



Міністерство освіти і науки України

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет мехатроніки та інжинірингу

**Кафедра обладнання та інжинірингу переробних і
харчових виробництв**

МЕХАНІКА РІДИН ТА ГАЗІВ В ГАЛУЗІ

Частина 2.

ОСНОВИ КІНЕМАТИКИ ТА ДИНАМІКИ РІДИНИ

Методичні вказівки

до практичних та лабораторних робіт

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форм навчання
за спеціальностями 131 «Прикладна механіка»,
133 «Галузеве машинобудування»**

**Харків
2024**

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет мехатроніки та інжинірингу

Кафедра обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв

МЕХАНІКА РІДИН ТА ГАЗІВ В ГАЛУЗІ

Частина 2. ОСНОВИ КІНЕМАТИКИ ТА ДИНАМІКИ РІДИНИ

Методичні вказівки
до практичних та лабораторних робіт

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форм навчання
за спеціальностями 131 «Прикладна механіка»,
133 «Галузеве машинобудування»

Затверджено
рішенням Науково-методичної комісії
факультету мехатроніки та інжинірингу
Протокол № 3 від 30 грудня 2024 р.

Харків
2024

УДК 532(072)
М-53

Схвалено
на засіданні кафедри обладнання та інжинірингу
переробних і харчових виробництв
Протокол № 2 від 26 вересня 2024 р.

Рецензенти:

В.О. Потапов, професор кафедри інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування Державного біотехнологічного університету, д-р техн. наук, професор;

А.Л. Фоцан, професор кафедри харчових технологій в ресторанній індустрії Державного біотехнологічного університету, д-р техн. наук, доцент

М-53 Механіка рідин та газів в галузі. У 3 ч. Ч. 2. Основи кінематики та динаміки рідини [Електронне видання] : методичні вказівки до практичних та лабораторних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальностями 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / уклад.: А.О. Шевченко, В.М. Михайлов, С.В. Прасол. – Електрон. дані. – Харків: ДБТУ, 2024. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана.

Зміст методичних вказівок до практичних та лабораторних робіт «Механіка рідин та газів в галузі» узгоджений з робочими програмами відповідних навчальних дисциплін за спеціальностями 131 «Прикладна механіка» та 133 «Галузеве машинобудування». Методичні вказівки призначені для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти та розраховані для використання в навчальному процесі ДБТУ, а також в інших ЗВО за умови адаптації під конкретний навчальний план. Матеріал може бути корисним для дипломної роботи студентів та широкого кола фахівців, які займаються проектуванням високотехнологічних гідравлічних процесів та апаратів у галузі переробних і харчових виробництв.

Частина 2 «Основи кінематики та динаміки рідини» містить 4 роботи: «Дослідження режимів руху рідини», «Практичні розрахунки з гідродинаміки та використання рівняння Бернуллі», «Дослідна перевірка рівняння Бернуллі», «Дослідження гідравлічних опорів трубопроводів»; 4 додатки: «Залежність коефіцієнта витрат водоміра Вентурі від числа Рейнольдса», «Розміри та маси труб згідно ГОСТ 3262-75», «Фізичні властивості води на лінії насичення», «До визначення коефіцієнтів місцевих опорів» та список рекомендованої літератури.

УДК 532(072)

Відповідальний за випуск: О.В. Богомолів, завідувач кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв, д-р техн. наук, професор

© Шевченко А.О., Михайлов В.М.,
Прасол С.В., 2024
© ДБТУ, 2024

ЗМІСТ

1. Дослідження режимів руху рідини.....	4
1.1. Загальні відомості.....	4
1.2. Будова та принцип дії лабораторної установки.....	7
1.3. Методика проведення дослідження.....	7
1.4. Зміст звіту.....	8
1.5. Контрольні запитання.....	9
2. Практичні розрахунки з гідродинаміки та використання рівняння Бернуллі.....	9
2.1. Загальні відомості.....	9
2.2. Методики розв'язування задач.....	12
2.3. Задачі для самостійного розв'язування.....	22
2.4. Зміст звіту.....	27
2.5. Контрольні запитання.....	27
3. Дослідна перевірка рівняння Бернуллі.....	28
3.1. Загальні відомості.....	28
3.2. Будова та принцип дії лабораторної установки.....	31
3.3. Методика проведення дослідження.....	31
3.4. Зміст звіту.....	32
3.5. Контрольні запитання.....	32
4. Дослідження гідравлічних опорів трубопроводів.....	33
4.1. Загальні відомості.....	33
4.2. Будова та принцип дії лабораторної установки.....	36
4.3. Методика досліджень та методики розв'язування задач.....	37
4.4. Задачі для самостійного розв'язування.....	43
4.5. Зміст звіту.....	45
4.6. Контрольні запитання.....	45
Додаток 1. Залежність коефіцієнта витрат водоміра Вентурі від числа Рейнольдса (при $d_2/d_1 = 0,5$).....	46
Додаток 2. Розміри та маси труб згідно ГОСТ 3262-75.....	46
Додаток 3. Фізичні властивості води на лінії насичення.....	47
Додаток 4. До визначення коефіцієнтів місцевих опорів.....	47
Список використаних джерел / Рекомендована література.....	48

1. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РУХУ РІДИНИ

Мета роботи:

1. Вивчити основні характеристики руху рідини.
2. Вивчити будову та принцип дії лабораторної установки та методик проведення дослідження.
3. Дослідним шляхом визначити різні режими руху рідини.

1.1. Загальні відомості

Різні режими руху рідини можна простежити, додаючи в потік барвник. За невеликої швидкості рідини в трубі забарвлений струмінь витягується в горизонтальну нитку, яка не розмивається. Це свідчить про те, що частинки рухаються прямолінійно та паралельно одна іншій. Такий рух називається **струменевим**, або **ламінарним**. Якщо швидкість рідини збільшувати, то забарвлений струмінь починає розмиватися, змішуючись з основною масою рідини, при цьому окремі частинки рухаються не паралельно одна одній та осі труби, а по хаотично заплутаних траєкторіях, у той час коли вся маса рідини загалом рухається в одному напрямку. Такий рух, який призводить до інтенсивного перемішування потоку, називається **турбулентним**.

Доведено, що при ламінарному режимі втрати напору пропорційні швидкості в першому ступені, а при турбулентному – приблизно квадрату швидкості.

Перехід від ламінарного руху до турбулентного відбувається тим легше, чим більшими є швидкість рідини v та діаметр труби d та меншою в'язкість рідини ν . Англійський фізик Рейнольдс установив, що зазначені величини можна об'єднати в комплекс, кількісне значення якого дозволяє робити висновок про режими руху рідини. Цей комплекс називається критерієм Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (1.1)$$

де v – середня швидкість;

d – внутрішній діаметр труби;

ν – кінематична в'язкість.

Кінематичний коефіцієнт в'язкості ν (m^2/s):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (1.2)$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, $Pa \cdot s$;

ρ – густина, kg/m^3 .

Таким чином, можна записати

$$Re = \frac{v_{сер} \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}. \quad (1.3)$$

Щоб визначити режим руху, необхідно фактичне число Рейнольдса зіставити із критичним $Re_{кр}$, що для круглих труб дорівнює приблизно 2320: якщо $Re_{кр} < 2320$, то режим ламінарний, при $Re_{кр} > 2320$ – перехідний, при $Re_{кр} > 10000$ турбулентний.

Критерій Re є мірою відношення між силами в'язкості та інерції в рухомому потоці.

На зниження величини критерію Рейнольдса впливає шорсткість стінок, змінення швидкості потоку за величиною або напрямом, близькість входу в трубу.

Розподіл швидкостей за перерізом потоку відрізняється для ламінарного та турбулентного режимів руху. Максимальне значення швидкості біля осі потоку, а біля стінки вона дорівнює нулю.

До критерія Re входить середня швидкість потоку. Розподіл швидкостей за перерізом потоку відрізняється для ламінарного та турбулентного режимів руху. Максимальне значення швидкості біля осі потоку, а біля стінки вона дорівнює нулю.

Виділимо в ламінарному потоці рідини, яка рухається в трубі радіусом R , циліндричний шар рідини довжиною l та радіусом r (рис. 1.1). Рух цього шару рідини відбувається під дією різниці сил тиску P_1 та P_2 з обох боків циліндра:

$$P_1 - P_2 = (p_1 - p_2)\pi \cdot r^2, \quad (1.4)$$

де p_1 і p_2 – гідростатичний тиск у перерізах 1-1 та 2-2.

