

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ № 1–4
З КУРСУ “ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНОЇ
ТЕХНОЛОГІЇ” ДЛЯ СТУДЕНТІВ ІІІ-ІV КУРСІВ УСІХ
СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ**

Розділ “ГІДРАВЛІКА”

Дніпропетровськ УДХТУ 2008

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ № 1–4
З КУРСУ “ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ”
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ІІІ-ІV КУРСІВ УСІХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Розділ “ГІДРАВЛІКА”

Затверджено
на засіданні кафедри процесів
та апаратів хімічної технології.
Протокол № 12 від 11.06.2008.

Дніпропетровськ УДХТУ 2008

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт № 1–4 з курсу “Основні процеси та апарати хімічної технології” до розділу “Гідравліка” для студентів Ш-1У курсів усіх спеціальностей /Укл.: В.М. Задорожний, С.О. Опарін. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2008. – 22 с.

Укладачі: В.М. Задорожний, канд. техн. наук
С.О. Опарін, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск П.Г. Сорока, д-р техн. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт № 1–4 з курсу “Основні процеси та апарати хімічної технології” до розділу “Гідравліка”

Укладачі: ЗАДОРОЖНИЙ Володимир Михайлович
ОПАРІН Сергій Олександрович

Редактор Л.М. Тонкошкур
Коректор Л.Я. Гоцуцова

Підписано до друку 15.12.08. Формат 60×84 1/16. Папір ксерокс. Друк різнограф.
Умов.-друк. арк. 1,07. Обл.-вид. арк. 1,11. Тираж 80 прим. Зам. № 47.
Свідоцтво ДК № 303 від 27.12.2000.

ДВНЗ УДХТУ, 49005, Дніпропетровськ, 5, пр. Гагаріна, 8.

Видавничо-поліграфічний комплекс ІнКомЦентру

Лабораторна робота № 1

ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ РУХУ ПРОТІКАННЯ РІДИНИ

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

1.1. Основні поняття та визначення

Режим руху є найважливішою гідродинамічною характеристикою потоку рідини, без якої неможливо розрахувати гідравлічний опір трубопроводу, процеси тепло- та масообміну.

Якщо в потік води ввести струминку зафарбованої рідини, то при невеликій швидкості вона витягується в горизонтальну лінію, яка не розмиваючись, досягає кінця труби. Це свідчить про те, що шлях всіх часток рідини протікає прямолінійно.

Такий рух, при якому частинки рідини рухаються по паралельних траєкторіях, називається струминним або ламінарним.

Якщо поступово збільшувати швидкість води, то характер руху зафарбованої струминки змінюється – вона набуває хвилюподібної траєкторії, а потім розмивається, змішуючись з основним потоком рідини. Це свідчить про те, що в потоці виникають інерційні сили, які викликають порушення урядкованого руху.

Такий рух, при якому окремі частки рідини рухаються по хаотичних траєкторіях, у 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, який об'єднує вказані величини та числове значення якого дозволяє встановлювати режим руху рідини, називається критерієм Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega d_e \rho}{\mu} = \frac{\omega d_e}{\nu}, \quad (1.1)$$

де ω – швидкість руху рідини, м/с;

d_e – еквівалентний діаметр, м;

ρ – густина рідини, кг/м³;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с.

Критерій Рейнольдса є мірою співвідношення між силами в'язкості та інерції в потоці рідини, що рухається.

Критерій Рейнольдса відображає вплив сил тертя на рух рідини та характеризує відношення інерційних сил до сил тертя.

Перехід від ламінарного до турбулентного руху характеризується критичним значенням Re .

Так, при русі рідини по прямих гладких трубах $Re_{кр} \approx 2320$. При $Re < 2320$ спостерігається ламінарний режим руху рідини, при $Re > 2320$ – турбулентний характер руху. Однак при $2320 < Re < 10000$ режим руху нестійкий турбулентний або перехідний. Лише при $Re > 10000$ характер течії потоку стає стійким турбулентним.

Еквівалентний діаметр перерізу трубопроводу розраховується за формулою

$$d_e = \frac{4S}{\Pi}, \quad (1.2)$$

де S – площа поперечного перерізу потоку рідини в трубопроводі, m^2 ;

Π – змочений периметр перерізу, m .

Якщо трубопровід круглого перерізу, то еквівалентний діаметр дорівнює діаметру трубопроводу:

$$d_e = d_{тр.}$$

1.2. Опис установки

Схема установки зображена на рис. 1.1. Установка складається із напірного бака 1, який заповнюється водою з трубопроводу. Кількість поданої у бак води регулюється вентилем 12. При надмірному заповненні вода переливається через патрубок 6. За допомогою регулюючого вентиля 9 вода подається в прозору (скляну) ділянку трубопроводу 3. Кількість води, яка пройшла через трубопровід за час експерименту, визначається мірною ємкістю 4 з показником рівня 5. Фарба із ємкості 7 подається по капіляру 10, а її витрата регулюється вентилем 8.

