієнт об'ємного розширення.

Пружні рідини значно змінюють свій об'єм при зміні температури та тиску.

До краплинних рідин найчастіше відносять усі рідини, а до пружних – гази.

Густина та питома вага.

Густина (ρ , кг/м³) – це маса одиниці об'єму рідини:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.1)$$

де m – маса рідини, кг;
 V – об'єм рідини, м³.

Густина більшості рідин та всіх газів збільшується при зниженні температури.

При підвищенні тиску густина газів збільшується, водночас зміна тиску не впливає на густину рідин.

Питома вага (ν , Н/м³) – це вага одиниці об'єму рідини:

$$\nu = \frac{G}{V}, \quad (1.2)$$

де G – вага рідини, Н.

Вага дорівнює:

$$G = m \cdot g, \quad (1.3)$$

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

Тоді

$$\nu = \rho \cdot g, \quad (1.4)$$

Густина газу

За нормальних умов ($T_0 = 0^\circ\text{C} = 273\text{K}$, $P_0 = 1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$), враховуючи що 1 моль газу за нормальних умов займає 22,4 л, густину газу можна визначити (в кг/м^3):

$$\rho_0 = \frac{M}{22,4}, \quad (1.5)$$

де M – молекулярна маса газу, г/моль .

За умов, відмінних від нормальних, густину газу можна визначити за формулами

$$\rho = \rho_0 \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T}, \quad (1.6)$$

де T_0, P_0 – температура та тиск за нормальних умов;
 T, P – абсолютна температура та абсолютний тиск,

або

$$\rho = \frac{P \cdot R}{M \cdot T}, \quad (1.7)$$

де R – універсальна газова стала, $R = 8310 \text{ Дж} / (\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

В'язкість

В'язкість – властивість рідини чинити опір зусиллям, які викликають відносне переміщення її частинок.

Розрізняють динамічний (μ , $\text{Па} \cdot \text{с}$) та кінематичний (ν , $\text{м}^2/\text{с}$) коефіцієнт в'язкості.

Кінематичний коефіцієнт в'язкості визначається за формулою

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.8)$$

В'язкість краплинних рідин знижується при підвищенні температури та не залежить від тиску.

В'язкість пружних рідин (газів) збільшується при підвищенні температури та тиску.

Густина та в'язкість суміші рідин

Густина суміші рідин визначається за формулою:

$$\frac{1}{\rho_{\text{сум.р.}}} = \sum \frac{x_i}{\rho_i}, \quad (1.9)$$

де x_i – масова частка i -го компонента в суміші рідин, *доля*;
 ρ_i – густина i -го компонента в суміші рідин, кг/м^3 .

В'язкість суміші рідин визначається за формулою

$$\frac{1}{\mu_{\text{сум.р.}}} = \sum \frac{x_{vi}}{\mu_i}, \quad (1.10)$$

де x_{vi} – об'ємна частка i -го компонента в суміші рідин, *доля*;
 μ_i – в'язкість i -го компонента суміші рідин, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Густина та в'язкість суміші газів

Густина суміші газів визначається за формулою:

$$\rho_{\text{сум.г.}} = \sum y_i \rho_i, \quad (1.11)$$

де y_i – об'ємна частка i -го компонента в суміші газів, *доля*;
 ρ_i – густина i -го компонента в суміші газів, кг/м^3 .

В'язкість суміші газів визначається за формулою:

$$\frac{M_{\text{сум.г.}}}{\mu_{\text{сум.г.}}} = \sum \frac{y_i M_i}{\mu_i}, \quad (1.12)$$

де $M_{\text{сум.г.}}$ – молекулярна маса суміші газів, кг/кмоль ;
 y_i – об'ємна частка i -го компонента в суміші газів, *дол*;
 M_i – молекулярна маса i -го компонента суміші газів, кг/кмоль ;
 μ_i – в'язкість i -го компонента суміші газів, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Швидкість та витрата рідини

Швидкість руху рідини (ω , м/с) – шлях, що пройшла рідина за одиницю часу.

