

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ № 1 – 4

ДО РОЗДІЛУ «ГІДРАВЛІКА»

З ДИСЦИПЛІНИ «ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ
ХІМІКО-ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»

ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ

226 – «ФАРМАЦІЯ»

Затверджено на засіданні
кафедри процесів, апаратів
та загальної хімічної технології
Протокол № 10 від 22.06.2016

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт № 1 – 4 до розділу «Гідравліка» з дисципліни «Процеси та апарати хіміко-фармацевтичних виробництв» для студентів спеціальності 226 – «Фармація» / Укл. С.О. Опарін, Т.В. Гриднєва, П.В. Рябік. – Д.: ДВНЗ УДХТУ. – 2017. – 39 с.

Укладачі: С.О. Опарін, канд. техн. наук
Т.В. Гриднєва
П.В. Рябік, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск О.В. Кравченко, д-р техн. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки

вказівки до виконання лабораторних робіт № 1 – 4 до розділу «Гідравліка» з дисципліни «Процеси та апарати хіміко-фармацевтичних виробництв» для студентів спеціальності 226 – «Фармація»

Укладачі: ОПАРІН Сергій Олександрович
ГРИДНЄВА Тетяна Василівна
РЯБІК Павло Васильович

Редактор О.Г. Нефедова
Комп'ютерна верстка О.Г. Нефедова

Підписано до друку 30.10.17. Формат 60×84/16. Папір ксерокс. Друк різнограф.
Умов. друк. арк. 1,64. Обл.-вид. Арк. 1,69. Тираж 100 прим. Зам. № 148.
Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015.

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

Редакційно-видавничий відділ

Лабораторна робота № 1

ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ РУХУ ПРОТІКАННЯ РІДИНИ

Мета роботи – візуально встановити 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

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:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.1.1)$$

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

Густина рідин та газів збільшується при зниженні температури.

При підвищенні тиску густина газів збільшується. Зміна тиску не впливає на густину рідин.

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

$$\nu = \frac{G}{V}, \quad (1.1.2)$$

де G – вага рідини, Н.

Так як вага

$$G = m \cdot g, \quad (1.1.3)$$

Тоді

$$\nu = \rho \cdot g, \quad (1.1.4)$$

Густина газу

За нормальних умов ($T_0=0^{\circ}C=273K$, $P_0=1атм=1,013\cdot10^5Па$), враховуючи що 1моль газу за нормальних умов займає 22,4л, густину газу можна визначити:

$$\rho_0 = \frac{M}{22,4}, \quad (1.1.5)$$

де M – молекулярна маса газу, г/моль.

За відмінних від нормальних умов густину газу можна визначити за формулами

$$\rho = \rho_0 \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T}, \quad (1.1.6)$$

де T_0, P_0 – температура та тиск при нормальних умовах;
 T, P – абсолютна температура та абсолютний тиск.

Або

$$\rho = \frac{P \cdot R}{M \cdot T}, \quad (1.1.7)$$

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

В'язкість

В'язкість – властивість рідини чинити опір зусиллям, які викликають відносно переміщення її часток.

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

Кінематичний коефіцієнт в'язкості визначається за формулою

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (1.1.8)$$

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

$$\frac{1}{\rho_{\text{сум.р.}}} = \sum \frac{x_i}{\rho_i}, \quad (1.1.9)$$

де x_i – масова частка i -го компонента рідини в суміші, дол.;

ρ_i – густина i -го компонента рідини в суміші, кг/м^3 .

В'язкість суміші рідин визначається за формулою

$$\frac{1}{\mu_{\text{сум.р.}}} = \sum \frac{x_{oi}}{\mu_i}, \quad (1.1.10)$$

де x_{oi} – об'ємна частка i -го компонента рідини в суміші, дол;
 μ_i – в'язкість i -го компонента рідини в суміші, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Густина та в'язкість суміші газів

Густина суміші газів визначається за формулою

$$\rho_{\text{сум.г}} = \sum y_i \rho_i, \quad (1.1.11)$$

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

В'язкість суміші газів визначається за формулою

$$\frac{M_{\text{сум.г}}}{\mu_{\text{сум.г}}} = \sum \frac{y_i M_i}{\mu_i}, \quad (1.1.12)$$

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

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:

$$Q = \omega \cdot S, \quad (1.1.13)$$

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

Масова витрата визначається за формулою

$$M = Q \cdot \rho = \omega \cdot S \cdot \rho, \quad (1.1.14)$$

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 ($r_z, м$) – це відношення площі поперечного перерізу трубопроводу ($S, м^2$), через який протікає рідина, до змоченого периметра ($\Pi, м$):

$$r_z = \frac{S}{\Pi}, \quad (1.1.15)$$

Еквівалентний діаметр ($d_e, м$) дорівнює діаметра 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

$$d_e = 4 \cdot r_z = \frac{4S}{\Pi}, \quad (1.1.16)$$

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

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

Режими руху

Однією з основних гідродинамічних характеристик потоку рідини є режим руху. 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 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 паралельними траєкторіями, називається *струмінним*, або *ламінарним*.

Якщо поступово збільшувати швидкість води, то характер руху зафарбованого струменя змінюється – вона набуває хвилеподібної траєкторії, а потім розмивається, змішуючись з основним потоком рідини. Це свідчить про те, що в потоці проявляються інерційні сили, що викликають порушення упорядкованого руху.

Такий неупорядкований рух, при якому окремі частки рідини рухаються 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*:

$$Re = \frac{\omega \cdot d_e \cdot \rho}{\mu} = \frac{\omega \cdot d_e}{\nu}, \quad (1.1.17)$$

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. Дане визначення є *фізичним змістом критерію Рейнольдса*.

Критерій Рейнольдса демонструє 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 гладких трубах при $Re < 2320$ спостерігається *ламінарний* режим руху рідини, при $Re > 2320$ – турбулентний характер руху. Проте при $2320 < Re < 10000$ режим руху *нестійкий турбулентний або перехідний*. Лише при $Re > 10000$ характер течії потоку стає *стійким турбулентним*.

Розподіл швидкостей

Розглянемо рух рідини в прямому трубопроводі круглого перерізу (рис.1.1.). 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.

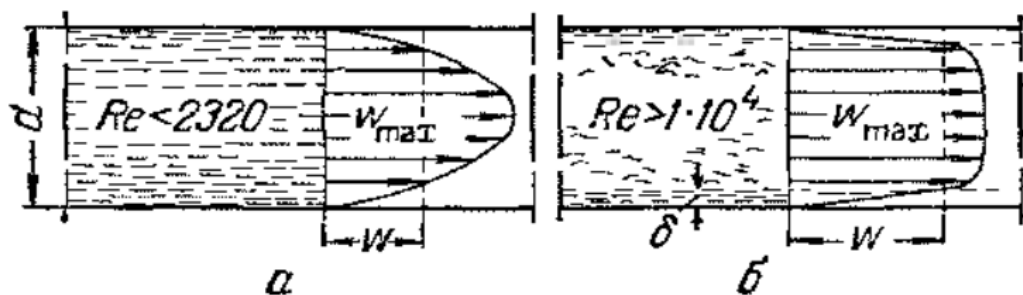


Рисунок 1.1 – Розподіл швидкостей при різних режимах руху:

- а) ламінарний рух;
- б) турбулентний рух

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 широку 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 – $\omega = (0,8-0,9) \omega_{max}$.

1.2. Опис установки

Схема установки подана на рис. 1.2. 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 показником рівня 2. Фарба із ємності 7 подається по капіляру 9, а її витрата регулюється вентилем 10. Температура води визначається термометром 12. Після закінчення дослідів, відкривши вентиль 1, мірна ємність спорожнюється.