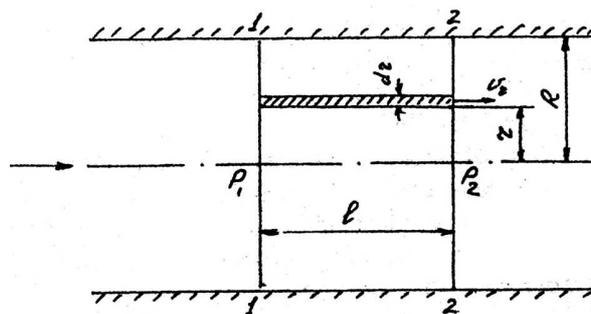


Рисунок 1.1 – Схема розподілу швидкостей рідини в потоці

Рухові циліндра перешкоджає сила внутрішнього тертя F , що спрямована в бік, протилежний до тертя:

$$F = -\mu \cdot 2\pi \cdot r \cdot l \cdot \frac{dv}{dr}, \quad (1.5)$$

де v – швидкість потоку, м/с.

За сталого руху різниця сил тиску $P_1 - P_2$ витрачається на подолання сили тертя F . Тоді

$$-\mu \cdot 2\pi \cdot r \cdot l \cdot \frac{dv}{dr} = (p_1 - p_2)\pi \cdot r^2 \quad (1.6)$$

або

$$-dv = \frac{(p_1 - p_2) \cdot r \cdot dr}{2\mu l} \quad (1.7)$$

Проінтегруємо це рівняння:

$$-\int_{v_r}^0 dv = \int_r^R \frac{(p_1 - p_2) \cdot r \cdot dr}{2\mu \cdot l}, \quad (1.8)$$

отримаємо

$$v = \frac{p_1 - p_2}{2\mu \cdot l} \left(\frac{R^2}{2} - \frac{r^2}{2} \right), \quad (1.9)$$

або

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\mu \cdot l} (R^2 - r^2). \quad (1.10)$$

У розглянутому випадку v є швидкістю рідини в будь-якій точці потоку. Із формули (1.8) видно, що максимальне значення швидкості v_{max} буде на вісі потоку, коли $r = 0$. Звідси

$$v_{max} = \frac{p_1 - p_2}{4\mu \cdot l} R^2. \quad (1.11)$$

Якщо порівняти формули (2.9) та (2.10), то можна одержати

$$v = v_{max} \frac{R^2 - r^2}{R^2} = v_{max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right). \quad (1.12)$$

Це рівняння є законом Стокса, який відображує параболічний розподіл швидкостей у перерізі трубопроводу за ламінарного руху (рис. 1.2 а).

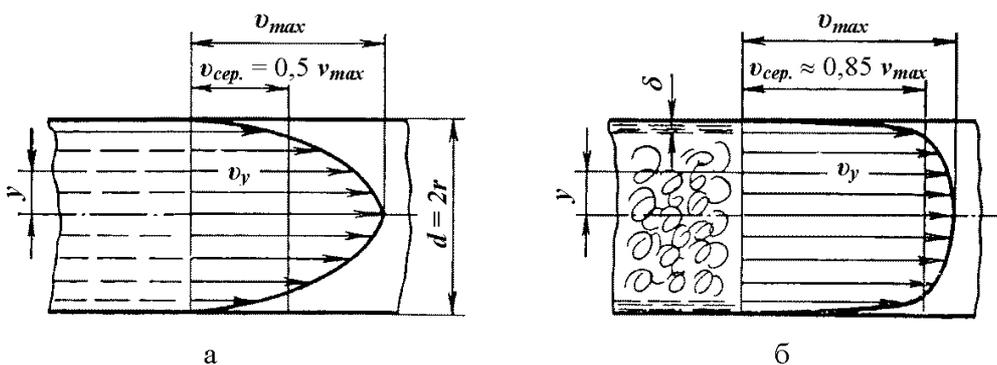


Рисунок 1.2 – Розподіл швидкостей у потоці рідини: а – за умови ламінарного режиму течії; б – за умови турбулентного режиму течії

Між максимальною та середньою швидкостями ламінарного руху існує залежність:

$$v_{сep} = \frac{v_{max}}{2}. \quad (1.13)$$

За умов турбулентного режиму через хаотичний рух частинок відбувається вирівнювання швидкостей в основній масі потоку, їхній розподіл за перерізом труби характеризується кривою, яку зображено на рис. 1.2 б. Досліди свідчать, що

$$v_{сер}/v_{max}=f(Re). \quad (1.14)$$

Так, за $Re = 10000$ швидкість $v_{сер} = 0,8v_{max}$, а за $Re = 10^9$ $v_{сер} = 0,9v_{max}$.

Турбулентний рух завжди супроводжується ламінарним. Умовно відрізняють ядро потоку, у якому рух турбулентний, та межовий прошарок – стінки, де відбувається перехід турбулентного руху в ламінарний.

1.2. Будова та принцип дії лабораторної установки

Лабораторна установка (рис. 2.3) складається з натискного бака 3, у якому підтримується постійний рівень за допомогою переливної трубки. Натискний бак трубопроводом з'єднано зі скляною трубою 7 діаметром d . Витрата води регулюється вентилем 10 та вимірюється об'ємним лічильником 4. Витрата води регулюється вентилем 10 та вимірюється об'ємним лічильником 4.

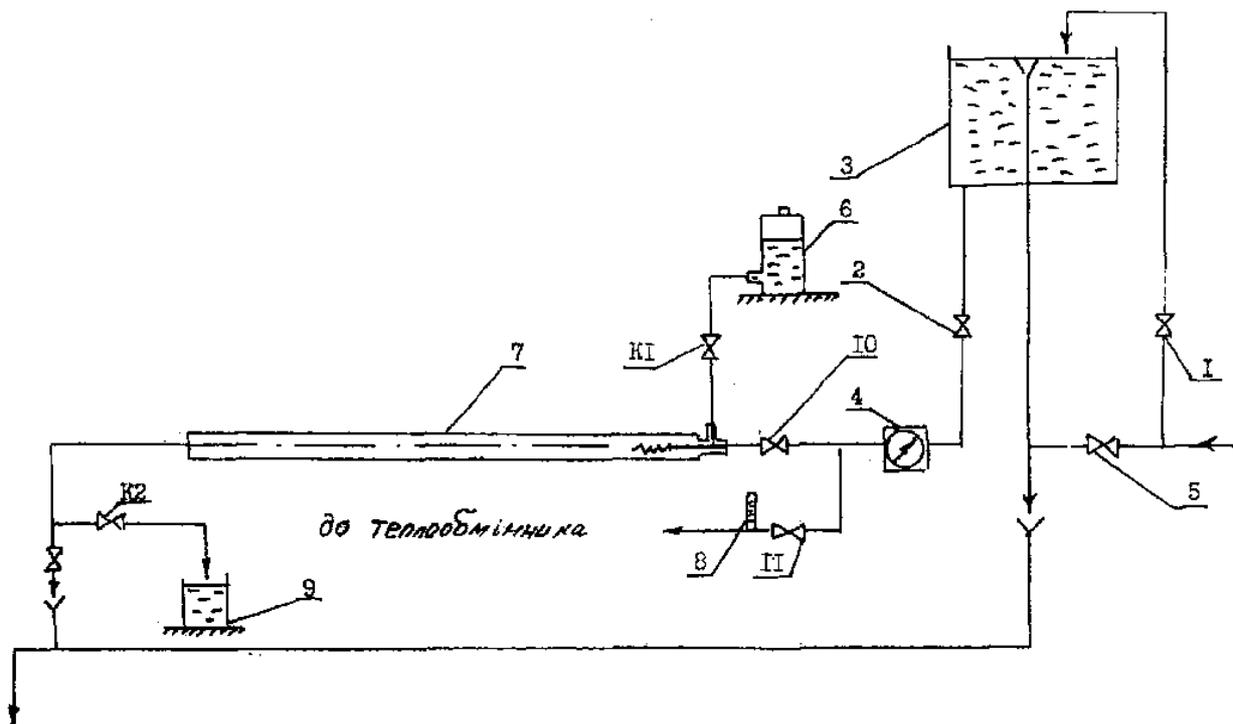


Рисунок 1.3 – Схема лабораторної установки

Для візуального спостереження характеру руху рідини в скляну трубку 7 з бака 6 крізь кран К1 подається підфарбована вода.

1.3. Методика проведення дослідження

Відкрити вентиль 5 і протягом 2 хв. промити мережу водою, потім вентиль 5 закрити.

Відкрити вентиль 1 на лінії подачі води з водопроводу у натискний бак 3 та заповнити його так, щоб за переливання у зливну воронку, почала витікати вода (протягом 2 хв). Відкрити повністю вентиль 2, за допомогою вентиля 10 пустити воду у скляну трубу 7. Через 3 хв обережно відкрити кран К1 та подати підфарбовану рідину. Підібрати ламінарний режим руху, за якого підфарбована рідина тектиме окремим струменем. Для вимірювання витрати рідини відкрити кран К2 або слідкувати за показаннями об'ємного лічильника 4. Включити секундомір та визначити час витікання води певного об'єму. Результати вимірювань занести в таблицю. Дослід повторити двічі за різних витрат.