Після закінчення досліду, відкривши вентиль 13, мірна ємкість спорожнюється.

1.3. Порядок виконання роботи

1. Наповнити водою напірну ємкість 1, доти, поки її надмір не почне переливатись через патрубок 6, відкрити вентиль 11 та за допомогою вентиля 9 встановити мінімальну витрату води на експериментальній ділянці трубопроводу 3.

2. За допомогою вентиля 8 встановити подачу фарби тонким струменем у скляний трубопровід 3. Зафіксувати результати спостережень стану струменя.

3. Закрити вентиль 13 і за показником рівня 5 зафіксувати об'єм рідини за певний проміжок часу.

4. Термометром 2 заміряти температуру води.

5. Змінюючи витрату рідини, дослід повторюють 5-6 разів.

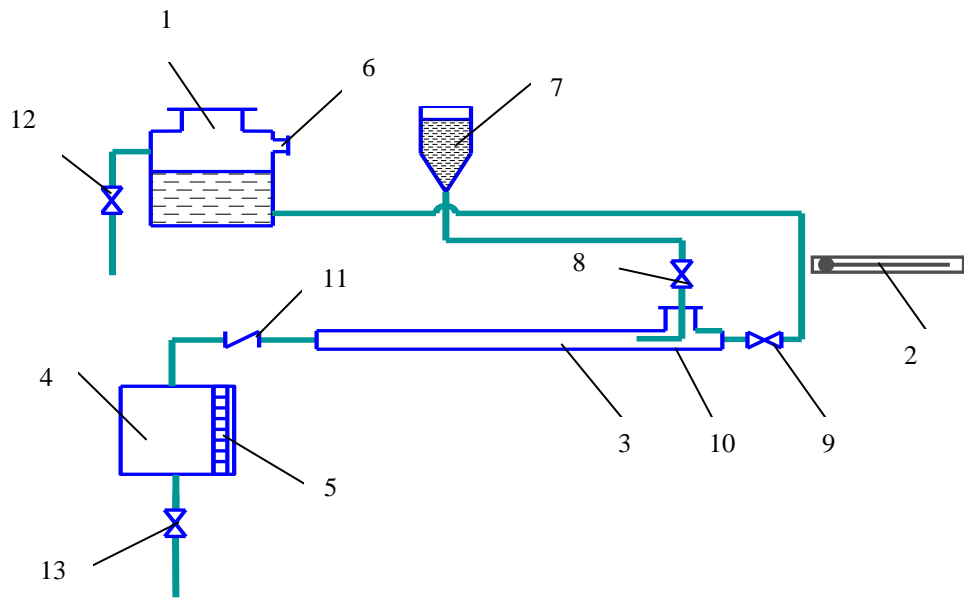


Рис. 1.1. Схема установки за визначенням режиму руху рідини:
 1 – напірний бак; 2 – термометр; 3 – скляний трубопровід;
 4 – мірна ємкість; 5 – показчик рівня; 6 – патрубок; 7 – ємкість з фарбою; 8, 9, 11, 12, 13 – вентилі; 10 – капіляр

1.4. Порядок розрахунку

1. Обчислити секундну витрату води, яка проходить по трубопроводу, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q = V / r, \quad (1.3)$$

де V – об’єм води у мірній ємкості, м^3 ;
 r – час наповнення, с.

2. Визначити середню швидкість руху рідини із рівняння об’ємної витрати:

$$Q = \omega \cdot S, \quad \omega = Q / S, \quad (1.4)$$

де S – площа поперечного перерізу, м^2 .

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

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

3. За табл. XXXIX [2] визначити густину та в’язкість рідини в залежності від температури.

4. За формулою (1.1) обчислити число Рейнольдса та встановити режим руху рідини.

Таблиця 1.1

Дослідні та розрахункові значення параметрів

№ дослідю	Об'єм рідини в мірному бачку $V, \text{ м}^3$	Час наповнення рідини $\tau, \text{ с}$	Температура води $t, ^\circ\text{C}$	Стан струменя фарби в потоці води	Об'ємна витрата рідини $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Площа поперечного перерізу $S, \text{ м}^2$	Швидкість води в трубі $\omega, \text{ м/с}$	В'язкість води $\mu, \text{ Па}\cdot\text{с}$	Густина води $\rho, \text{ кг/м}^3$	Число Рейнольдса	Режим руху рідини
1											
2											
3											