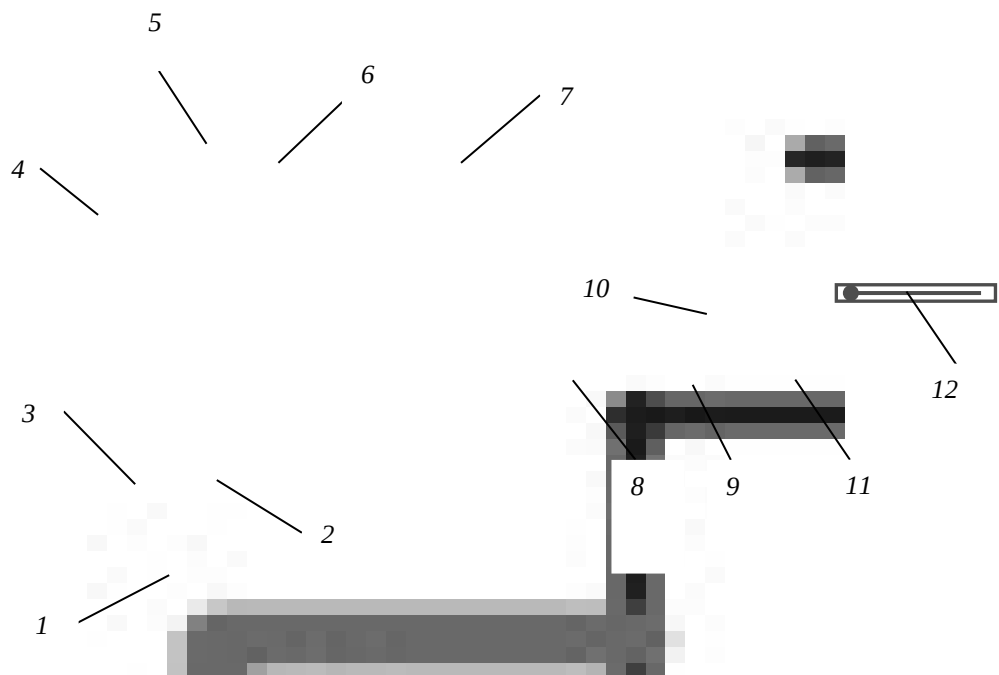


Рисунок 1.2 – Схема установки по визначенню режиму руху рідини:
1, 4, 10, 11 – вентиль; 2 – показчик рівня; 3 – мірна ємність; 5 – напірна ємність; 6 – патрубок; 7 – ємність з фарбою; 8 – скляний трубопровід; 9 – капіляр; 12 – термометр.

Дослідні та розрахункові значення параметрів

[illegible]

.3. Порядок виконання роботи

1. Наповнити водою напірну ємність 1, доти вона не почне переливатись через патрубок 6, відкрити вентиль 11 та за допомогою вентиля 9 встановити мінімальну витрату води на експериментальній скляній ділянці трубопроводу 3.
2. За допомогою вентиля 10 встановити подачу фарби тонким струменем в скляний трубопровід 8. Зафіксувати результати спостережень стану струменя.
3. Закрити вентиль 1 і за показчиком рівня 2 зафіксувати об'єм рідини за певний проміжок часу.
4. Термометром 12 заміряти температуру води.
5. Змінюючи витрату рідини, дослід повторюють 5-6 разів.

1.4. Порядок розрахунку

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

$$Q = V / \tau, \quad (1.4.1)$$

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, (м/с):

$$\omega = Q/S, \quad (1.4.2)$$

де S – площа поперечного перерізу, м^2 .

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

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

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

4. Встановити значення критерію Рейнольдса за формулою

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}. \quad (1.4.3)$$

5. Встановити режим руху рідини в залежності від значення критерію Рейнольдса:

При $\text{Re} < 2320$ – режим руху ламінарний

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

1.5. Зміст звіту

Назва лабораторної роботи.

Мета роботи.

Схема установки та її опис.

Таблиця даних.

Розрахунки.

Висновки.

f.

Контрольні запитання

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.

Лабораторна робота № 2

РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ

Мета роботи – на основі рівняння Бернуллі визначити швидкості руху рідини за показами гідрометрів і п'єзометрів та порівняти зі швидкостями, розрахованими за рівнянням нерозривності потоку; графічно зобразити напори, які входять в рівняння Бернуллі.

2.1. Основні поняття та визначення

Рівняння нерозривності (суцільності) потоку.

Рівняння суцільності потоку застосовують при знаходженні витрати або швидкості рідини в певному перерізі трубопроводу.

Розглянемо трубопровід змінного перерізу (рис. 2.1).

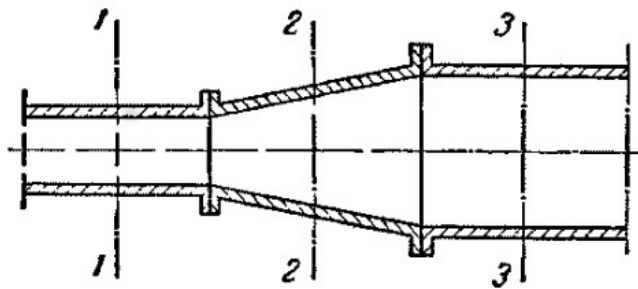


Рисунок 2.1 – Трубопровід змінного перерізу.

При сталому русі рідини масові витрати рідини в кожному поперечному перерізі є рівними, тоді *рівняння суцільності потоку* має вигляд:

$$M_1 = M_2 = M_3, \quad (2.1.1)$$

де M_i – масова витрата рідини в i -му перерізі, кг/с.

Так як $M = \omega \cdot S \cdot \rho$, то рівняння суцільності потоку можна записати як

$$\omega_1 \cdot S_1 \cdot \rho_1 = \omega_2 \cdot S_2 \cdot \rho_2 = \omega_3 \cdot S_3 \cdot \rho_3, \quad (2.1.2)$$

де ω_i – швидкість руху рідини в i -му перерізі, м/с;
 S_i – площа i -го поперечного перерізу, м²;
 ρ_i – густина рідини в i -му перерізі, кг/м³.

Згідно з рівнянням суцільності потоку, при сталому русі рідини, який повністю заповнює трубопровід, через кожен його поперечний переріз проходить в одиницю часу однакова кількість рідини.

Рівняння суцільності потоку є окремим випадком закону збереження маси та виражає матеріальний баланс потоку.

Для краплинних рідин густина є постійною величиною, тобто $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$, і враховуючи, що $\omega \cdot S = Q$, рівняння (2.1.2) матиме вигляд:

$$\omega_1 \cdot S_1 = \omega_2 \cdot S_2 = \omega_3 \cdot S_3. \quad (2.1.3)$$

або

$$Q_1 = Q_2 = Q_3, \quad (2.1.4)$$

де Q_i – об'ємна витрата рідини в i -му перерізі, $\text{м}^3/\text{с}$.

Рівняння Бернуллі.

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

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

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g}, \quad (2.1.5)$$

де Z_1, Z_2 – геометричний напір або нівелірна висота, м (Дж/Н);

$\frac{P_1}{\rho g}, \frac{P_2}{\rho g}$ – статичний або п'єзометричний напір, м (Дж/Н);

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

$(Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g}), (Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g})$ – гідродинамічний напір, м (Дж/Н);

P_1, P_2 – абсолютний тиск в перерізах 1 та 2, Па ;

ω_1, ω_2 – швидкість руху рідини в перерізах 1 та 2, м/с ;

Геометричний напір (Z) – це відстань від точки, що розглядається, або від центру перерізу потоку до довільно вибраної площини.

Геометричний напір характеризує питому потенційну енергію положення точки, що розглядається, або перерізу потоку відносно вибраної площини.

Статичний напір характеризує питому потенційну енергію тиску в точці, що розглядається, або в перерізі потоку.