Збільшити витрату води (вентиль 10) через скляну трубу. Підібрати розвинений турбулентний режим. Як і в попередньому випадку визначити об'єм і час проходження води. Результати вимірювань занести до таблиці. Дослід повторити двічі за різних витрат.

Відкрити вентиль 11 та за допомогою термометра 8 виміряти температуру води. За додатком 3 визначити в'язкість.

Підрахувати площу перерізу труби s за формулою:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ м}^2 \quad (d = 0,016 \text{ м}). \quad (1.15)$$

Підрахувати об'ємну витрату води та визначити за формулою середню швидкість для кожного дослід.

Знайти значення чисел Рейнольдса, порівняти його з критичним значенням і визначити режим руху. Результати розрахунків занести до таблиці 1.1. Зробити висновки за результатами досліджень і розрахунків.

Таблиця 1.1 – Дослідні та розрахункові дані

№ з/п	Об'єм води, м ³	Час витікання, сек	Об'ємна витрата води, м ³ /сек	Температура води, °С	В'язкість, м ² /сек	Швидкість, м/сек	Критерій Re	Режим руху
1								
2								
3								
4								

1.4. Зміст звіту

Звіт з роботи повинен містити:

1. Номер та назву роботи.
2. Мету роботи.
3. Загальні відомості (стисло).
4. Опис будови та принципу дії лабораторної установки.

5. Опис дослідження із розрахунками та заповненою таблицею.
6. Висновки з виконання роботи.

1.5. Контрольні запитання

1. Який критерій гідродинамічної подібності характеризує режим руху рідини? Поясніть фізичний зміст цього критерію?
2. Які збурення впливають на режим руху рідини?
3. Як змінюється швидкість за перерізом потоку для ламінарного руху?
3. Як змінюється швидкість за перерізом потоку для турбулентного руху?
4. Який вигляд має закон Стокса для ламінарного режиму руху?
5. Який зв'язок між максимальною та середньою швидкістю за ламінарного та турбулентного руху?
6. Опишіть лабораторну установку та дослід Рейнольдса.

2. ПРАКТИЧНІ РОЗРАХУНКИ З ГІДРОДИНАМІКИ ТА ВИКОРИСТАННЯ РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ

Мета роботи:

1. Вивчити основні теоретичні положення кінематики та динаміки рідини.
2. Опанувати методики розв'язування задач.
3. Розв'язати задачі згідно варіанту.

2.1. Загальні відомості

Основні поняття про рух рідини. Рівняння витрати (нерозривності потоку). Рух рідини може бути усталеним та неусталеним, рівномірним і нерівномірним, напірним і безнапірним, що плавно змінюється та різко змінюється, ламінарним і турбулентним.

Усталеним називається такий рух рідини, при якому швидкість і тиск у будь-якій її точці із часом не змінюються. При неусталеному русі швидкість і тиск рідини змінюються із часом.

Усталений рух називається **рівномірним**, якщо живі перерізи потоку, середні швидкості й місцеві швидкості у відповідних точках всіх живих перерізів однакові. Інакше рух називається **нерівномірним**.

Напірним називається такий рух рідини в закритому руслі, при якому потік не має вільної поверхні, а тиск відрізняється від атмосферного. При безнапірному русі рідина має вільну поверхню, тиск у всіх точках якої дорівнює атмосферному.

Лінією струменя називається лінія, проведена в рідині так, що в будь-якій її точці вектор швидкості в цей момент часу спрямований по дотичній до неї. Рух рідини є таким, що плавно змінюється, якщо кривизна ліній струму та кут розбіжності між ними незначні. Інакше рух різко змінюється.

Трубчаста поверхня, утворена лініями струму, проведеними через всі точки нескінченно малого замкнутого контуру в рідині, що рухається, називається **трубкою струменя**. Частина потоку, що тече всередині трубки струму, називається **елементарною струминкою**.

Потік – це сукупність елементарних струминок.

Живим перерізом називається поверхня усередині потоку, нормальна в кожній точці до відповідної лінії струму. Частина периметра живого перерізу, що стикається із твердими стінками, називається **змоченим периметром**. Відношення площини живого перерізу S до змоченого периметра Π називається **гідравлічним радіусом**:

$$r_{гидр} = \frac{S}{\Pi}. \quad (2.1)$$

Для круглої труби при напірній течії гідравлічний діаметр

$$d_r = 4 \cdot r_{гидр}. \quad (2.2)$$

Для каналу прямокутного перерізу зі сторонами a та b , що повністю заповнений рідиною:

$$r_{гидр} = \frac{S}{\Pi} = \frac{a \cdot b}{2(a + b)}, \quad (2.3)$$

Для каналу кільцевого поперечного перерізу, у якому рідина перебуває між внутрішнім і зовнішнім колом з діаметрами d_e і d_z відповідно, еквівалентний діаметр дорівнює

$$d_e = \frac{4S}{\Pi} = \frac{4 \left(\frac{\pi \cdot d_z^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \right)}{\pi \cdot d_z + \pi \cdot d_e} = d_z - d_e. \quad (2.4)$$

Об'ємною витратою називається кількість рідини, що проходить через живий переріз потоку за одиницю часу. Він може, бути обмірюваний об'ємним способом

$$Q = \frac{V}{T}, \quad (2.5)$$

де V – об'єм мірного бака;

T – час його наповнення.

Середньою швидкістю v називається така фіктивна швидкість, однакова для всіх точок живого перерізу, при якій витрата, підрахована по формулі

$$Q = v \cdot S. \quad (2.6)$$

При усталеному русі витрата через всі живі перерізи потоку однакова:

$$Q = v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = \dots = v_n \cdot S_n = const, \quad (2.7)$$

де v_1, v_2, \dots, v_n – середні швидкості;
 S_1, S_2, \dots, S_n – площини живих перерізів.

Вираз (1.7) називається рівнянням витрати, або рівнянням нерозривності (суцільності) потоку нестисливої рідини. З нього виходить, що середні швидкості відносяться між собою зворотно пропорційно відношенню площин живих перерізів:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (2.8)$$

Масова витрата Q_M (кг/с) визначається з виразу:

$$Q_M = \rho \cdot v_{сер} \cdot S, \quad (2.9)$$

Рівняння Бернуллі. При рішенні деяких найпростіших завдань про рух рідин часто в першому наближенні роблять допущення про те, що рідина, що рухається, є ідеальною. Під **ідеальною** розуміють рідину абсолютно нестисливу яка не розширюється, не здатну чинити опір розтяганню й зсуву. Головне, чим відрізняється рідина ідеальна від рідини реальної – це відсутність у неї в'язкості, що викликає здатність чинити опір зсуву, тобто виникненню дотичних напружень (тертя в рідині).

Отже, в ідеальній рідині, що рухається, можливий лише один вид напруження – напруження стискання, тобто тиск p , а дотичне напруження $\tau = 0$.

Основними рівняннями, що дозволяють вирішувати найпростіші задачі про рух ідеальної рідини, є рівняння витрати й рівняння Бернуллі.

Рівняння Бернуллі для потоку ідеальної рідини виражає собою закон збереження питомої енергії рідини уздовж потоку. Під **питомою** розуміють енергію, віднесену до одиниці ваги, об'єму або маси рідини. Зазвичай зручніше буває відносити енергію до одиниці ваги. У цьому випадку рівняння Бернуллі, що записане для двох перерізів елементарної струминки або потоку ідеальної рідини, має вигляд

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{u_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{u_2^2}{2 \cdot g} = H. \quad (2.10)$$

Для двох перерізів потоку реальної (в'язкої) рідини при усталеному русі, що плавно змінюється, рівняння Бернуллі має вигляд

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \sum h_n^{1-2}, \quad (2.11)$$

де v_1 та v_2 – дійсні (середні) швидкості відповідно в першому та у другому перерізах;

p_1 і p_2 – тиск рідини відповідно у першому та другому перерізах;

z_1 й z_2 – відстані від довільної горизонтальної поверхні порівняння до центрів перерізів;

$\sum h_n^{1-2}$ – сумарні втрати повного напору між перерізами.

З геометричної точки зору, складові рівняння Бернуллі являють собою наступне:

z – висоту, на якій розташовується центр живого перерізу над поверхнею порівняння $O-O$;

$\frac{p}{\rho \cdot g}$ – п'єзометричну висоту, яку можна виміряти п'єзометричною трубкою;

$\frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g}$ – висоту швидкісного напору, що дорівнює різниці рівнів у трубках повного й статичного напорів.