Контрольні питання

1. Мета роботи.
2. Чому вода в скляний трубопровід подається з напірного бака, а не безпосередньо з водопроводу?
3. З якою метою ємкість з фарбою розміщена на рівні напірного бака?
4. Навести формулу для розрахунку критерію Рейнольдса. Пояснити значення всіх величин.
5. У чому полягає фізичний зміст критерію Рейнольдса.
6. Показати, що критерій Рейнольдса величина безрозмірна.
7. Який рух називається ламінарним?
8. Який рух називається турбулентним?
9. Навести критичні значення числа Рейнольдса.
10. Для якого трубопроводу величина Re більша – прямого чи вигнутого (змійовика)? Відповідь пояснити.
11. Як впливає на величину Re неізотермічність потоку?
12. Рівняння витрати рідини. Середня швидкість. Рекомендовані значення швидкості рідин.
13. Розподіл швидкостей по поперечному перерізу трубопроводу при ламінарному та турбулентному режимі руху.
14. Чи однакові режими руху в ядрі потоку та біля стінки? Який режим руху більш доцільний у трубопроводах та апаратах? Відповідь пояснити.
15. Яке співвідношення між максимальною та середньою швидкостями при різних режимах руху?
16. Поняття гідравлічного радіусу та еквівалентного діаметра.
17. Знайти еквівалентний діаметр потоку, запропонованого викладачем.
18. Поняття густини та питомої ваги. Як розрахувати густину газу? Суміші газів?
19. Навести формулу для розрахунку густини суміші рідин.
20. Навести формулу для розрахунку густини суспензій.
21. Поняття в'язкості. Закон внутрішнього тертя Ньютона.
22. Коефіцієнт динамічної в'язкості. Кінематична в'язкість. Розмірності в'язкості.
23. Навести та пояснити формулу для розрахунку в'язкості суміші газів. Вплив температури та тиску на в'язкість газів.
24. Навести та пояснити формулу для розрахунку в'язкості суміші рідин. Вплив температури та тиску на в'язкість рідин.
25. Навести та пояснити формулу для розрахунку в'язкості суспензій.
26. Розрахувати критерій Re для умов, запропонованих викладачем.

Лабораторна робота № 2

РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ

Мета роботи – на основі рівняння Бернуллі визначити швидкість руху рідини за показаннями гідрометра і п'єзометра та порівняти зі швидкостями, розрахованими за рівнянням нерозривності потоку; графічно зобразити напори, які входять у рівняння Бернуллі.

2.1. Основні поняття та визначення

Одним із найбільш важливих рівнянь гідродинаміки є рівняння Бернуллі, за допомогою якого вирішують цілий ряд практичних задач: швидкість потоку, його витрату, тиск, напір, час витікання рідини із резервуарів та багато інших.

Для 2-х поперечних перерізів потоку рівняння Бернуллі має вигляд:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g}, \quad (2.1)$$

де Z_1, Z_2 – геометричний напір або нівелірна висота;

$P_1/\rho g, P_2/\rho g$ – статичний або п'єзометричний напір;

$\frac{\omega_1^2}{2g}, \frac{\omega_2^2}{2g}$ – швидкісний або динамічний напір, м (Дж/Н).

Згідно з рівнянням Бернуллі для сталого руху ідеальної рідини сума статичного та динамічного напорів, які дорівнюють гідродинамічному напору, не змінюється при переході від одного поперечного перерізу потоку до другого.

Всі напори можуть бути виражені, як в одиницях довжини так і в одиницях питомої енергії, яка приходить на одиницю ваги рідини.

Якщо помножити і поділити розмірність напору (м) на одиницю ваги (Н), то отримаємо: $\frac{м \cdot Н}{Н} = \frac{Дж}{Н}$. Тому рівняння Бернуллі в енергетичному розумінні може бути виражено як закон збереження енергії потоку: при сталому режимі руху ідеальної рідини сума потенціальної $(Z + \frac{P}{\rho g})$ та кінетичної енергії $(\frac{\omega^2}{2g})$ для кожного поперечного перерізу потоку залишається незмінною.

Для горизонтального трубопроводу $Z_1 = Z_2$ і рівняння Бернуллі спрощується:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g}. \quad (2.2)$$

У випадку реальної рідини у праву частину рівняння додаємо втрачений напір ($h_{вт}$):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} + h_{вт}. \quad (2.3)$$

Втрачений напір характеризує питому енергію, яка затрачується на подолання гідравлічного опору при русі реальної рідини.

Напори, які входять у рівняння Бернуллі, можна заміряти за допомогою гідрометрів та п'езометрів. П'езометри показують статичний напір, а гідрометри – суму статичного та динамічного напорів, тобто гідродинамічний напір.

2.2. Опис установки

Схема установки за вивченням рівняння Бернуллі (рис. 2.1) складається з напірного бака 1, трубопроводу змінного перерізу 3, до і після якого встановлені вентилі 2 та 7, мірної ємкості 4 з вентилям 8. На кожній ділянці трубопроводу (I, II, III, IV) встановлено гідрометр 5 та п'езометр 6.

2.3. Порядок виконання роботи

1. Відкрити вентиль 7, звільняючи досліджений трубопровід і приєднані до нього гідрометри та п'езометри від бульбашок повітря.

2. Регулюючи вентилям 2, через який рідина заповнює ділянку трубопроводу, що досліджується, встановити витрату рідини, достатню для спостереження рівнів у гідрометрах та п'езометрах.

3. Закрити вентиль 8 на виході із мірної ємкості і заміряти об'єм наповненої рідини за певний проміжок часу.

4. Зафіксувати показаннями гідрометра 5 та п'езометра 6 на кожній ділянці трубопроводу.