Динамічний напір характеризує питому кінетичну енергію в точці, що розглядається, або в перерізі потоку.

Таким чином, згідно з рівнянням Бернуллі, при сталому русі ідеальної рідини сума геометричного, статичного та динамічного напорів, що дорівнює гідродинамічному напору, не змінюється при переході від одного поперечного перерізу потоку до іншого.

Відповідно до енергетичним змістом рівняння Бернуллі є окремим випадком закону збереження енергії та виражає енергетичний баланс потоку, з якого виходить, що при встановленому русі ідеальної рідини сума потенційної $(Z + \frac{P}{\rho g})$ та кінетичної $(\frac{\omega^2}{2g})$ енергії рідини для кожного з поперечних перерізів потоку залишається незмінною.

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

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} \quad (2.1.6)$$

Якщо $\omega_1 = \omega_2$, або $\omega_1 = \omega_2 = 0$, тоді рівняння Бернуллі перетворюється на основне рівняння гідростатики:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g}, \quad (2.1.7)$$

При русі реальної рідини у праву частину рівняння Бернуллі додаємо втрачений напір ($h_{\text{вт}}, m$):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} + h_{\text{вт}}, \quad (2.1.8)$$

Втрати напору виникають при подоланні гідравлічного опору, який складається з опору тертя та місцевих опорів.

Втрачений напір ($h_{\text{вт}}$) характеризує питому енергію, що витрачається на подолання гідравлічного опору при русі реальної рідини та розсіюється у вигляді тепла в навколишньому середовищі.

Практичне використання рівняння Бернуллі.

Розглянемо використання рівняння Бернуллі для визначення витрат і швидкості рідини та швидкості витікання з ємностей.

Для визначення витрат та швидкостей рідини в промисловості використовують пневмометричні трубки та дросельні прилади.

Пневмометричні трубки (рис. 2.2) складаються з гідрометра та п'єзометра.

Гідрометр (гідрометрична трубка), на відміну від п'єзометра (п'єзометричної трубки) має загнутий кінець, який встановлюється назустріч руху рідини.

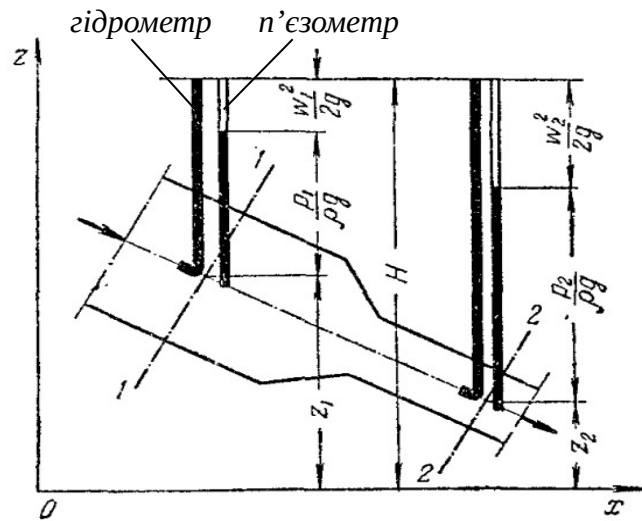


Рисунок 2.2 – Пневмометричні трубки

Гідрометр фіксує суму п'єзометричного та динамічного напорів ($H_z = \frac{P}{\rho g} + \frac{\omega^2}{2g}$), а п'єзометр тільки п'єзометричний напір ($H_n = \frac{P}{\rho g}$). Тобто знаючи покази гідрометра та п'єзометра, знаходять їх різницю, яка дорівнює швидкісному напору ($H_z - H_n = \Delta H = h_{ув} = \frac{\omega^2}{2g}$). Звідки

$$\omega = \sqrt{2gh_{ув}}. \quad (2.1.9)$$

Більш практичніше використання диференційного манометра, який фіксує динамічний напір. Він складається з гідрометра та п'єзометра, що з'єднані між собою.

Спосіб визначення витрат та швидкості рідини за допомогою пневмометричних трубок є простим, але не достатньо точним у зв'язку зі складністю їх встановлення по центру трубопроводу.

Більш поширене визначення витрат та швидкості рідини за допомогою дросельних приладів.

У якості дросельних приладів використовують мірні діафрагми, сопла та труби Вентурі.

За допомогою рівняння Бернуллі визначають швидкість витікання рідини з ємностей. Так при постійному рівні рідини (H) в ємності:

$$\omega = \sqrt{2gH}. \quad (2.1.10)$$

2.2. Опис установки

Схема установки по вивченню рівняння Бернуллі (рис. 2.3) складається з водонапірної ємності 1, трубопроводу змінного перерізу 3, до і після якого встановлені вентилі 2 та 7, мірної ємності 4 з вентилем 8. На кожній ділянці трубопроводу (I, II, III, IV) встановлено гідрометр (гідрометрична трубка) 5 та п'єзометр (п'єзометрична трубка) 6.

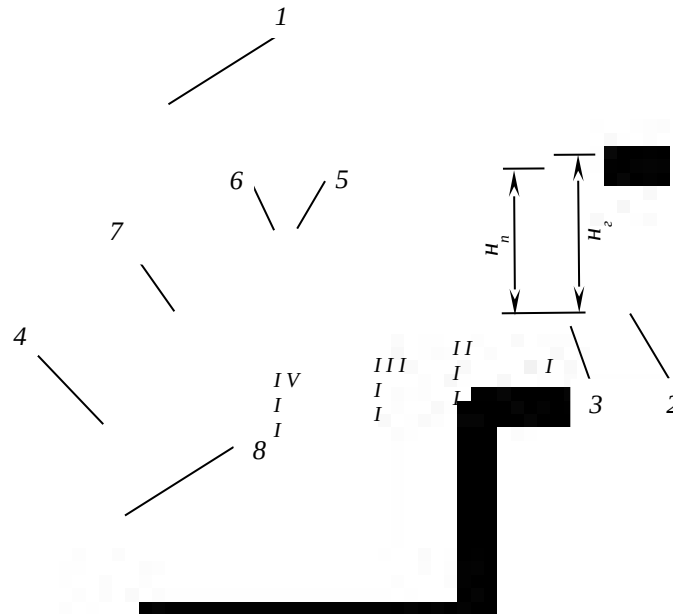


Рисунок 2.3 – Схема установки по вивченню рівняння Бернуллі:
1 – напірний бак, 2, 7, 8 – вентиль; 3 – трубопровід змінного перерізу; 4 – мірна ємність; 5 – гідрометр; 6 – п'єзометр.

2.3. Порядок виконання роботи

1. Відкрити вентиль 7, звільняючи досліджуваний трубопровід і приєднані до нього гідрометри та п'єзометри від бульбашок повітря.
2. Регулюючи вентилем 2, крізь який рідина заповнює ділянку трубопроводу, що досліджується; встановити витрату рідини, достатню для спостереження рівнів у гідрометрах та п'єзометрах.
3. Закрити вентиль 8 на виході із мірної ємності і заміряти об'єм наповненої рідини за певний проміжок часу.
4. Зафіксувати покази гідрометра 5 та п'єзометра 6 на кожній ділянці трубопроводу.