Суму висот $\frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\rho \cdot g} + z = H$ – називають повним гідродинамічним напором.

Коефіцієнт α (коефіцієнта Кориоліса) являє собою відношення дійсної кінетичної енергії до кінетичної енергії, підрахованої по середній швидкості. При турбулентному режимі руху $\alpha \approx 1$, при ламінарному в круглій трубці $\alpha = 2$.

За допомогою рівняння Бернуллі (1.10) розв'язується багато задач практичної гідравліки. Для цього вибираються два перерізи потоку так, щоб в одному з них величини z , p та v були відомі, а в другому невідомою була лише одна величина. Потім обирається горизонтальна поверхня порівняння. Її доцільно провести через центр одного з обраних перерізів, тоді z_1 або z_2 буде рівним нулю. Після спрощення рівняння Бернуллі, записаного для обраних перерізів, знаходять невідому величину (p , v або z).

Окрім рівняння Бернуллі використовується також рівняння нерозривності руху (1.8).

2.2. Методики розв'язування задач

Частина задач, віднесених до даної теми, розраховується на застосування рівняння Бернуллі для ідеальної рідини (2.10), тобто без обліку гідравлічних втрат (втрат напору) і нерівномірності розподілу швидкостей (коефіцієнта Кориоліса). Інша частина задач вирішується за допомогою рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини (2.11) у загальному випадку з урахуванням зазначених вище обставин.

Однак коефіцієнт Кориоліса варто враховувати лише при ламінарному режимі течії, коли $\alpha = 2$. Для турбулентних потоків можна приймати $\alpha = 1$.

При застосуванні рівняння Бернуллі важливо правильно обрати ті два перерізи, для яких воно записується.

Які перерізи рекомендується брати:

- вільну поверхню рідини в резервуарі (баці), де $v = 0$;
- вихід в атмосферу, де $p_{\text{ман}} = 0$; $p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}}$;

– переріз, де приєднаний той або інший манометр, п'єзометр або вакуумметр;

– вхід у трубу, у яку відбувається всмоктування повітря з атмосфери.

Рівняння Бернуллі рекомендується спочатку записати в загальному виді, а потім переписати із заміною його членів заданими буквеними величинами й виключити члени, що дорівнюють нулю.

При цьому необхідно пам'ятати наступне:

– вертикальну ординату z завжди відраховують від довільної горизонтальної поверхні нагору;

– тиск p , що входить у праву й ліву частини рівняння, повинний бути заданим в одній системі відліку (абсолютній або манометричній);

– сумарні втрати напору $\sum h_n^{1-2}$ завжди записуються в правій частині рівняння Бернуллі зі знаком «+»;

– величина $\sum h_n^{1-2}$ в загальному випадку складається з місцевих втрат і втрат на тертя по довжині.

Приклад 1. Визначити об'ємну витрату рідини Q у трубопроводі, якщо висоти рівнів рідини в п'єзометрі $H_1 = 300$ мм, у трубці Піто $H_2 = 500$ мм. Відстань по вертикалі між центрами перерізів $\Delta h = 200$ мм (рис. 2.1). Діаметр трубопроводу меншого перерізу $d = 100$ мм. Втратами напору знехтувати.

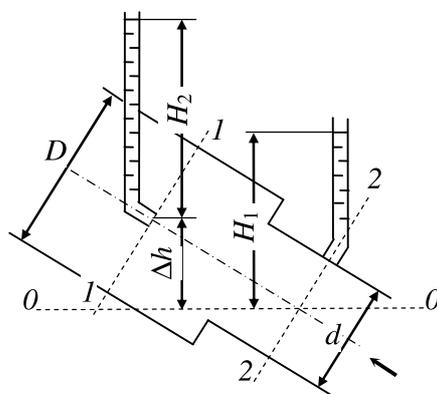


Рисунок 2.1 – До умови прикладу 1

Розв'язок

Проводимо в трубопроводі два перерізи: переріз 1-1 через місце установки п'єзометра та переріз 2-2 через носик трубки Піто. Перерізи проводяться перпендикулярно до напрямку руху рідини.

Проводимо поверхню порівняння 0-0 через центр перерізу 2-2. Поверхня порівняння завжди горизонтальна.

Через відсутність втрат напору (за умовою задачі) рідину можна вважати ідеальною. Запишемо рівняння Бернуллі для ідеальної рідини:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}.$$

Визначимо складові, що входять у рівняння Бернуллі. У цьому випадку $z_1 = 0$ – поверхня порівняння 0-0 проходить через центр перерізу 1-1;

$z_2 = \Delta h$ – відстань по вертикалі від поверхні 0-0 до центра перерізу 2-2;

$\frac{p_1}{\rho \cdot g} = H_1$ – показання п'езометра, або п'езометричний напір в перерізі 1-1;

$\frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} = H_2$ – показання трубки Піто, дорівнює сумі п'езометричного

та швидкісного напорів у перерізі 2-2.

Підставимо знайдені значення в рівняння Бернуллі:

$$H_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \Delta h + H_2,$$

звідки знайдемо швидкість руху рідини в перерізі 1-1:

$$\begin{aligned} v_1 &= \sqrt{2 \cdot g \cdot (\Delta h + H_2 - H_1)} = \\ &= \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (0,2 + 0,5 - 0,3)} = 2,8 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

Об'ємна витрата рідини в трубопроводі:

$$Q = v_1 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 2,8 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 0,022 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Приклад 2. На осі водопровідної труби розміщена трубка Піто з диференціальним ртутним манометром (рис. 2.2). Визначити максимальну швидкість руху води U_{\max} у трубі, якщо різниця рівнів ртуті у дифманометрі $\Delta h = 18$ мм.

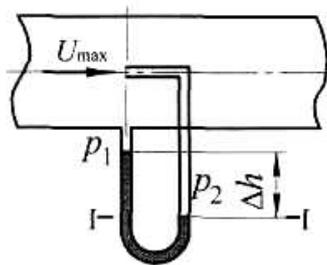


Рисунок 2.2 – До умови прикладу 2

Розв'язок

Трубка Піто дає можливість вимірювати швидкісний напір:

$$H = \frac{U_{\max}^2}{2g}.$$

Для визначення H запишемо рівняння рівноваги у ртутному дифманометрі відносно площини I–I:

$$p_1 + \Delta h \rho_{рт} g = p_2 + \Delta h \rho g,$$

де p_1 та p_2 – тиск у трубках на рівні вільної поверхні ртуті, Па;

ρ та $\rho_{рт}$ – густина відповідно води та ртуті, кг/м³ ($\rho \approx 1000$ кг/м³; та $\rho_{рт} = 13600$ кг/м³).

З цього рівняння

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \Delta h \left(\frac{\rho_{рт}}{\rho} - 1 \right) = 0,018 \left(\frac{13600}{1000} - 1 \right) = 0,227 \text{ м.}$$

Максимальна швидкість води у трубці

$$U_{\max} = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,227} = 2,1 \text{ м/с.}$$

Приклад 3. Визначити витрату речовини 1 з густиною $\rho = 700$ кг/м³, що подається по горизонтальній трубці діаметром $D = 25$ мм, в якій установлене сопло діаметром $d = 10$ мм і диференціальний ртутний манометр, показання якого $h = 100$ мм. Втратами напору знехтувати (рис. 2.3).

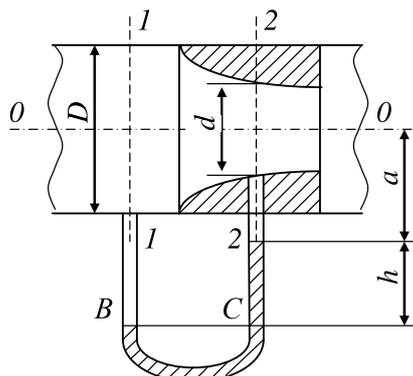


Рисунок 2.3 – До умови прикладу 3

Розв'язок

Складемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 та 2-2 щодо поверхні порівняння 0-0, проведеної через вісь труби ($z_1 = z_2 = 0$, $h_n = 0$, $\alpha = 1$):

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g}$$

та рівняння нерозривності $v_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = v_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$.