2.4. Порядок розрахунку

1. Обчислити значення швидкісного напору ($H_{шв}$) за різницею показань гідрометра (H_z) та п'езометра (H_n) для кожної ділянки:

$$H_{шв} = \frac{\omega_{max}^2}{2g} = H_z - H_n. \quad (2.4)$$

2. Визначити значення швидкостей по центру поперечного перерізу ділянки трубопроводу

$$\omega_{max} = \sqrt{2gH_{шв}}. \quad (2.5)$$

3. Розрахувати об'ємну витрату рідини, як відношення об'єму рідини (V) в мірній ємкості до часу її наповнення (τ):

$$Q = V/\tau. \quad (2.6)$$

4. Обчислити на кожній ділянці трубопроводу середню швидкість руху рідини, використовуючи рівняння нерозривності потоку:

$$Q = Q_i = \text{const}, \quad (2.7)$$

де Q_i – витрата рідини в i -му перерізі, м³/с.

Так як

$$Q_i = \omega_i \cdot S_i, \quad (2.8)$$

де ω_i – середня швидкість руху рідини в i -му перерізі, м/с,

та враховуючи, що $Q = Q_i$, отримаємо:

$$\omega_i = \frac{Q}{S_i}, \quad (2.9)$$

де S_i – площа i -го поперечного перерізу, м².

Площа i -го поперечного перерізу:

$$S_i = \frac{\pi d_i^2}{4}, \quad (2.10)$$

де d_i – діаметр i -го поперечного перерізу, м.

$$d_1 = 44 \text{ мм} = 0,044 \text{ м}; \quad d_2 = 24 \text{ мм} = 0,024 \text{ м};$$

$$d_3 = 42 \text{ мм} = 0,042 \text{ м}; \quad d_4 = 64 \text{ мм} = 0,064 \text{ м}.$$

5. За показаннями гідрометрів та п'єзометрів для кожного перерізу будують у масштабі графік зміни напорів, які входять у рівняння Бернуллі (рис. 2.2).

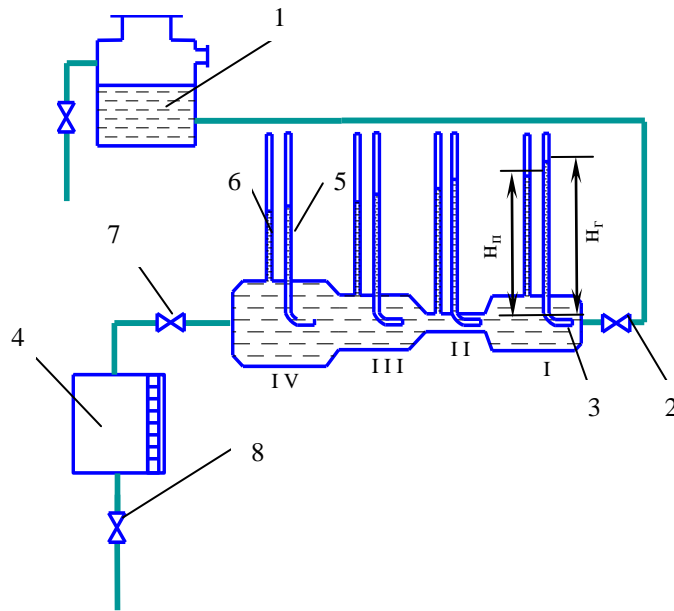


Рис. 2.1. Схема установки з вивчення рівняння Бернуллі:
 1 – напірний бак, 2, 7, 8 – вентиль; 3 – трубопровід змінного перерізу;
 4 – мірна ємкість; 5 – гідрометр; 6 – п’езометр

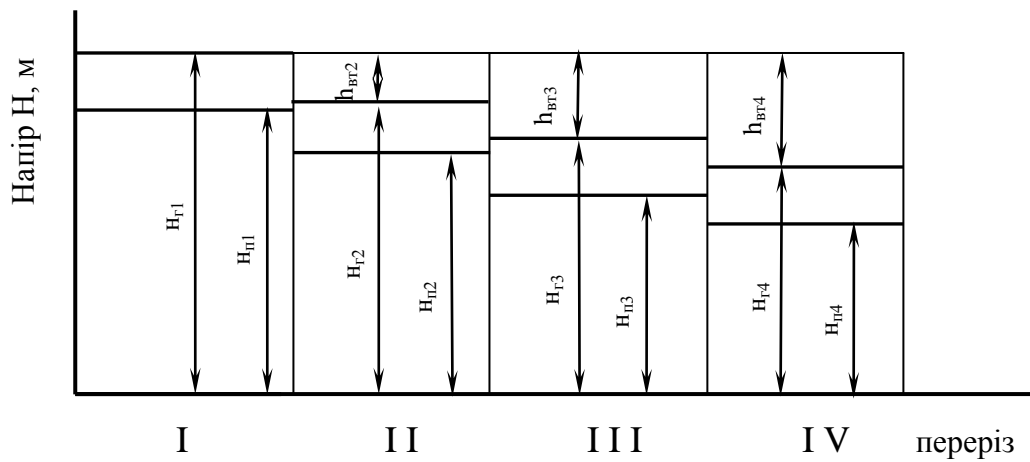


Рис. 2.2. Графік напорів, які входять у рівняння Бернуллі

Таблиця 2.1.