Дослідні та розрахункові значення параметрів

	Дослідні значення				Розрахункові значення				
	Покази гідрометра $H_3, м$	Покази п'єзометра $H_2, м$	Об'єм рідини в мірному бачку $V, м^3$	Час наповнення рідини $t, с$	Швидкісний напір $H_{шв}, м$	Швидкість потоку по центру $\omega_{шк}, м/с$	Об'ємна витрата рідини $Q, м^3/с$	Площа поперечного перерізу трубопроводу $S, м^2$	Середня швидкість потоку $\omega_{ср}, м/с$
I									
II									
III									
IV									

2.4. Порядок розрахунку

1. Знайти значення швидкісного напору ($H_{шв}$) за різницею показів гідрометра (H_z) та п'єзометра (H_n) для кожного перерізу, (м):

$$H_{шв} = \frac{\omega^2}{2g} = H_z - H_n. \quad (2.2.1)$$

2. Обрахувати значення швидкості по центру поперечного перерізу ділянок трубопроводу, (м/с):

$$\omega_{\max} = \sqrt{2gH_{шв}}. \quad (2.2.2)$$

3. Розрахувати об'ємну витрату рідини, як відношення об'єму рідини (V) в мірній ємності до часу її наповнення (τ), ($м^3/с$):

$$Q = V/\tau. \quad (2.2.3)$$

4. Визначити на кожній ділянці трубопроводу середню швидкість руху рідини, використовуючи рівняння нерозривності потоку, (м/с):

$$Q = Q_i = \text{const}, \quad (2.2.4)$$

де Q_i – витрата рідини в i -му перерізі, $м^3/с$.

Так як

$$Q_i = \omega_{cp,i} \cdot S_i, \quad (2.2.5)$$

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

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

$$\omega_{cp,i} = \frac{Q}{S_i}, \quad (2.2.6)$$

де S_i – площа i -го поперечного перерізу, $м^2$.

Площа i -го поперечного перерізу:

$$S_i = \frac{\pi d_i^2}{4}, \quad (2.2.7)$$

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 показами гідрометрів та п'єзометрів для кожного перерізу побудувати в масштабі графік зміни напорів, які входять у рівняння Бернуллі (рис. 2.4).

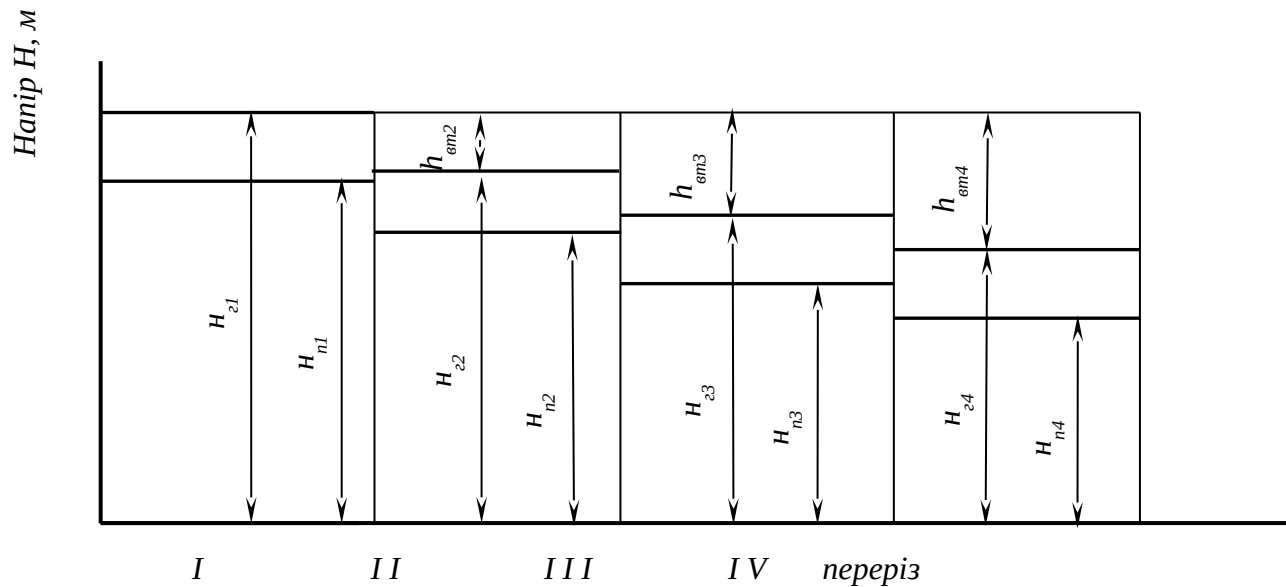


Рисунок 2.4 – Графік напорів, які входять в рівняння Бернуллі.

1.5. Зміст звіту

Назва лабораторної роботи.

Мета роботи.

Схема установки та її опис.

Таблиця даних.

Розрахунки.

Висновки.

Контрольні запитання

1. Вказати мету роботи.
2. Для якої практичної мети застосовується рівняння суцільності потоку?
3. Рівняння суцільності потоку. Розшифровка величин та їх розмірність.
4. Навести визначення рівняння суцільності потоку.
5. Фізичний зміст рівняння суцільності потоку.
6. Для якої практичної мети застосовується рівняння Бернуллі?

7. Рівняння Бернуллі для ідеальної рідини. Розшифровка величин та їх розмірність.
8. Навести визначення рівняння Бернуллі.
9. Фізичний зміст рівняння Бернуллі.
10. Що таке геометричний напір?
11. Що характеризує геометричний напір?
12. Що характеризує п'єзометричний напір?
13. Що характеризує динамічний напір?
14. Рівняння Бернуллі для горизонтального трубопроводу. Розшифровка величин та їх розмірність.
15. На яке рівняння перетвориться рівняння Бернуллі, якщо швидкість потоку дорівнює 0?
16. Рівняння Бернуллі для реальної рідини. Розшифровка величин та їх розмірність.
17. Що характеризує втрачений напір?
18. За рахунок чого виникають втрати напору?
19. Що характеризує втрачений напір?
20. Для якої мети застосовують пневмометричні трубки та дросельні прилади?
21. Будова п'єзометричної трубки та який напір вона показує?
22. Будова гідрометричної трубки та який напір вона показує?
23. Як знайти швидкість потоку за показами гідрометричної та п'єзометричної трубки?
24. Навести типи дросельних приладів.
25. Формула розрахунку швидкості витікання рідини з ємностей. Розшифровка величин та їх розмірність.

Лабораторна робота № 3

ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТИ НАПОРУ НА ТЕРТЯ

Мета роботи – визначити дослідним шляхом втрачений напір на тертя в прямолінійному відрізку труби та порівняти його з розрахунковим втраченим напором.

3.1. Основні поняття та визначення

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

Втрати напору *виникають* при подоланні гідравлічного опору, що складається з *опору тертя та місцевих опорів*.

Опір *тертя* виникає при русі реальної рідини по всій довжині трубопроводу за рахунок сил внутрішнього тертя, зумовлених в'язкістю, і силами тертя між рідиною та стінкою труби. На опір *тертя* впливає режим руху рідини та шорсткість трубопроводу.

Місцевий опір виникає при будь-якій зміні значення швидкості потоку або напрямку. До місцевих опорів відносять: вхід та вихід потоку в трубопровід, раптове звуження та розширення, коліна, відводи, запірні та регулюючі пристрої і т.п.

Втрати напору в трубопроводі ($h_{\text{вт}}$) складаються з втрат напору на *тертя* ($h_{\text{тр}}$) та втрат напору на місцеві опори ($h_{\text{м.о.}}$):

$$h_{\text{вт}} = h_{\text{тр}} + h_{\text{м.о.}}, \quad (3.1.1)$$

Якщо помножити праву та ліву частину рівняння (3.1.1) на ρg , отримаємо рівняння з визначення гідравлічного опору (Δp):

$$\rho g h_{\text{вт}} = \rho g h_{\text{тр}} + \rho g h_{\text{м.о.}}, \quad (3.1.1a)$$

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м.о.}}, \quad (3.1.1b)$$

де $\Delta p_{\text{тр}}$ – втрати тиску на *тертя*, Па;
 $\Delta p_{\text{м.о.}}$ – втрати тиску на місцеві опори, Па;

Втрати напору для горизонтального трубопроводу однакового діаметра для 2-х поперечних перерізів можна визначити як:

$$\frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_2}{\rho g} + h_{\text{вт}}, \quad (3.1.2)$$

звідки:

$$h_{\text{вт}} = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} = h_1 - h_2, \quad (3.1.3)$$

де h_1, h_2 – покази п'єзометрів, м.