Розв'язуючи разом ці два рівняння, знаходимо швидкість

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right)}}$$

Різницю тисків ($p_1 - p_2$) у центрах ваги перерізів 1-1 та 2-2 знайдемо, використовуючи показання ртутного диференціального манометра. Із цією метою дорівнюємо вирази для тиску у точках B та C , що належать одній горизонтальній поверхні:

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot (a + h) = p_2 + \rho \cdot g \cdot a + \rho_{pm} \cdot g \cdot h.$$

Звідси $p_1 - p_2 = g \cdot (\rho_{pm} - \rho) \cdot h$. Густина ртуті $\rho_{pm} = 13600 \text{ кг/м}^3$. Підставляючи цей виразу формулу для визначення швидкості, знаходимо

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h \cdot (\rho_{pm} - \rho)}{\rho \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,1 \cdot (13600 - 700)}{700 \cdot \left(1 - \left(\frac{10}{25}\right)^4\right)}} = 6,56 \text{ м/с}.$$

Витрата речовини 1

$$Q = v_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 6,56 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} = 5,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Приклад 4. Визначити витрати води Q у трубі діаметром $d_1 = 250 \text{ мм}$, яка має плавне звуження до діаметра $d_2 = 120 \text{ мм}$. При цьому показання п'єзометрів: до звуження $h_1 = 50 \text{ см}$, у звуженні $h_2 = 30 \text{ см}$. Температура води $t_B = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2.4).

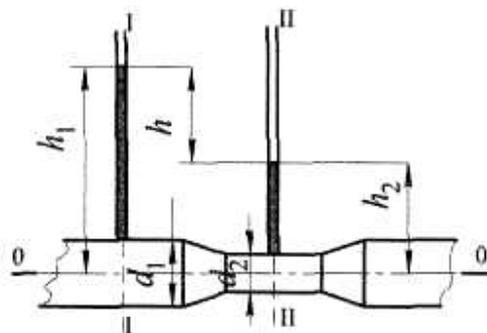


Рисунок 2.4 – До умови прикладу 4

Розв'язок

Складемо рівняння Бернуллі для перерізів I-I та II-II, беручи за порівняльну площину 0-0 вісь труби:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + h_w^{1-2}.$$

Враховуючи, що $z_1 = z_2 = 0$, нехтуючи втратами напору $h_w^{1-2} = 0$ та вважаючи, що $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, отримаємо

$$\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}.$$

Із закону нерозривності потоку $F_1 \cdot v_1 = F_2 \cdot v_2$ визначаємо

$$v_2 = v_1 \frac{F_1}{F_2} = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2.$$

Позначимо

$$\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = h_1 - h_2 = h.$$

У цьому разі рівняння Бернуллі набуває вигляду

$$h = \frac{v_1^2}{2g} \left(\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1 \right), \text{ звідки } v_1 = \sqrt{\frac{2gh}{\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1}}.$$

За такого значення швидкості витрати води становлять

$$Q = F_1 v_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1}}.$$

Насправді витрати води будуть меншими внаслідок втрат напору, якими знехтували. З урахуванням втрат формула набуває вигляду

$$Q = \mu \frac{\pi d_1^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1}}.$$

Приймаємо коефіцієнт витрат $\mu = 0,98$. Отже, витрати води будуть дорівнювати:

$$Q = 0,98 \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (0,5 - 0,3)}{\frac{0,25^4}{0,125^4} - 1}} = 0,124 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Швидкість у вузькому перерізі труби

$$v_2 = \frac{Q}{F_2} = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \frac{4 \cdot 0,024}{3,14 \cdot 0,125^2} = 2 \text{ м/с}.$$

Коефіцієнт μ залежить від співвідношення діаметрів d_2/d_1 та числа Рейнольдса, які треба визначити. $d_2/d_1 = 125/250 = 0,5$.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості, згідно табл. 2.1 за температури 20°C $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Критерій Рейнольдса становить:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{2 \cdot 0,125}{1 \cdot 10^{-6}} = 250000.$$

Згідно додатку 1 $\mu = 0,98$.

Отже, попередньо взяте значення μ відповідає дійсному значенню та перерахунок проводити не треба.

Приклад 5. На рис. 2.5 показано схему струминного насоса. Рідина під тиском подається у насадку 1, камеру змішування 2, яка переходить у дифузор 3, за яким розміщено відвідний (напірний) трубопровід 4. Вихідний переріз сопла та вхідний переріз камери змішування містяться у замкненій камері 5, до якої приєднується всмоктувальний трубопровід 6. Між виходом із насадки та входом у камеру 2 струмінь має мінімальний поперечний переріз, найбільшу швидкість і найменший тиск. Струмінь засмоктує за собою в горловину частину рідини із камери 5, внаслідок чого там створюється вакуум, під дією якого рідина із посудини 7 трубою 6 всмоктується у камеру 5.

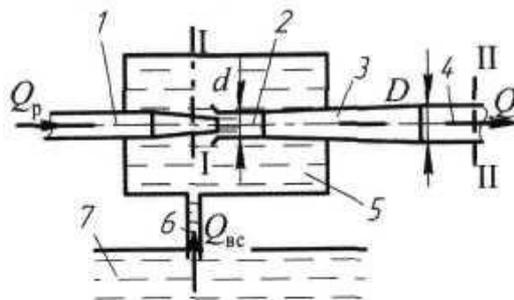


Рисунок 2.5 – До умови прикладу 5

Визначити вакуум у камері 5, якщо витрати робочої рідини $Q_p = 0,4$ л/с, всмоктуваної $Q_{вс} = 0,6$ л/с, діаметр горловини $d = 12$ мм, діаметр напірного трубопроводу 4 $D = 25$ мм. Втратами напору знехтувати. Густина рідини $\rho = 1000$ кг/м³.

Розв'язок

Кількість рідини, що виходить із трубопроводу 4:

$$Q = Q_p + Q_{вс} = 0,4 + 0,6 = 1,0 \text{ л/с.}$$

Швидкість руху в перерізах I–I та II–II, відповідно:

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,001}{3,14 \cdot 0,012^2} = 8,85 \text{ м/с;}$$

$$v_2 = v_1 \left(\frac{d}{D} \right)^2 = 8,85 \left(\frac{12}{25} \right)^2 = 2,04 \text{ м/с.}$$

Складемо рівняння Бернуллі для перерізів I–I та II–II відносно осі труби ($z_1 = z_2 = 0$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, $p_2 = p_{ам}$):

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}.$$

Звідси

$$P_{\text{вак}} = P_{\text{ат}} - P_1 = \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1000}{2} (8,85^2 - 2,04^2) = 37\,100 \text{ Па.}$$

Приклад 6. Подача шестеренного насоса об'ємного гідроприводу $Q = 80$ л/хв (рис. 2.6). Обрати діаметри всмоктувальної, нагнітальної та зливної гідроліній для таких розрахункових швидкостей: $v_{\text{вс}} = 1$ м/с, $v_{\text{н}} = 4$ м/с та $v_{\text{зл}} = 1,7$ м/с.

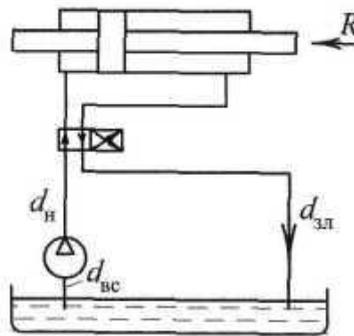


Рисунок 2.6 – До умови прикладу 6

Розв'язок

За заданими значеннями швидкостей руху рідини та її витратами визначаємо діаметри трубопроводів за формулою

$$Q = vF, \text{ звідки } d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}.$$

Розраховуємо внутрішні діаметри трубопроводів при $Q = 80$ л/хв = $80/(1000 \cdot 60) = 0,0013$ м³/с:

$$d_{\text{вс}} \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0013}{3,14 \cdot 1,0}} = 0,041 \text{ м;}$$

$$d_{\text{н}} \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0013}{3,14 \cdot 4,0}} = 0,021 \text{ м;}$$

$$d_{\text{зл}} \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0013}{3,14 \cdot 1,7}} = 0,032 \text{ м.}$$

За допомогою додатку 2 згідно ГОСТ 3262-75 оберемо труби сталеві, звичайні.

У таблиці наведено зовнішні діаметри $d_{\text{зов.}}$ та товщини стінки δ , а потрібний внутрішній діаметр розраховується за формулою $d_{\text{вн.}} = d_{\text{зов.}} - 2 \delta$.

Отже, приймаємо $d_{\text{зов.}}$ для гідроліній:

– всмоктувальної $48,0 \times 3,5$ мм; $d_{\text{вн.}} = 48,0 - 2 \cdot 3,5 = 41,0$ мм – рівний розрахунку;

- нагнітальної 26,8×2,8 мм; $d_{\text{вн.}} = 26,8 - 2 \cdot 2,8 = 21,2 > 21$ мм – достатній;
- зливної 42,3×3,2 мм; $d_{\text{вн.}} = 42,3 - 2 \cdot 3,2 = 35,9 > 32$ мм – достатній.