Дослідні та розрахункові значення параметрів

№ перерізу	Показання гідрометричної трубки H_r , м	Показання п'єзометричної трубки H_p , м	Об'єм рідини в мірному бачку V , м ³	Час наповнення рідини τ , с	Швидкісний напір $H_{шв}$, м	Швидкість потоку по центру ω_{\max} , м/с	Об'ємна витрата рідини Q , м ³ /с	Площа поперечного перерізу трубопроводу S , м ²	Середня швидкість потоку $\omega_{\text{ср}}$, м/с
I									
II									
III									
IV									

Контрольні питання

1. Мета роботи.
2. Навести та пояснити напори рівняння Бернуллі для ідеальної рідини.
3. З якою метою введено поняття «ідеальна рідина»? В чому його особливість?
4. Який потік називають «сталим»? Для яких процесів він характерний.
5. Як впливає на повний гідродинамічний напір висота розміщення напірного баку поз. 9? Як зміниться напір, якщо перекрити вентиль поз. 7?
6. Що характеризує нівелірна висота, та яку енергію потоку вона виражає?
7. Що характеризує п'єзометричний напір та яку енергію потоку він виражає?
8. Що характеризує динамічний напір та яку енергію потоку він виражає?
9. Навести рівняння Бернуллі для горизонтального трубопроводу. Як воно зміниться, якщо трубопровід однакового діаметра.
10. Навести рівняння Бернуллі для похилого трубопроводу реальної рідини.
11. Який напір показує гідрометрична трубка? Як зміняться її показання, якщо потік стане нерухомим?
12. Зобразити графічно напори рівняння Бернуллі для реальної рідини.
13. Навести рівняння Бернуллі в одиницях тиску.
14. В яке рівняння перетвориться рівняння Бернуллі, якщо швидкість потоку стане рівною 0?
15. Як знайти швидкість потоку за показаннями гідрометра та п'єзометра?
16. Назвати причини, із-за яких виникає втрачений напір.
17. В який вид енергії переходить втрачений напір?
18. Навести та пояснити рівняння суцільності потоку.
19. Для якої практичної мети застосовується рівняння суцільності потоку?
20. Будова трубки Піто-Прандтля. Для якої мети застосовується?
21. Будова мірної діафрагми. Для якої мети застосовується?
22. В яких випадках застосовують мірні сопла та труби Вентурі.
23. Пояснити фізичний зміст рівняння Бернуллі.
24. Пояснити енергетичний зміст рівняння Бернуллі.

Лабораторна робота № 3

ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТИ НАПОРУ В ПРЯМОЛІНІЙНОМУ ВІДРІЗКУ КРУГЛОЇ ТРУБИ

Мета роботи – визначити дослідним шляхом втрачений напір у прямолінійному відрізку труби та порівняти з показниками, розрахованими за емпіричними залежностями.

3.1. Основні поняття та визначення

При переміщенні реальних рідин починають діяти сили внутрішнього тертя, зумовлені в'язкістю і сили тертя між рідиною та стінкою труби. Ці сили викликають опір рухові рідини.

Визначення втраченого напору або тиску є важливою практичною задачею, яка пов'язана з розрахунком енергії на переміщення рідини або газу з допомогою насосів, компресорів і т. ін.

Втрати напору в трубопроводі визначені опором тертя h_{mp} та місцевими опорами $h_{м.о.}$.

$$h_{em} = h_{mp} + h_{м.о.} \quad (3.1)$$

Опір тертя виникає при рухові реальної рідини по всій довжині трубопроводу і визначається за формулою

$$h_{mp} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2g}, \quad (3.2)$$

де λ – коефіцієнт тертя;

ℓ – довжина трубопроводу, м;

d – діаметр трубопроводу, м;

ω – середня швидкість потоку, м/с.

У залежності від режиму руху для гідравлічно гладких труб λ знаходиться за такими виразами:

$$\text{При ламінарному режимі: } \lambda = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (3.3)$$

$$\text{При турбулентному режимі: } \lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}}. \quad (3.4)$$

Для шорстких труб застосовують рівняння:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg \left[\frac{\varepsilon}{3,7} + \left(\frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} \right], \quad (3.5)$$

де ε – відносна шорсткість стінок трубопроводу.

Коефіцієнт тертя для горизонтального трубопроводу однакового діаметру для 2-х поперечних перерізів має вигляд:

$$\frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_2}{\rho g} + h_{em}, \quad (3.6)$$

звідки:

$$h_{em} = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} = h_1 - h_2, \quad (3.7)$$

де h_1, h_2 – покази п'єзометрів, м.