Якщо на прямому відрізку трубопроводу відсутні місцеві опори, тобто $h_{\text{м.о.}}=0$, то втрачений напір слід розглядати як втрачений напір тільки на подолання опору *тертя*:

$$h_{\text{вт}} = h_{\text{тр}}. \quad (3.1.4)$$

Опір *тертя* ($h_{\text{тр}}$) виникає при русі реальної рідини по всій довжині трубопроводу і визначається за формулою

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2g}, \quad (3.1.5)$$

де λ – коефіцієнт тертя;
 ℓ – довжина трубопроводу, м;
 d – діаметр трубопроводу, м;
 ω – середня швидкість потоку, м/с.

Втрати тиску на тертя визначаються за формулою

$$\Delta p_{mp} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho}{2} \quad (3.1.5a)$$

В загальному випадку коефіцієнт тертя залежить від режиму руху рідини (Re) та абсолютної шорсткості трубопроводу (e), тобто

$$\lambda = f(Re, e). \quad (3.1.6)$$

Абсолютна шорсткість трубопроводу (e) визначається за табл. XII [2].

При *ламінарному русі* ($Re < 2320$) коефіцієнт тертя залежить від режиму руху рідини (Re) та не залежить від абсолютної шорсткості трубопроводу (e), тобто при $Re < 2320$

$$\lambda = f(Re), \lambda \neq f(e). \quad (3.1.7)$$

При *ламінарному русі* коефіцієнт тертя визначається за формулою

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.1.8)$$

При *перехідному русі* ($2320 < Re < 10000$) коефіцієнт тертя залежить від режиму руху рідини (Re) та не залежить від абсолютної шорсткості трубопроводу (e), тобто при $2320 < Re < 10000$

$$\lambda = f(Re), \lambda \neq f(e). \quad (3.1.9)$$

При *перехідному русі* коефіцієнт тертя визначається за формулою

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (3.1.10)$$

При *турбулентному русі* ($Re > 10000$) коефіцієнт тертя залежить від режиму руху рідини (Re) та абсолютної шорсткості трубопроводу (e), тобто при $Re > 10000$

$$\lambda = f(Re, e). \quad (3.1.11)$$

При турбулентному русі коефіцієнт тертя визначається за формулою

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg \left[\frac{\varepsilon}{3,7} + \left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right], \quad (3.1.12)$$

де ε – відносна шорсткість стінок трубопроводу: $\varepsilon = e/d$.

При турбулентному русі коефіцієнт тертя можна визначити за рис. 3.3. або за рис. 1.5 [2].

При *автомоделному* русі коефіцієнт тертя не залежить від режиму руху рідини (Re) та залежить від абсолютної шорсткості трубопроводу (e), тобто

$$\lambda \neq f(Re), \lambda = f(e). \quad (3.1.13)$$

При *автомоделному* русі коефіцієнт тертя визначається за формулою

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg \left[\frac{\varepsilon}{3,7} \right], \quad (3.1.14)$$

При *автомоделному* русі коефіцієнт тертя можна визначити за рис. 3.3. або за рис. 1.5 [2].

Розглянемо рух рідини по трубопроводу (рис. 3.1).

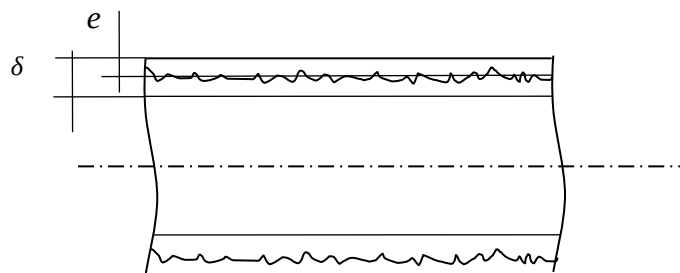


Рисунок 3.1 – Рух рідини по трубопроводу

При русі рідини виникає ламінарний підшар товщиною δ .

Якщо при русі рідини по трубопроводу товщина ламінарного підшару δ більша абсолютної шорсткості e , то коефіцієнт тертя залежить від режиму руху рідини (Re) та не залежить від абсолютної шорсткості трубопроводу (e), тобто $\lambda = f(Re)$, $\lambda \neq f(e)$, що відповідає ламінарному та перехідному режиму руху, то такі трубопроводи називаються *гідравлічно гладкими*.

Якщо при русі рідини по трубопроводу товщина ламінарного підшару δ менша абсолютної шорсткості e , то коефіцієнт тертя залежить від режиму руху

рідини (Re) та від абсолютної шорсткості трубопроводу (e), тобто $\lambda=f(Re, e)$, що відповідає турбулентному та автомодельному режиму руху, то такі трубопроводи називаються *гідралічно шорсткими*.

3.2. Опис установки

Схема установки по визначенню втрати напору на тертя в прямолінійному відрізку труби наведена на рис. 3.2.

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

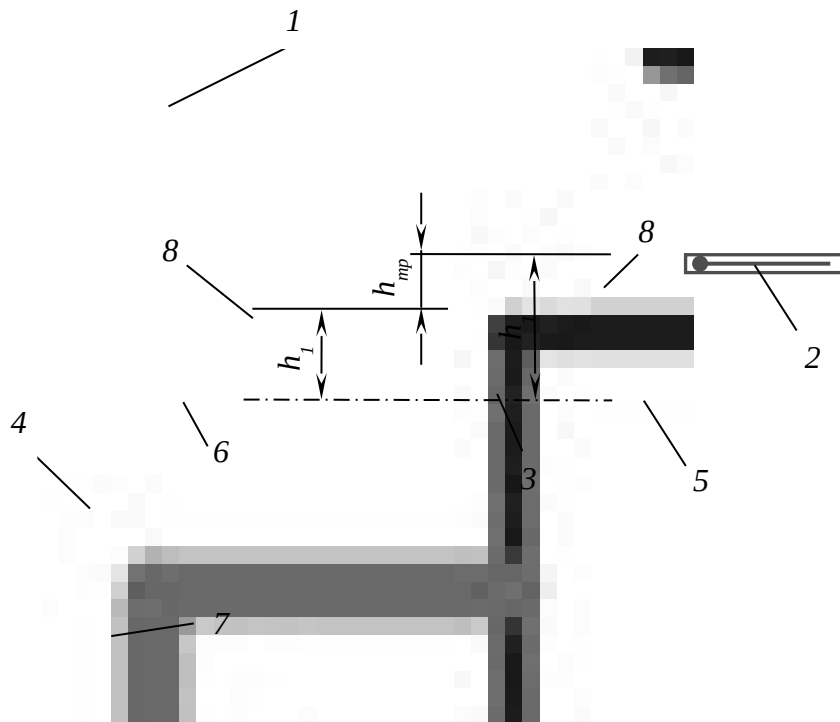


Рисунок 3.2. – Схема установки для визначення втрати напору на тертя:
1 – напірний бак; 2 – термометр; 3 – трубопровід; 4 – мірна ємність; 5, 6, 7 –
вентиль; 8 – п'єзометр.