Витрата рідини – кількість рідини, що проходить через поперечний переріз трубопроводу за одиницю часу.

Розрізняють об'ємну (Q , $\text{м}^3/\text{с}$) та масову (M , кг/с) витрату рідини.

Об'ємна витрата рідини та швидкість пов'язані залежністю:

$$Q = \omega \cdot S, \quad (1.13)$$

де S – площа поперечного перерізу потоку рідини, м^2 .

Масова витрата визначається за формулою

$$M = Q \cdot \rho = \omega \cdot S \cdot \rho. \quad (1.14)$$

Гідравлічний радіус та еквівалентний діаметр

Якщо поперечний переріз трубопроводу не є круглим, то при розрахунках в якості визначального геометричного розміру використовують гідравлічний радіус або еквівалентний діаметр.

Гідравлічний радіус ($r_z, \text{м}$) – це відношення площі поперечного перерізу потоку рідини в трубопроводі ($S, \text{м}^2$) до змоченого периметра ($\Pi, \text{м}$):

$$r_z = \frac{S}{\Pi}, \quad (1.15)$$

Еквівалентний діаметр ($d_e, \text{м}$) дорівнює діаметру гіпотетичного трубопроводу круглого перерізу, для якого відношення площі S до змоченого периметра Π теж саме, що й для даного трубопроводу некруглого перерізу.

Еквівалентний діаметр перерізу трубопроводу розраховується за формулою

$$d_e = 4 \cdot r_z = \frac{4S}{\Pi}, \quad (1.16)$$

де S – площа поперечного перерізу потоку рідини в трубопроводі, м^2 ;
 Π – змочений периметр, м .

Якщо трубопровід круглого перерізу, то еквівалентний діаметр дорівнює діаметру трубопроводу: $d_e = d_{\text{тр}}$.

Режими руху

Однією з основних гідродинамічних характеристик потоку рідини є режим руху рідини. За допомогою даної характеристики розраховують гідравлічний опір трубопроводу, процеси тепло- та масообміну.

Якщо в потік води ввести струмінь зафарбованої рідини, то при невеликій швидкості руху потоку вона витягується в рівну лінію, яка досягає кінця труби не розмиваючись. Це свідчить про те, що шлях для всіх частинок рідини є прямолінійним.

Такий рух, при якому частинки рідини рухаються паралельними траєкторіями, називається *струминним*, або *ламінарним*.

Якщо поступово збільшувати швидкість води, то характер руху зафарбованого струменя змінюється – він набуває хвилеподібної траєкторії, а потім розмивається, змішуючись з основним потоком рідини. Це свідчить про

те, що в потоці проявляються інерційні сили, які викликають порушення упорядкованого руху.

Такий неупорядкований рух, при якому окремі частинки рідини рухаються за хаотичними траєкторіями, в той час як вся маса рідини переміщується в одному напрямку, називається *турбулентним*.

Характер течії рідини (газу) залежить не тільки від швидкості та геометричних розмірів потоку, а й від фізичних властивостей рідини, зокрема, в'язкості та густини.

Безрозмірний комплекс, що об'єднує вказані величини та числове значення якого дозволяє встановлювати режим руху рідини, називається *критерієм Рейнольдса* та визначається за формулою:

$$Re = \frac{\omega \cdot d_e \cdot \rho}{\mu} = \frac{\omega \cdot d_e}{\nu}, \quad (1.17)$$

де ω – швидкість руху рідини, м/с;
 d_e – еквівалентний діаметр, м;
 ρ – густина рідини, кг/м³;
 μ – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини, Па·с;
 ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, м²/с.

Критерій Рейнольдса є мірою співвідношення між силами в'язкості та інерції в потоці рідини, що рухається. Дане визначення є *фізичним змістом критерію Рейнольдса*.

Критерій Рейнольдса показує вплив сил тертя на рух рідини і *характеризує режим руху рідини*.