Таким чином, враховуючи, що на прямому відрізку трубопроводу відсутні місцеві опори, втрачений напір слід розглядати тільки як втрати на тертя:

$$h_{вт} = h_{тр}. \quad (3.8)$$

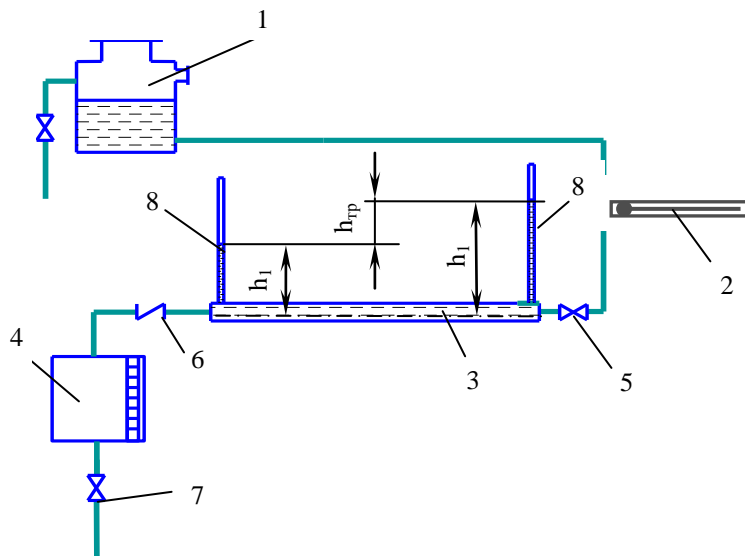


Рис. 3.1. Схема установки за визначенням втрати напіру на тертя:
 1 – напірний бак; 2 – термометр; 3 – трубопровід; 4 – мірна ємкість;
 5, 6, 7 – вентиль; 8 – п'єзометр

3.2. Опис установки

Схема установки за визначенням втрати напіру на тертя в прямолінійному відрізку труби надана на рис. 3.1.

Установка складається з напірного баку 1, прямолінійного відрізка трубопроводу 3, на початку та в кінці якого встановлені п'єзометри 8, регулюючих вентилів 5, 6, 7, мірної ємкості 4 та термометра 2.

3.3. Порядок виконання роботи

1. Відкрити вентиль 6 та закрити вентиль 7.
2. Перевірити нульові значення рівнів у п'єзометрах 8.
3. За допомогою вентилів 5 встановити витрату рідини в трубопровід, яка достатня для спостереження різниці рівнів у п'єзометрах 8.
4. При закритому вентилі 7 заміряти об'єм наповненої рідини у мірному баку 4 за певний проміжок часу.
5. Термометром 8 зафіксувати температуру води.
6. Положення вентилів 5 змінюють 3-4 рази, фіксуючи напори в п'єзометрах, об'єм наповненої рідини, час її наповнення та температуру.

3.4. Порядок розрахунку

1. Визначити дослідний втрачений напір за формулою (3.11).
2. Розрахувати об'ємну витрату рідини, як відношення об'єму рідини (V) в мірній ємкості до часу її наповнення (τ):

$$Q = V/\tau. \quad (3.12)$$

3. Визначити середню швидкість потоку:

$$\omega_{cp} = \frac{Q}{S}, \quad (3.13)$$

де S – площа поперечного перерізу, m^2 .

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

діаметр трубопроводу – $d = 16 \text{ мм} = 0,016 \text{ м}$.

4. За формулою (3.2) обчислити дослідний коефіцієнт тертя:

$$\lambda_{\partial} = \frac{2gh_{mp} \cdot d}{\ell \cdot \omega^2}, \quad (3.14)$$

де ℓ – довжина відрізка труби, $\ell = 1,9 \text{ м}$.

5. У залежності від критерію Рейнольдса за формулами (3.3), (3.4) або (3.5) та рис. 1.5 [2] визначити розрахунковий коефіцієнт тертя (λ_p).

6. За розрахунковим коефіцієнтом тертя знайти втрачений напір за формулою (3.2).

Таблиця 3.1

Дослідні і розрахункові параметри

№ дослідю	Показання п'езометрів		Об'єм рідини в мірному бачку $V, \text{ м}^3$	Час наповнення рідини $\tau, \text{ с}$	Температура води, $t, \text{ }^\circ\text{C}$	Об'ємна витрата рідини $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Площа перерізу трубопроводу $S, \text{ м}^2$	Середня швидкість $\omega_{\text{ср}}, \text{ м/с}$	Дослідний втрачений напір $h_0, \text{ м}$	Дослідний коефіцієнт тертя λ_0	Число Рейнольдса, Re	Розрахунковий коефіцієнт тертя λ_p	Розрахунковий втрачений напір, $h_p, \text{ м}$
	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$											
1													
2													
3													
4													