3.3. Порядок виконання роботи

1. Відкрити вентиль 6 та закрити вентиль 7.
2. Перевірити нульові значення рівнів в п'єзометрах 8.
3. За допомогою вентиля 5 встановити подачу рідини в трубопровід, достатню 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 2 зафіксувати температуру води.
6. Положення вентиля 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 на тертя, (м):

$$h_{\partial, mp} = h_1 - h_2, \quad (3.4.1)$$

2. Розрахувати об'ємну витрату рідини, як відношення об'єму рідини (V) в мірній ємності до часу її наповнення (τ), ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$Q = V/\tau. \quad (3.4.2)$$

3. Визначити середню швидкість потоку, (м/с):

$$\omega_{cp} = \frac{Q}{S}, \quad (3.4.3)$$

де S – площа поперечного перерізу, м^2 : $S = \frac{\pi d^2}{4}$,
 d – діаметр трубопроводу, $d = 16 \text{ мм} = 0,016 \text{ м}$.

4. Розрахувати дослідний коефіцієнт тертя:

$$\lambda_{\partial} = \frac{2gh_{\partial, mp} \cdot d}{\ell \cdot \omega^2}, \quad (3.4.4)$$

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

5. Розрахувати критерій Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}. \quad (3.4.5)$$

6. Залежно від режиму руху визначити розрахунковий коефіцієнт тертя (λ_p):

– при ламінарному русі:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (3.4.6)$$

Таблиця 3.1

Дослідні і розрахункові параметри

№ досліду	Дослідні параметри		Розрахункові параметри									
	Покази п'езометрів		Висота вільної поверхні води, м	Висота вільної поверхні води, м	Висота вільної поверхні води, м	Висота вільної поверхні води, м	Висота вільної поверхні води, м	Висота вільної поверхні води, м	Висота вільної поверхні води, м	Висота вільної поверхні води, м	Висота вільної поверхні води, м	Висота вільної поверхні води, м
	$h_1, \text{м}$	$h_2, \text{м}$										
1												
2												
3												

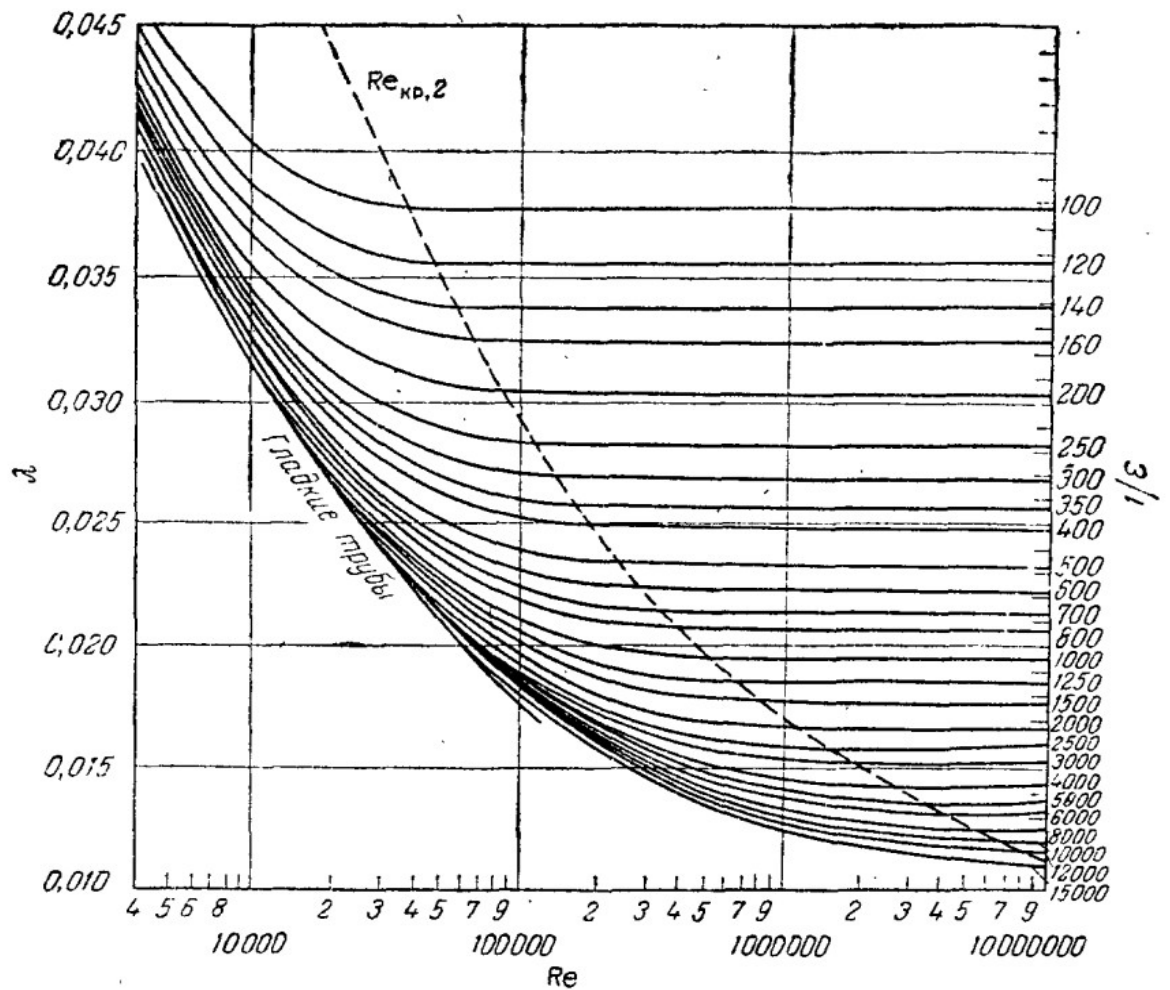


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнта тертя (λ) від критерію Рейнольдса (Re) при різних відносних шорсткостях (ϵ/d).

– При перехідному русі:

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (3.4.7)$$

– При турбулентному русі:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\frac{\epsilon}{3,7} + \left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right], \quad (3.4.8)$$

де ϵ – відносна шорсткість стінок трубопроводу: $\epsilon = e/d$.

e – абсолютна шорсткість трубопроводу, м

Абсолютна шорсткість трубопроводу (e) визначається за табл. XII [2].

При турбулентному русі коефіцієнт тертя можна визначити за рис. 3.3. або за рис. 1.5 [2].

– При автомодельному русі:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\ell g \left[\frac{\varepsilon}{3.7} \right], \quad (3.4.9)$$

При автомодельному русі коефіцієнт тертя можна визначити за рис. 3.3. або за рис. 1.5 [2].

6. Визначити розрахунковий втрачений напір, (м):

$$h_{p,mp} = \lambda_p \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2g} \quad (3.4.10)$$

3.5. Зміст звіту

Назва лабораторної роботи.

Мета роботи.

Схема установки та її опис.

Таблиця даних.

Розрахунки.

Висновки.

3.6. Контрольні запитання

1. Вказати мету роботи.
2. З якою метою розраховують втрачений напір?
3. За рахунок чого виникають втрати напору?
4. За рахунок чого виникають втрати напору на тертя?
5. За рахунок чого виникають втрати напору на місцеві опори?
6. Формула розрахунку втраченого напору. Розшифровка величин та їх розмірність.
7. Формула розрахунку гідравлічного опору. Розшифровка величин та їх розмірність.
8. Формула розрахунку втраченого напору на тертя. Розшифровка величин та їх розмірність.
9. Формула розрахунку втраченого тиску на тертя. Розшифровка величин та їх розмірність.
10. Від яких параметрів залежить коефіцієнт тертя в загальному вигляді?
11. Від яких параметрів залежить коефіцієнт тертя при ламінарному русі?
12. Формула розрахунку коефіцієнта тертя при ламінарному русі рідини. Розшифровка величин та їх розмірність.