Перехід від ламінарного до турбулентного руху характеризується критичним значенням Re . Так, при русі рідини по прямим гладеньких трубах при $Re < 2320$ спостерігається *ламінарний* режим руху рідини, при $Re > 2320$ – турбулентний режим руху рідини. При $2320 < Re < 10000$ режим руху *нестійкий турбулентний* або *перехідний*. Лише при $Re > 10000$ характер течії потоку стає *стійким турбулентним*.

Розподіл швидкостей руху рідини по перерізу трубопроводу

Розглянемо рух рідини в прямому трубопроводі круглого перерізу (рис.1.). При русі рідини утворюються шари, що рухаються з різною швидкістю. Центральний шар буде рухатись з максимальною швидкістю, та при віддаленні від вісі швидкість шарів буде зменшуватись і біля стінки трубопроводу швидкість дорівнюватиме нулю.

При різних режимах руху розподілення швидкостей по перерізу різне: при ламінарному режимі руху ($Re < 2320$) має місце параболічне розподілення швидкостей, а при турбулентному ($Re > 10000$) розподілення швидкостей не є параболічним і крива буде мати більш згладжену вершину.

При різних режимах руху мають місце наступні співвідношення між середньою (ω) та максимальною (ω_{max}) швидкостями:

- при ламінарному русі – $\omega = 0,5 \omega_{max}$;
- при турбулентному – $\omega = (0,8-0,9) \omega_{max}$.

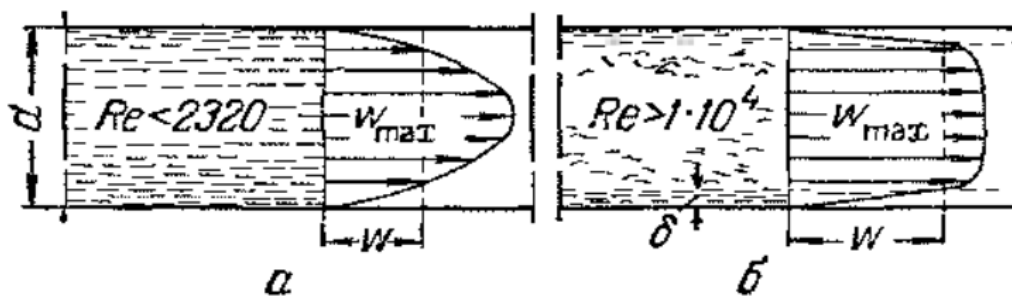


Рисунок 1 – Розподіл швидкостей при різних режимах руху:

- а) ламінарний рух;
- б) турбулентний рух

2. СХЕМА ТА ОПИС УСТАНОВКИ

Схема установки наведена на рис. 2. Установка складається із напірного бака 5, що заповнюється водою з трубопроводу. Кількість поданої у бак води регулюється вентилем 4. При надмірному заповненні вода переливається через патрубок 6. За допомогою регулюючого вентиля 11 вода подається в прозору (скляну) ділянку трубопроводу 8. Кількість води, що пройшла через трубопровід за час експерименту, визначається мірною ємністю 3 з вимірювачем рівня 2. Фарба із ємності 7 подається по капіляру 9, а її витрата регулюється вентилем 10. Температура води визначається термометром 12. Після закінчення дослідів мірна ємність спорожнюється при відкритому вентилі 1.