Згідно з обраними новими (стандартними) значеннями внутрішніх діаметрів трубопроводів уточнюємо значення швидкостей:

$$v_{\text{н}} = \frac{4Q}{\pi \cdot d_{\text{н}}^2} = \frac{4 \cdot 0,0013}{3,14 \cdot 0,021^2} = 3,75 \text{ м/с};$$

$$v_{\text{зл}} = \frac{4Q}{\pi \cdot d_{\text{зл}}^2} = \frac{4 \cdot 0,0013}{3,14 \cdot 0,0359^2} = 1,29 \text{ м/с}.$$

Швидкість у всмоктувальному трубопроводі залишається попередньою, рівною 1,0 м/с, тому що обраний стандартний внутрішній діаметр дорівнює розрахунковому.

Приклад 7. Теплообмінник складається з двох концентричних труб діаметром 29×2,5 та 54×2,5 мм. Внутрішньою трубою тече розсіл у кількості 3,73 т/год з густиною 1150 кг/м³. У міжтрубному просторі проходить газ у кількості 160 кг/год під тиском $P_{\text{абс}} = 3$ атм. з температурою 0 °С. Густина газу за нормальних умов становить 1,2 кг/м³. Знайти лінійні швидкості газу та рідини.

Розв'язок

Швидкість визначається:

$$v = \frac{M}{\rho \cdot S}, \quad S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,024^2}{4} = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

$$v_1 = \frac{1,036}{1150 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3}} = 2 \text{ м/с},$$

$$S_2 = S'_2 - S'_1, \quad S'_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,029^2}{4} = 0,66 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

$$S'_2 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,049^2}{4} = 1,88 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

$$S_2 = (1,88 - 0,66) \cdot 10^{-3} = 1,22 \cdot 10^{-3}.$$

Густина газу за нормальних умов:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot P_0} = 1,2 \frac{273 \cdot 3,039 \cdot 10^5}{273 \cdot 1,013 \cdot 10^5} = 3,6 \text{ кг/м}^3,$$

отже

$$v_2 = \frac{0,04}{3,6 \cdot 1,22 \cdot 10^{-3}} = 9,1 \text{ м/с}.$$

Приклад 8. Визначити необхідний діаметр зовнішньої труби в умовах попередньої задачі, якщо газ буде рухатись під атмосферним тиском у тій же кількості та з тією ж лінійною швидкістю.

Розв'язок

Швидкість та густина визначаються:

$$v = \frac{M}{\rho \cdot S}; \quad \rho = \rho_0 \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot P_0} = 1,2 \frac{273 \cdot 1}{273 \cdot 1} = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

Із формули для швидкості можемо виразити площу:

$$S = \frac{M}{\rho \cdot v} = \frac{0,04}{1,2 \cdot 9,1} = 0,0040 \text{ м}^2.$$

Так як площа круга дорівнює

$$S = \frac{\pi d^2}{4}; \quad d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}; \quad d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,004}{3,14}} = 71 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Приклад 9. Визначити режим руху води в кільцевому просторі теплообмінника типу «трубу в трубі». Зовнішня труба діаметром 96x3,5 мм, внутрішня 57x3 мм, витрати води 3,6 м³/год, середня температура 20 °С.

Розв'язок

Критерій Рейнольдса

$$Re = \frac{v \cdot d_e}{\nu}, \quad v = \frac{V}{S}, \quad S = 0,785 (d_3^2 - d_b^2),$$

$$d_3 = 96 - 3,5 - 3,5 = 89 \text{ мм}, \quad S = 0,785 (0,089^2 - 0,057^2) = 0,004 \text{ м}^2,$$

$$v = \frac{3,6}{3600 \cdot 0,004} = 0,25 \text{ м/с}, \quad d_e = d_3 - d_b = 89 - 57 = 32 \text{ мм},$$

$$\text{згідно додатку 3 } \nu = 1,0 \cdot 10^{-6}, \quad Re = \frac{0,25 \cdot 0,032}{1,0 \cdot 10^{-6}} = 7920 -$$

перехідний режим

Приклад 10. По водопровідній трубі проходить 10 м³/год води. Скільки води протягом години пройде по трубі подвоєного діаметру.

Розв'язок

Швидкості двох подібних систем:

$$v_1 = \frac{V_1}{S_1}, \quad v_2 = \frac{V_2}{S_2}, \quad v_1 = v_2,$$

$$\frac{V_1}{S_1} = \frac{V_2}{S_2}, \quad V_2 = \frac{V_1 \cdot S_2}{S_1},$$

$$S_2 = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2 d^2}{4} = 3,14 \cdot d^2 \text{ м}^2;$$

$$V_2 = \frac{10 \cdot 3,14 \cdot d^2}{0,785 d^2} = 40 \text{ м}^3/\text{год.}$$

2.3. Задачі для самостійного розв'язування

1. Визначити об'ємну витрату рідини Q у трубопроводі, якщо висоти рівнів рідини в п'езометрі H_1 , у трубці Піто H_2 . Відстань по вертикалі між центрами перерізів Δh (рис. 2.1). Діаметр трубопроводу меншого перерізу d . Втратами напору знехтувати. Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Варіанти завдань до задачі 1

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
H_1 , мм	250	400	500	450	350
H_2 , мм	320	550	650	580	400
Δh , мм	100	150	200	120	70
d , мм	60	80	110	90	45

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
H_1 , мм	650	550	750	600	700
H_2 , мм	810	670	840	790	920
Δh , мм	230	250	300	340	550
d , мм	120	140	190	210	310

2. На осі водопровідної труби розміщена трубка Піто з диференціальним ртутним манометром (рис. 2.2). Визначити максимальну швидкість руху води U_{\max} у трубці, якщо різниця рівнів ртуті у дифманометрі Δh . Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Варіанти завдань до задачі 2

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
Δh , мм	20	22	24	26	28

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
Δh , мм	30	32	34	36	38

3. Визначити витрату речовини 1 з густиною ρ , що подається по горизонтальній трубі діаметром D , в якій установлене сопло діаметром d і диференціальний ртутний манометр, показання якого h . Втратами напору знехтувати (рис. 2.3). Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Варіанти завдань до задачі 3

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
D , мм	40	30	45	55	35
d , мм	25	15	20	30	18
h , мм	150	175	180	225	200
ρ , кг/м ³	800	750	950	825	725

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
D , мм	60	50	65	75	70
d , мм	35	28	33	40	45
h , мм	210	160	190	145	155
ρ , кг/м ³	775	925	975	675	650

4. Визначити витрати води Q у трубі діаметром d_1 , яка має плавне звуження до діаметра d_2 . При цьому показання п'єзометрів: до звуження h_1 , у звуженні h_2 . Температура води t_B (рис. 2.4). Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Варіанти завдань до задачі 4

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
d_1 , мм	400	350	300	200	150
d_2 , мм	200	175	150	100	75
h_1 , см	120	110	100	95	90
h_2 , см	100	90	80	75	70
t_B , °C	10	15	20	25	30

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
d_1 , мм	100	90	80	76	70
d_2 , мм	50	45	40	38	35
h_1 , см	85	80	75	70	65
h_2 , см	65	60	55	50	45
t_B , °C	35	40	45	50	55

5. На с. 18 у прикладі 5 наведено опис до схеми струминного насоса (рис. 2.5). Визначити вакуум у камері 5, якщо витрати робочої рідини Q_p , всмоктуваної Q_{BC} , діаметр горловини d , діаметр напірного трубопроводу $4D$. Втратами напору знехтувати. Густина рідини $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Варіанти завдань до задачі 5

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
Q_p , л/с	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
Q_{BC} , л/с	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
d , мм	14	16	18	20	22
D , мм	28	32	36	40	44

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
Q_p , л/с	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
Q_{BC} , л/с	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6
d , мм	24	26	28	30	32
D , мм	48	52	56	60	64

6. Подача шестеренного насоса об'ємного гідроприводу Q (рис. 2.6). Обрати діаметри всмоктувальної, нагнітальної та зливної гідроліній для таких розрахункових швидкостей: v_{bc} , v_n та $v_{зл}$. Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Варіанти завдань до задачі 6

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
Q , л/хв	100	150	180	200	220
v_{bc} , м/с	60	75	90	100	110
v_n , м/с	300	320	340	360	400
$v_{зл}$, м/с	140	145	150	155	160

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
Q , л/хв	240	260	280	300	320
v_{bc} , м/с	115	120	125	130	140
v_n , м/с	420	440	460	480	500
$v_{зл}$, м/с	165	170	180	190	200