13. Від яких параметрів залежить коефіцієнт тертя при перехідному русі?
14. Формула розрахунку коефіцієнта тертя при перехідному русі рідини. Розшифровка величин та їх розмірність.
15. Від яких параметрів залежить коефіцієнт тертя при турбулентному русі?
16. Формула розрахунку коефіцієнта тертя при турбулентному русі рідини. Розшифровка величин та їх розмірність.
17. Від яких параметрів залежить коефіцієнт тертя при автомодельному русі?
18. Формула розрахунку коефіцієнта тертя при автомодельному русі рідини. Розшифровка величин та їх розмірність.
19. Пояснити, що таке гідравлічно гладкий трубопровід.
20. Пояснити, що таке гідравлічно шорсткий трубопровід.
21. Яким чином можна знизити втрати напору на тертя?
22. Знайти втрати напору на тертя для умов, запропонованих викладачем.

Лабораторна робота № 4

ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТИ НАПОРУ НА МІСЦЕВІ ОПОРИ

Мета роботи – визначити дослідним шляхом втрату напору на місцеві опори та порівняти з розрахунковим втраченим напором.

4.1. Основні поняття та визначення

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

Втрати напору *виникають* при подоланні гідравлічного опору, який складається з *опору тертя та місцевих опорів*.

Опір тертя виникає при русі реальної рідини по всій довжині трубопроводу за рахунок сил внутрішнього тертя, зумовлених в'язкістю, і силами тертя між рідиною та стінкою труби. На опір тертя впливає режим руху рідини та шорсткість трубопроводу.

Місцевий опір виникає при будь-якій зміні значення швидкості потоку або напрямку. До місцевих опорів відносять: вхід та вихід потоку в трубопровід, раптове звуження та розширення, коліна, відводи (рис. 4.1.), запірні та регулюючі пристрої (рис. 4.2.) і т.п.

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

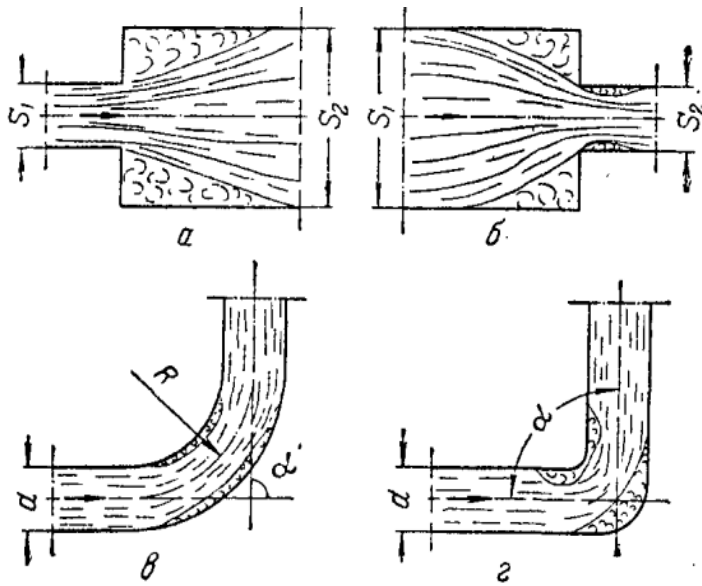


Рисунок 4.1 – Деякі місцеві опори:

- а) – раптове розширення;
- б) – раптове звуження;
- в) – відвід (на 90°);
- г) – коліно (на 90°).

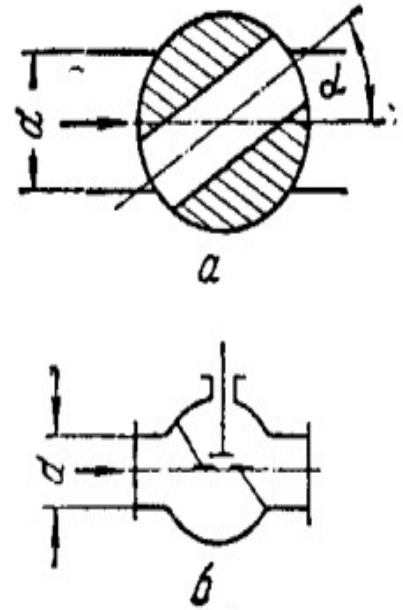


Рисунок 4.2 – Деякі запірно-регулюючі пристрої:

- а) – пробковий кран;
- б) – вентиль.

Втрати напору в трубопроводі ($h_{\text{вм}}$) складаються з втрат напору на тертя ($h_{\text{тр}}$) та втрат напору на місцеві опори ($h_{\text{м.о.}}$):

$$h_{\text{вм}} = h_{\text{тр}} + h_{\text{м.о.}}, \quad (4.1.1)$$

Якщо помножити праву та ліву частину рівняння (4.1.1) на ρg , отримаємо рівняння для визначення гідравлічного опору (Δp):

$$\rho g h_{\text{вм}} = \rho g h_{\text{тр}} + \rho g h_{\text{м.о.}}, \quad (4.1.1a)$$

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м.о.}}, \quad (4.1.16)$$

де $\Delta p_{\text{тр}}$ – втрати тиску на тертя, Па;
 $\Delta p_{\text{м.о.}}$ – втрати тиску на місцеві опори, Па;

Якщо довжина трубопроводу є незначною, то втраченим напором на тертя можна знехтувати, тобто $h_{\text{тр}}=0$, тоді втрачений напір слід розглядати як втрачений напір тільки на подолання місцевих опорів:

$$h_{\text{вт}} = h_{\text{м.о.}} \quad (4.1.2)$$

Втрачений напір на одному (i -му) місцевому опорі можна визначити за формулою

$$h_{\text{м.о.}i} = \xi_{\text{м.о.}i} \cdot \frac{\omega^2}{2g}, \quad (4.1.3)$$

де $\xi_{\text{м.о.}i}$ – коефіцієнт місцевого опору.

Коефіцієнт місцевого опору є довідковою величиною і залежно від виду місцевого опору його знаходять за табл. XIII [2].

Втрачений напір на місцевих опорах можна визначити за формулою

$$h_{\text{м.о.}} = \sum \xi_{\text{м.о.}i} \cdot \frac{\omega^2}{2g} \quad (4.1.4)$$

Втрати тиску на місцевих опорах ($\Delta p_{\text{м.о.}}$, Па) можна визначити за формулою

$$\Delta p_{\text{м.о.}} = \sum \xi_{\text{м.о.}i} \cdot \frac{\omega^2 \cdot g}{2} \quad (4.1.5)$$

4.2. Опис установки

Установка для визначення втрати напору на місцеві опори (рис. 4.3.) складається з напірного баку 1, трубопроводу, на якому розміщені місцеві опори (a – відвід, b – раптове розширення, c – раптове звуження, d – коліно), вентилів 3, 5, 6, 7, п'єзометрів 8, які встановлені до та після кожного місцевого опору, мірної ємності 4 та термометра 2.