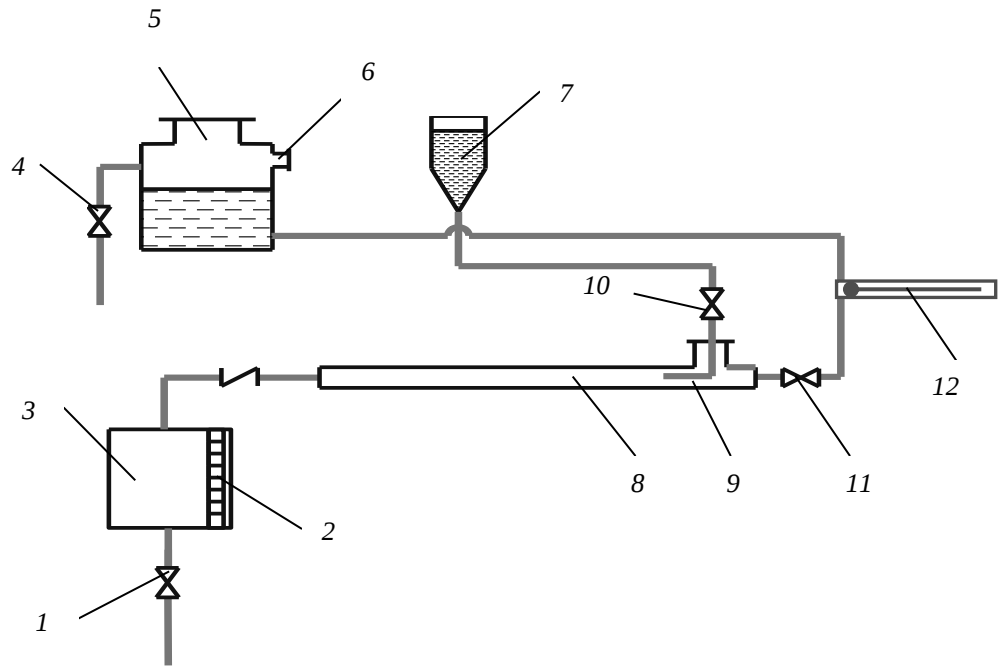


Рисунок 2 – Схема установки для визначення режиму руху рідини:
 1, 4, 10, 11 – вентиль; 2 – вимірювач рівня; 3 – мірна ємність; 5 –
 напірна ємність; 6 – патрубок; 7 – ємність з фарбою; 8 – скляний
 трубопровід; 9 – капіляр; 12 – термометр.

Таблиця 1

Дослідні та розрахункові значення параметрів

№ досліду	Дослідні значення				Довідкові значення		Розрахункові значення				
	Об'єм води в мірному бачку $V, \text{м}^3$	Час наповнення об'єму води V $\tau, \text{с}$	Температура води $t, ^\circ\text{C}$	Стан струменя фарби в потоці води	В'язкість води $\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$	Густина води $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Об'ємна витрата води $Q, \text{м}^3/\text{с}$	Площа поперечного перерізу $S, \text{м}^2$	Середня швидкість води в трубопроводі $\omega, \text{м}/\text{с}$	Значення критерію Рейнольдса Re	Режим руху рідини
1											
2											
3											
...											

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДУ

1. Наповнити водою напірну ємність 5, відкрити вентиль 11 та встановити мінімальну витрату води.
2. За допомогою вентиля 10 встановити подачу фарби тонким струменем в скляний трубопровід 8. Провести візуальне спостереження за станом струменя фарби.
3. Закрити вентиль 1 та зафіксувати об'єм рідини за певний проміжок часу за допомогою вимірювача рівня 2.
4. Термометром 12 заміряти температуру води.
5. Змінюючи витрату рідини, дослід повторюють 5-6 разів.

4. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

1. Визначити секундну витрату води, що проходить по трубопроводу, ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$Q = V / \tau, \quad (4.1)$$

де V – об'єм води у мірній ємності, м^3 ;
 τ – час наповнення, с .

2. Визначити середню швидкість руху рідини із рівняння об'ємної витрати, ($\text{м}/\text{с}$):

$$\omega = Q/S, \quad (4.2)$$

де S – площа поперечного перерізу трубопроводу, м^2 .

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4},$$

d – діаметр трубопроводу, $d = 24 \text{ мм} = 0,024 \text{ м}$.

2. За довідниковими даними (див. додаток 1 або табл. XXXIX [1]) визначити густину ρ та в'язкість води μ в залежності від температури.

4. Визначити значення критерію Рейнольдса за формулою:

$$Re = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu}. \quad (4.3)$$

5. Встановити режим руху води в залежності від значення критерія Рейнольдса:

При $Re < 2320$ – режим руху ламінарний

$2320 < Re < 10000$ – режим руху перехідний (нестійкий турбулентний)

$10000 < Re$ – режим руху турбулентний (стійкий турбулентний).