Контрольні питання

1. Вказати, яка мета роботи.
2. Для якої мети розраховують втрачений напір?
3. Показати на прикладі рівняння Бернуллі, що різниця рівнів п'езометрів показує втрачений напір.
4. Навести та пояснити формулу для розрахунку втраченого напору на тертя?
5. Навести та пояснити формулу для розрахунку втраченого тиску на тертя?
6. Який з параметрів потоку найбільшою мірою впливає на втрачений напір?
7. Пояснити поняття «гідравлічно гладка труба», «гідравлічно шорстка труба».
8. Пояснити поняття «шорсткість трубопроводу». Абсолютна та відносна шорсткість.
9. Як знаходиться коефіцієнт тертя для гідравлічно гладких труб?
10. Навести рівняння для розрахунку коефіцієнта тертя в шорстких трубах.
11. Від яких параметрів залежить коефіцієнт тертя в зоні гладкого тертя?
12. Від яких параметрів залежить коефіцієнт тертя в зоні змішаного тертя?
13. У чому полягає особливість автотурбулентного режиму?
14. Показати, як знайти коефіцієнт тертя по графіку рис. 1.5 [2]?
15. В яку форму переходить енергія потоку, втраченого на тертя?
16. Запропонуйте, яким чином можна знизити втрати напору на тертя.
17. Чи впливає зміна температури потоку на коефіцієнт тертя? Відповідь пояснити.
18. Як зміниться рівняння (3.4), якщо знехтувати шорсткістю стінок труб?
19. Як зміниться рівняння (3.4) для автотурбулентного режиму?
20. Навести формулу для розрахунку дослідного коефіцієнта тертя.

Лабораторна робота № 4

ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТИ НАПОРУ НА МІСЦЕВІ ОПОРИ

Мета роботи – визначити дослідним шляхом втрату напору на місцеві опори та порівняти з теоретичним втраченим напором, визначеним за довідниковим коефіцієнтом місцевого опору.

4.1. Основні поняття та визначення

Місцеві опори виникають при зміні швидкості або напрямку потоку. Так при зміні швидкості в потоці рідини виникають удари, які призводять до появи зворотної течії – вихорів або застійних зон, а при зміні напрямку потоку починають проявлятися інерційні сили. В обох випадках ці явища призводять до зменшення напору потоку.

Експериментальний втрачений напір можна визначити за різницею показань п'езометрів, встановлених до і після місцевого опору:

$$h_{\text{м.о.}} = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}, \text{ м.} \quad (4.1)$$

4.2. Опис установки

Установка для визначення втрати напору на місцевих опорах надана на рис. 4.1 та складається з напірного бака 1, експериментального трубопроводу, на якому розміщені місцеві опори *a*, *b*, *c*, *d*, вентилів 3, 5, 6, 7, п'єзометрів 8, встановлених до і після кожного опору, мірної ємкості 4 та термометра 2.

4.3. Порядок виконання роботи

1. Відкрити вентиль 6. Перевірити нульові значення рівнів у п'єзометрах 8.
2. Закрити вентиль 7.
3. Вентилем 3 встановити витрату рідини, яка достатня для спостереження різниці рівнів у п'єзометрах 8.
4. Зафіксувати показання п'єзометрів та термометра 2.
5. Заміряти об'єм наповненої рідини у мірному баку 4 за певний проміжок часу.
6. Положення вентиля 3 змінюють 3–4 рази, фіксуючи напір у п'єзометрах, об'єм рідини, час її наповнення та температуру.

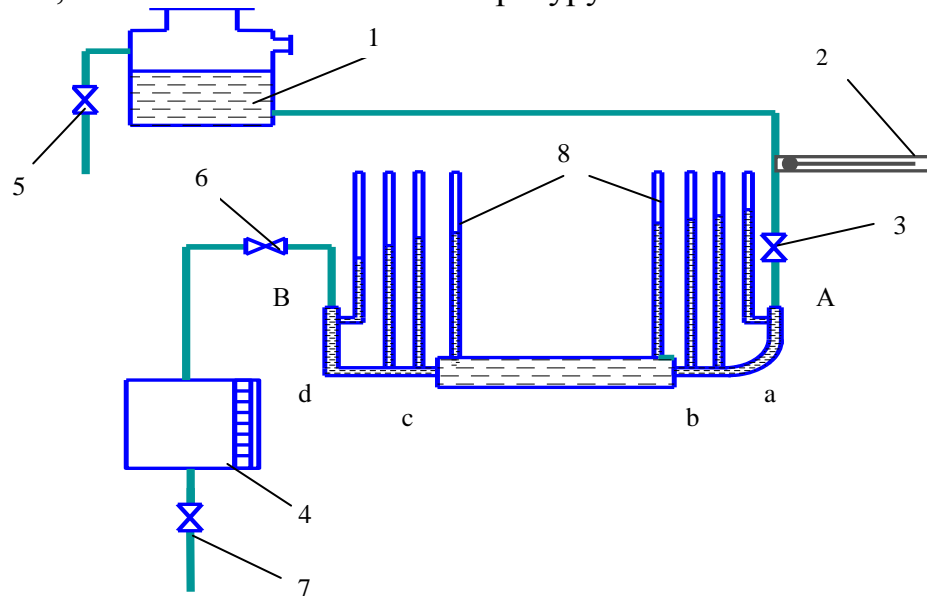


Рис. 4.1. Схема установки за визначенням втрати напору на місцеві опори:
1 – напірний бак; 2 – термометр, 3, 5, 6, 7 – вентиль;
8 – п'єзометри; 4 – мірна ємкість