7. Теплообмінник складається з двох концентричних труб діаметром d_1 та d_2 . Внутрішньою трубою тече розсіл у кількості M_1 з густиною ρ_1 . У міжтрубному просторі проходить газ у кількості M_2 під тиском P_2 . з температурою t . Густина газу за нормальних умов становить ρ_0 . Знайти лінійні швидкості газу та рідини. Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Варіанти завдань до задачі 7

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
d_1 , мм	25×2	26×2	30×2,5	27×2	31×2,5
d_2 , мм	62×3	55×2,5	60×3	56×2,5	57×3
M_1 , т/год	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
ρ_1 , кг/м ³	1050	1060	1080	1090	1070
P_2 , атм	3,2	3,5	2,2	2,4	3,1
t , °С	1	2	3	4	5
ρ_0 , кг/м ³	1,05	1,08	1,12	1,14	1,13
M_2 , т/год	100	110	140	200	170

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
d_1 , мм	32×2,5	33×2,5	35×2,5	34×2,5	28×2
d_2 , мм	59×3	63×3	64×3	65×3	58×3
M_1 , т/год	3,6	3,8	4,0	3,9	4,1
ρ_1 , кг/м ³	1140	1130	1120	1110	1100
P_2 , атм	1,8	1,9	2,5	2	1,5
t , °С	10	9	8	7	6
ρ_0 , кг/м ³	1,09	1,1	1,16	1,18	1,21
M_2 , т/год	120	150	180	210	130

8. Визначити необхідний діаметр зовнішньої труби в умовах попередньої задачі, якщо газ рухається під тиском P_2 у тій же кількості та з тією ж лінійною швидкістю. Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Варіанти завдань до задачі 8

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
P_2 , атм	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

Продовження таблиці 2.8

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
P_2 , атм	1,15	1,25	1,35	1,45	1,05

9. Визначити режим руху води в кільцевому просторі теплообмінника типу «трубу в трубі». Зовнішня труба діаметром d_3 , внутрішня d_6 , витрати води V , середня температура t . Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Варіанти завдань до задачі 9

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
d_3 , мм	90×3,5	110×3,5	95×3,5	120×3,5	135×3,5
d_6 , мм	60×3	70×3	50×3	90×3	85×3
V , м ³ /год	2,5	4,0	4,5	4,3	2,7
t , °С	25	15	45	35	55

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
d_3 , мм	115×3,5	130×3,5	140×3,5	150×3,5	125×3,5
d_6 , мм	80×3	65×3	75×3	95×3	55×3
V , м ³ /год	2,3	3,5	3,8	2,0	4,7
t , °С	40	50	30	65	60

10. Визначити режим руху води в кільцевому просторі теплообмінника типу «трубу в трубі». Зовнішня труба діаметром d_3 , внутрішня d_6 , витрати води M , середня температура t . Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 2.10.

11. По водопровідній трубі 1 проходить V м³/год води. Скільки води протягом години пройде по трубі 2 з відомим відношенням діаметру d_2 до діаметру d_1 . Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 2.11.

Таблиця 2.10 – Варіанти завдань до задачі 10

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
d_3 , мм	80	70	90	130	110
d_6 , мм	50	40	60	80	70
M , кг/год	1000	1100	1200	1300	1400
t , °С	40	50	30	65	60

Продовження таблиці 2.10

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
d_3 , мм	60	50	100	140	120
d_6 , мм	30	25	65	90	75
M , кг/год	1500	1600	1700	1800	1900
t , °C	25	15	45	35	55

Таблиця 2.11 – Варіанти завдань до задачі 11

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
d_2/d_1 , мм	1,75	2,2	2,5	2,3	3
V , м ³ /год	11	12	13	14	15

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
d_2/d_1 , мм	2,1	2,8	3,1	1,8	1,5
V , м ³ /год	16	18	20	19	17

2.4. Зміст звіту

Звіт з роботи повинен містити:

1. Номер та назву роботи.
2. Мету роботи.
3. Загальні відомості (стисло).
4. Розв'язок задач згідно варіанту.
5. Висновки з виконання роботи.

2.5. Контрольні запитання

1. Поняття усталеного та неусталеного потоків рідини.
2. Характеристика рівномірного та нерівномірного руху рідини.
3. Характеристика напірного та безнапірного руху рідини.
4. Фізичний зміст лінії течії, трубки течії та елементарної струминки.
5. Поняття живого або поперечного перерізу потоку та змоченого периметру.
6. Поняття витрати.
7. Поняття об'ємної та масової витрати.
8. Поняття лінійної швидкості.
9. Еквівалентний діаметр, гідравлічний радіус та змочений периметр.
10. Поняття ламінарного та турбулентного руху.
11. Рівняння нерозривності потоку.

12. Рівняння Бернуллі для ідеальної рідини.
13. Рівняння Бернуллі для в'язкої (реальної) рідини.
14. Умови застосування рівняння Бернуллі.

3. ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ

Мета роботи:

Перевірити дослідним шляхом теоретичні положення щодо розподілу складових рівняння Бернуллі за перерізами за певної швидкості руху рідини у трубопроводі.

3.1. Загальні відомості

Рівняння Бернуллі – це основне рівняння руху рідин. Воно складається з трьох членів, сума яких – величина стала для різних перерізів потоку ідеальної рідини відносно площини порівняння.

Для елементарної струминки ідеальної рідини це рівняння має вигляд

$$z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{U^2}{2g} = idem = H_d, \quad (3.1)$$

де z – геометричний напір, або питома потенціальна енергія положення центра тяжіння живого перерізу відносно площини порівняння, або відстань від горизонтальної в довільному місці проведеної порівняльної площини до центра тяжіння живого перерізу потоку рідини;

$\frac{p}{\rho \cdot g}$ – п'єзометричний напір, або питома потенціальна енергія тиску;

$\frac{U^2}{2g}$ – швидкісний напір, або питома кінетична енергія.

Сума цих трьох членів рівняння є величиною однаковою (*idem*) і називається гідродинамічним напором (H_d).

Якщо рухається реальна рідина, то гідродинамічний напір не залишається сталим у різних перерізах через втрати частини енергії на подолання різного роду гідравлічних опорів. Це втрати напору за довжиною від одного перерізу до іншого на внутрішнє тертя чи по стінках трубопроводу h_l і місцеві втрати – h_r ; загальні втрати h_w є їх сумою $h_l + h_r$.

Отже, рівняння Бернуллі для двох перерізів елементарної струминки реальної рідини матиме вигляд

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{U_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{U_2^2}{2 \cdot g} + h_w, \quad (3.2)$$

де

$$h_w = h_l + h_r = \lambda \frac{l}{d} \frac{U_2^2}{2g} + \xi \frac{U_2^2}{2g}, \quad (3.3)$$

де λ – коефіцієнт опору тертя по довжині;

l – відстань між перерізами, м;

d – діаметр труби, м;

ξ – коефіцієнт місцевого опору.

Місцеві швидкості U_1 та U_2 для елементарної струминки у відповідних перерізах є величинами сталими.

Якщо розглядати потік рідини, то швидкості в перерізах не залишаються постійними. Тому рівняння Бернуллі для двох перерізів потоку реальної рідини матиме вигляд

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_w, \quad (3.4)$$

де v_1 та v_2 – середні швидкості у відповідних перерізах;

α_1 та α_2 – коефіцієнти нерівномірності розподілу швидкостей у перерізах. Ці коефіцієнти є відношенням дійсної кінетичної енергії до кінетичної енергії, розрахованої за середньою швидкістю:

$$\alpha = \frac{K}{K_{сеп}}. \quad (3.5)$$

Для ламінарного руху рідини в круглих трубах коефіцієнт $\alpha = 2$, для турбулентного – $\alpha = 1,03 \dots 1,1$. На практиці для турбулентного руху α беруть за одиницю.

Розглянемо круглу трубу змінного перерізу (рис. 3.1). Перерізи I, II і III мають діаметри d_1, d_2, d_3 . Розглянемо на цьому рисунку зміну членів рівняння Бернуллі від першого перерізу до інших. Запишемо рівняння для трьох перерізів:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_w^{1-2} = z_3 + \frac{p_3}{\rho \cdot g} + \alpha_3 \frac{v_3^2}{2 \cdot g} + h_w^{1-3} \quad (3.6)$$

Проведемо площину порівняння. Відстань від центрів тяжіння перерізів до площини порівняння – це геометричні напори $z_1 > z_2 > z_3$. Якби труба була горизонтальною, то $z_1 = z_2 = z_3$. Тоді площину порівняння доцільно було б провести по осі труби.