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Назва лабораторної роботи.
2. Мета роботи.
3. Схема та опис установки.
4. Таблиця даних.
5. Розрахунки.
6. Висновок.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Вказати мету роботи.
2. Що таке ідеальна та реальна рідина?
3. Що таке краплинна та пружна рідина?
4. Поняття густини та питомої ваги рідини.
5. Формули розрахунку густини газу при умовах, відмінних від нормальних. Розшифровка величин та їх розмірність.
6. Поняття в'язкості. Розмірність в'язкості.
7. Формула розрахунку кінематичного коефіцієнта в'язкості. Розшифровка величин та їх розмірність.
8. Формула розрахунку густини суміші газів. Розшифровка величин та їх розмірність.
9. Формула розрахунку густини суміші рідин. Розшифровка величин та їх розмірність.
10. Формула розрахунку динамічного коефіцієнта в'язкості суміші газів. Розшифровка величин та їх розмірність.
11. Формула розрахунку динамічного коефіцієнта в'язкості суміші рідин. Розшифровка величин та їх розмірність.
12. Вплив температури та тиску на густину та в'язкість газів.
13. Вплив температури та тиску на густину та в'язкість рідин.
14. Поняття швидкості та витрати рідини.
15. Формули розрахунку об'ємної та масової витрат рідини. Розшифровка величин та їх розмірність.
16. Поняття гідравлічного радіусу та еквівалентного діаметра.
17. Формули розрахунку гідравлічного радіусу та еквівалентного діаметра. Розшифровка величин та їх розмірність.
18. Знайти гідравлічний радіус та еквівалентний діаметр потоку для умов, запропонованих викладачем.
19. Формула розрахунку критерію Рейнольдса. Розшифровка величин та їх розмірність.
20. У чому полягає фізичний зміст критерію Рейнольдса.
21. Що характеризує критерій Рейнольдса?
22. Який рух називається ламінарним?
23. Який рух називається турбулентним?
24. Навести критичні значення числа Рейнольдса при русі рідини прямими трубами.

25. Розрахувати критерій Рейнольдса для умов, запропонованих викладачем.

26. Розподіл швидкостей при русі рідини.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Черевко О. І., Поперечний А. М.* Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник – Х.: Світ Книг, 2019. – 496 с.

2. *Ханик Я. М., Дубинін А. І., Атаманюк В. М., Станіславчук О. В.* Процес та апарати хімічних технологій. Частина І.: Навчальний посібник – Львів, Видавництво національного університету "Львівська політехніка", 2005. – 192 с.

3. *Бойко В.С., Самойчук К.О, Тарасенко В.Г. та ін.* Процеси і апарати. Гідромеханічні процеси: Підручник – Мелітополь, 2019. – 212с.

4. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / За ред. проф. І. Ф. Малежика. – К.: НУХТ, 2003.– 400 с.

5. *Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

6. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 764 с.

7. *Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З.* Процессы и аппараты химической технологи. – М.: Химия, 1969. – 848 с.

Додаток 1

Властивості води

t , °C	ρ , кг/м ³	i , кДж/кг	c , кДж/кг·K	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/м·K	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, K ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$, кг/с ²	Pr
0	1000	0	4,23	55,1	1790	1,79	-0,63	756	13,7
10	1000	41,9	4,19	57,5	1310	1,31	0,70	762	9,52
20	998	83,8	4,19	59,9	1000	1,01	1,82	727	7,02
30	996	126	4,18	61,8	804	0,81	3,21	712	5,42
40	992	168	4,18	63,4	657	0,66	3,87	697	4,31
50	988	210	4,18	64,8	549	0,556	4,49	677	3,54
60	983	251	4,18	65,9	470	0,478	5,11	662	2,98
70	978	293	4,19	66,8	406	0,415	5,70	643	2,55
80	972	335	4,19	67,5	355	0,365	6,32	626	2,21
90	965	377	4,19	68,0	315	0,326	6,95	607	1,95
100	958	419	4,23	68,3	282	0,295	7,5	589	1,75