4.4. Порядок розрахунку

1. Знайти об'ємну витрату рідини, як відношення об'єму рідини в мірній ємкості (V) до часу її наповнення (τ) м³:

$$Q = V/\tau. \quad (4.2)$$

2. Визначити середнє значення середньої швидкості у звуженій та розширеній частині трубопроводу:

$$\omega_1 = \frac{Q}{S_1}, \quad \omega_2 = \frac{Q}{S_2}, \quad (4.3)$$

де S_1, S_2 – площі поперечних перерізів звуженої та розширеної частини, відповідно.

Площі поперечних перерізів:

$$S_1 = \frac{\pi d^2}{4}, \quad S_2 = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (4.4)$$

де d, D – діаметри поперечних перерізів звуженої та розширеної частин трубопроводу, $d = 16 \text{ мм} = 0,016 \text{ м}$, $D = 50 \text{ мм} = 0,05 \text{ м}$.

3. Визначити значення швидкісних напорів у звуженій та розширеній частинах трубопроводу:

$$h_{шв1} = \frac{\omega_1^2}{2g}, \quad h_{шв2} = \frac{\omega_2^2}{2g}. \quad (4.5)$$

4. Розв'язуючи рівняння Бернуллі для кожного місцевого опору, отримаємо залежності для розрахунку дослідного втраченого напору:

– для відводу:

$$h_{\partial 1} = h_1 - h_2, \quad (4.6)$$

– для раптового розширення:

$$h_{\partial 2} = \left(h_1 + \frac{\omega_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{\omega_2^2}{2g} \right), \quad (4.7)$$

– для раптового звуження:

$$h_{\partial 3} = \left(h_1 + \frac{\omega_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{\omega_2^2}{2g} \right), \quad (4.8)$$

– для коліна:

$$h_{\partial 4} = h_1 - h_2. \quad (4.9)$$

5. Обчислити значення критерію Рейнольдса при мінімальній швидкості (ω_1) та визначити відношення площ перерізу:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{d^2}{D^2}. \quad (4.10)$$

6. У залежності від виду опору знайти за табл. XIII [2] теоретичний коефіцієнт місцевого опору.

7. За рівнянням (4.1) визначити теоретичні втрати напору на кожному опорі та порівняти їх з дослідними.

Дослідні та розрахункові значення

Назва місцевого опору	Показання п'єзометрів		Об'єм рідини в мірному бачку $V, \text{ м}^3$	Час наповнення рідини $\tau, \text{ с}$	Температура води $t, \text{ }^\circ\text{C}$	Об'ємна витрата рідини $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Площа перерізу		Середня швидкість		Швидкісний напір		Дослідний втрачений напір $h_{\text{д}}, \text{ м}$	Число Рейнольдса Re	Відношення площ перерізу F_1/F_2	Теоретичний коефіцієнт місцевого опору $\xi_{\text{м.о}}$	Теоретичний втрачений напір $h_{\text{т}}, \text{ м}$
	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$					$S_1, \text{ м}^2$	$S_2, \text{ м}^2$	$\omega_1, \text{ м/с}$	$\omega_2, \text{ м/с}$	$h_{\text{шв1}}, \text{ м}$	$h_{\text{шв2}}, \text{ м}$					
Відв' (R_0/c)																	
Раптове розширення																	
Раптове звуження																	
Коліно																	

Контрольні питання

1. Мета роботи.
2. Коли виникають місцеві опори в трубопроводах та апаратах?
3. Навести та зобразити приклади місцевих опорів.
4. Як знайти експериментально втрати напору на відводі 90^0 ? Відповідь обґрунтувати за допомогою рівняння Бернуллі.
5. Як знайти експериментально втрати напору на раптовому розширенні (звуженні). Відповідь обґрунтувати за допомогою рівняння Бернуллі.
6. Навести та пояснити вираз для розрахунку втрати напору на місцевому опорі.
7. Що називають коефіцієнтом місцевого опору? Фізичний зміст.
8. Внаслідок чого відбуваються втрати напору при раптовому розширенні труби?
9. Внаслідок чого відбуваються втрати напору при раптовому звуженні труби?
10. Які сили зумовлюють втрати напору при зміні напрямку руху потоку.
11. Назвати величини, від яких залежить втрачений напір на місцевому опорі.
12. Як знайти коефіцієнти місцевого опору відводу?
13. Як знайти коефіцієнти місцевого опору раптового розширення (звуження)?
14. Як знайти коефіцієнти місцевого опору діафрагми?
15. На що втрачається енергія потоку при раптовому розширенні або звуженні?
16. Навести вираз для розрахунку втрати тиску на місцевому опорі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 750 с.
2. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 575 с.