Таблиця 4.1

Дослідні та розрахункові значення

Ідентифікація опру				Дослідні значення		Розрахункові значення																							
				$n_{1,м}$	$n_{2,м}$	Ідентифікатор		Скоринив мірність	M	z	C	Скоринив мірність	Q_1	Q_2	Ідентифікатор	Скоринив мірність	Ідентифікатор	Скоринив мірність	$h_{0,м}$	Ідентифікатор	Скоринив мірність	S_1 / S_2	Ідентифікатор	Скоринив мірність	$\xi_{мв}$	Ідентифікатор	Скоринив мірність	$n_{т,м}$	
Ідентифікатор		Ідентифікатор		Ідентифікатор		Ідентифікатор																							Ідентифікатор
Коліно	Різке звуження	Різке розширення	Відвід (R ₀ /d = 4)																										
Коліно	Різке звуження	Різке розширення	Відвід (R ₀ /d = 4)																										
Коліно	Різке звуження	Різке розширення	Відвід (R ₀ /d = 4)																										

2. Розрахувати значення середньої швидкості у звуженій та розширеній частині трубопроводу, (м/с):

$$\omega_1 = \frac{Q}{S_1}, \quad \omega_2 = \frac{Q}{S_2}, \quad (4.3.2)$$

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

Площі поперечних перерізів:

$$S_1 = \frac{\pi d^2}{4}, \quad S_2 = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (4.3.3)$$

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. Обрахувати значення швидкісних напорів у звуженій та розширеній частинах трубопроводу, (м):

$$h_{\text{шв}1} = \frac{\omega_1^2}{2g}, \quad h_{\text{шв}2} = \frac{\omega_2^2}{2g}. \quad (4.3.4)$$

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

– для відводу:

$$h_{\text{д}1} = h_1 - h_2, \quad (4.3.5)$$

– для раптового розширення:

$$h_{\text{д}2} = \left(h_1 + \frac{\omega_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{\omega_2^2}{2g} \right), \quad (4.3.6)$$

– для раптового звуження:

$$h_{\text{д}3} = \left(h_1 + \frac{\omega_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{\omega_2^2}{2g} \right), \quad (4.3.7)$$

– для коліна:

$$h_{\text{д}4} = h_1 - h_2. \quad (4.3.8)$$

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

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{d^2}{D^2}. \quad (4.3.9)$$

6. Залежно від виду опору знайти за табл. XIII [2] довідкові коефіцієнти місцевих опорів.

7. Визначити розрахункову втрату напору на кожному місцевому опорі, (м):

$$h_p = \xi_{m.o.i} \cdot \frac{\omega^2}{2g} \quad (4.3.10)$$

4.5. Зміст звіту

Назва лабораторної роботи.

Мета роботи.

Схема установки та її опис.

Таблиця даних.

Розрахунки.

Висновки.

4.6. Контрольні запитання

1. Вказати мету роботи.
2. Що таке місцевий опір?
3. Навести типи місцевих опорів.
4. Навести схему раптового розширення.
5. Навести схему раптового звуження.
6. Навести схему відводу.
7. Навести схему коліна.
8. Внаслідок чого втрачається напір при раптовому розширенні?
9. Внаслідок чого втрачається напір при раптовому звуженні?
10. Внаслідок чого втрачається напір у відводі та коліні?
11. Формула розрахунку втраченого напору на місцеві опори.
Розшифровка величин та їх розмірність.
12. Формула розрахунку втраченого тиску на місцеві опори.
Розшифровка величин та їх розмірність.
13. Від чого залежить втрачений напір на місцевому опорі?
14. Що являє собою коефіцієнт місцевого опору?
15. Як експериментально знайти втрати напору на раптовому розширенні?
16. Як експериментально знайти втрати напору на раптовому звуженні?
17. Як експериментально знайти втрати напору на відводі?
18. Як експериментально знайти втрати напору на коліні?
19. Як знайти коефіцієнт місцевого опору відводу?
20. Як знайти коефіцієнт місцевого опору раптового розширення?

21. Як знайти коефіцієнт місцевого опору раптового звуження?
22. Знайти втрати напору на місцеві опори для умов, запропонованих викладачем.

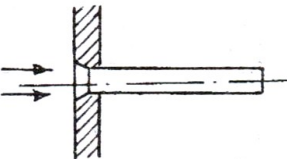
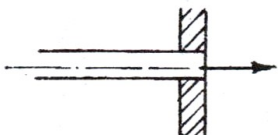
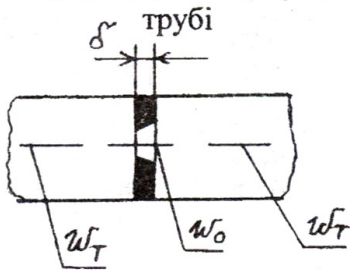
ДОДАТОК 1

Властивості води на лінії насичення

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}$ Па	$\rho,$ кг/м ³	$i,$ кДж/кг	$c_p,$ кДж/(кг $\cdot^\circ\text{C}$)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м $\cdot^\circ\text{C}$)	$\alpha \cdot 10^8,$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6,$ Па $\cdot$ с	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$\beta \cdot 10^4,$ К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4,$ Н/м	Pr
0	1,013	999,9	0,000	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	1,013	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	+0,7	741,6	9,52
20	1,013	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,013	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,013	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	1,013	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,013	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,013	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	875,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,48	813,6	1037,5	4,766	62,8	16,2	114,8	0,141	15,8	288,5	0,87
250	39,78	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86
260	46,94	784,0	1135,1	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	19,1	237,4	0,87
270	55,05	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,9	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,6	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,1	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	53,4	56,70	1,39
350	165,4	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,7	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	109	20,21	2,35
370	210,5	450,5	1892,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	264	4,709	6,79

ДОДАТОК 2

Коефіцієнти місцевих опорів

Вид опору	Значення коефіцієнта місцевого опору ξ
Вхід до труби 	З загостреними кінцями $\xi = 0,5$ З закругленими кінцями $\xi = 0,2$
Вихід із труби 	Розраховуючи Δp за формулою (2.209) цей опір для виходу з труби враховувати не потрібно $\xi = 1$
Діафрагма (отвір) з гострими краями у прямій трубі 	При $\frac{\delta}{d_0} = 0 \div 0,015$ втрата тиску $\Delta p = \xi \frac{\rho w_T^2}{2}$. Значення ξ визначається в таблиці А, d_0 – діаметр отвору діафрагми, м; δ – товщина діаграми, м; w_0 – середня швидкість потоку в отворі, м/с; w_T – середня швидкість потоку в трубі, м/с; $m = \left(\frac{d_0}{D}\right)^2$, D – діаметр труби, м

m	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
ξ	7000	1670	730	400	245	165	117	86,0	65,5	51,5	40,0
m	0,24	0,26	0,28	0,30	0,34	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ξ	32,0	26,8	22,3	18,2	13,1	8,25	4,00	2,00	0,97	0,42	0,13

ДОДАТОК 2. Продовження.

Коефіцієнти місцевих опорів



Коефіцієнт опору $\xi = AB$ визначається з таблиць Б та В

Таблиця Б

Кут ϕ , градуси	20	30	45	60	90	110	130	150	180
A	0,31	0,45	0,6	0,78	1,0	1,13	1,20	1,28	1,40

Таблиця В

R_0/d	1,0	2,0	4,0	6,0	15	30	50
B	0,21	0,15	0,11	0,09	0,06	0,04	0,03

Коліно (кутик) 90° стандартний чавунний	Умовний прохід, мм	12,5	2,5	37	50
	ξ	2,2	2	1,6	1,1

Вентиль нормальний	Значення ξ при повному відкритті вентилля									
	D, мм	13	20	40	80	100	150	200	250	350
	ξ	10,8	8,0	4,9	4,0	4,1	4,4	4,7	5,1	5,5

ДОДАТОК 2. Продовження.

Коефіцієнти місцевих опорів

Вентиль проточний	При $Re = \frac{wD}{\nu} \geq 3 \cdot 10^5$ значення ξ визначається з таблиці:									
	D, мм	25	38	50	65	76	100	150	200	250
	ξ	1,04	0,85	0,79	0,65	0,60	0,50	0,42	0,36	0,32
	При $Re < 3 \cdot 10^5$ коефіцієнт опору $\xi = \xi_1 K$. Значення ξ_1 визначається так само, як і при $Re \geq 3 \cdot 10^5$, а значення K дивись у таблиці:									

Re	50000	10000	20000	50000	100000	200000	300000
K	1,40	1,07	0,94	0,88	0,91	0,93	1

Кран проточний

Умовний прохід, мм	13	19	25	32	38	50
	і вище					
ξ	4	2	2	2	2	2

Засувка

Умовний прохід, мм	13–10	175–200	300
	і вище		
ξ	0,5	0,25	0,15

ЛІТЕРАТУРА

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.