Для того щоб пояснити розподіл п'єзометричних та гідродинамічних напорів, приєднаємо до кожного перерізу п'єзометри та гідродинамічні трубки. П'єзометри приєднуються так, щоб їх кінці розміщувались разом з внутрішньою твірною поверхні труби. Гідродинамічні трубки входять усередину труби перпендикулярно до осі, їх вимірювальні кінці повернуті назустріч потоку під кутом 90° і розміщені в центрі тяжіння перерізів. Застосуємо закони збереження енергії та нерозривності потоку. Припустимо,

що за швидкості v_1 у перерізі I напори z_1 , $\frac{p_1}{\rho \cdot g}$ та $\frac{v_1^2}{2g}$ розподілилися так, як це показано на рис. 3.1. У цьому перерізі втрати напору $h_w = 0$ (початок відліку).

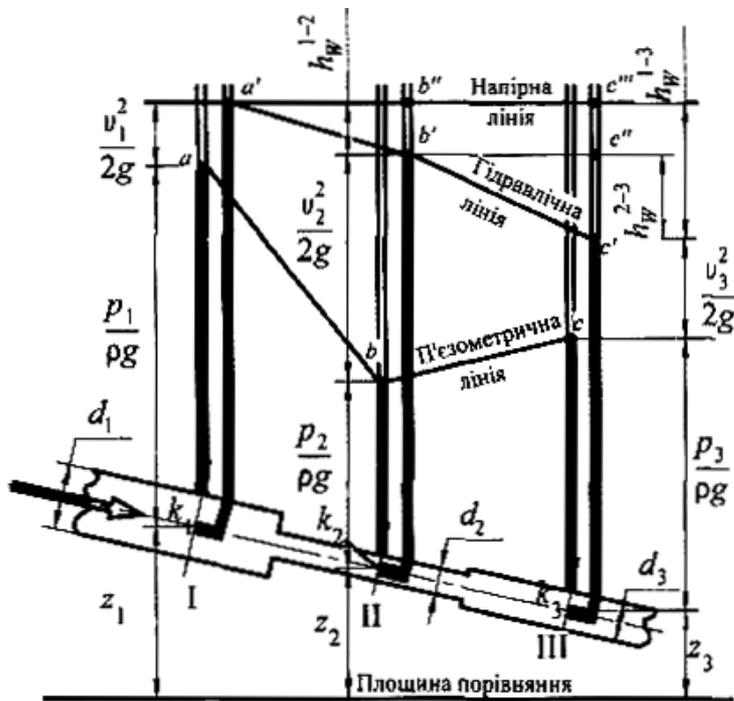


Рисунок 3.1 – Кругла труба змінного перерізу

У перерізі II труба має найменший діаметр ($d_2 < d_1$). Відповідно до зазначених законів, швидкість v_2 підвищиться, а тиск зменшиться. Отже, $z_2 < z_1$ (труба має гідравлічний уклон),

$$\frac{p_2}{\rho \cdot g} < \frac{p_1}{\rho \cdot g}, \quad \frac{v_2^2}{2 \cdot g} > \frac{v_1^2}{2 \cdot g} -$$

це відповідно відрізки k_2b та bb' .

На відстані між I і II перерізами з'являються втрати напору h_w^{1-2} , які на рисунку позначено відрізком $b'b''$. У перерізі III діаметр d_3 більший за діаметр d_2 , але менший за d_1 . Отже, $z_3 < z_2$;

$$\frac{p_3}{\rho \cdot g} > \frac{p_2}{\rho \cdot g} \text{ та } \frac{p_3}{\rho \cdot g} < \frac{p_1}{\rho \cdot g}, \text{ а } \frac{v_3^2}{2 \cdot g} < \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \text{ та } \frac{v_3^2}{2 \cdot g} > \frac{v_1^2}{2 \cdot g}.$$

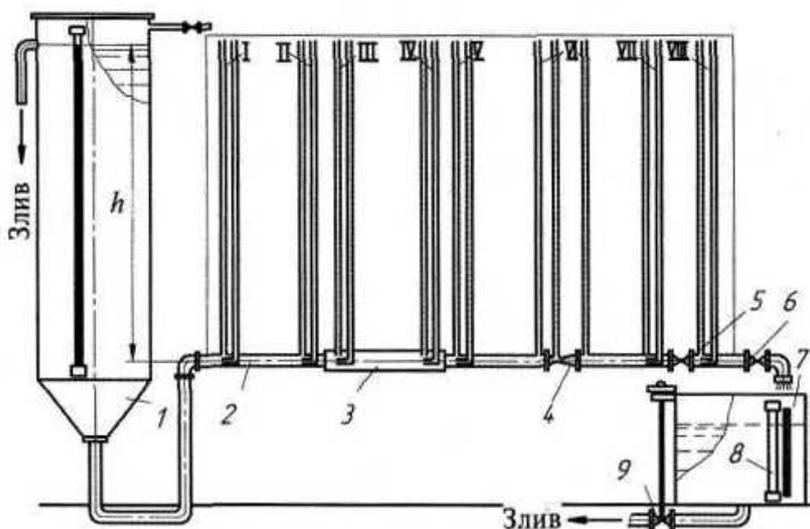
Втрати напору від перерізу II до перерізу III h_w^{2-3} позначено на рисунку відрізком $c'c''$, а від I до III – відрізком $c'c'''$ (h_w^{1-3}).

Ламана лінія abc є лінією зміни п'єзометричного напору і називається п'єзометричною лінією; лінія $a'b'c'$ означає зміну гідродинамічного напору і називається гідравлічною лінією, або лінією втрат напору. Горизонтальна

лінія $a'b''c'''$ – напірна лінія, чи лінія наявного напору, чи повна енергія замкненої системи.

3.2. Будова та принцип дії лабораторної установки

З великої посудини 1 (рис. 3.2) вода під напором h потрапляє в горизонтальний трубопровід 2, який складається з кількох прямих ділянок і місцевих опорів. На початку та в кінці кожної прямої ділянки трубопроводу, а також до і після місцевого опору приєднано п'єзометри (ліві трубки) та гідродинамічні трубки (праві). Разом трубки створюють трубку Піто. Винятком є витратомір Вентурі 4, де встановлено три п'єзометри. Вода з труби потрапляє у вимірювальну посудину 7, а з неї – на злив через вентиль 9. Швидкість або витрата рідини регулюється вентилем 6.



Рисунк 3.2 – Схема лабораторної установки

3.3. Методика проведення дослідження

1. Визначаємо витрати рідини, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q = \frac{V}{T},$$

де V – об'єм рідини в посудині 7 на рис. 6.2, який визначається за різницею показань рівнеміра 8 і площею посудини: $V = (H_2 - H_1)F_n, \text{м}^3$;

h_1, h_2 – відповідно початковий і кінцевий рівень води, м;

$$F_n = \frac{\pi D^2}{4}.$$

де D – діаметр посудини, м.

2. Розраховуємо швидкість руху рідини в трубопроводі:

$$v = \frac{Q}{F}.$$

де F – площа живого перерізу потоку рідини в трубопроводі, m^2 .

3. Обчислюємо середні показання кожної трубки окремо.

4. На рис. 6.2 позначимо п'езометричну і гідравлічну лінії за показаннями п'езометричних і гідродинамічних трубок.

5. Отримані результати вимірів та розрахунків заносимо в табл. 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1 – Дослідні та розрахункові дані

Напір	Середні показання трубок за групами								Рівень, м	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	h_1	h_2
H_s										
H_d										

Таблиця 3.2 – Дослідні та розрахункові дані

Об'єм води V, m^3	Час дослід T, c	Витрати води $Q, m^3/c$	Площа труби F, m^2	Швидкість води $v, m/c$

3.4. Зміст звіту

Звіт з роботи повинен містити:

1. Номер та назву роботи.
2. Мету роботи.
3. Загальні відомості (стисло).
4. Опис будови та принципу дії лабораторної установки.
5. Опис дослідження із розрахунками та заповненою таблицею.
6. Висновки з виконання роботи.

3.5. Контрольні запитання

1. Що таке усталений і неусталений рух?
2. Чи можна застосовувати рівняння Бернуллі за неусталеного руху?
3. Умови застосування рівняння Бернуллі.
4. Який вигляд матиме рівняння Бернуллі, якщо вода в трубці не буде рухатися?
5. Чому п'езометр приєднується одним кінцем до внутрішньої поверхні труби?
6. Що покаже гідродинамічна трубка, якщо її кінець встановити за потоком рідини?
7. Що таке трубка Піто? Як нею визначити швидкість?

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ОПОРІВ ТРУБОПРОВОДІВ

Мета роботи:

1. Вивчити основні теоретичні положення з гідравлічних опорів трубопроводів.
2. Опанувати методику досліджень гідравлічних опорів та методики розв'язування задач.
3. Розв'язати задачі згідно варіанту.

4.1. Загальні відомості

Гідравлічні опори або натиск, який витрачається на подолання опорів $h_{z.o.}$ (у м), є сумою втрат натиску на подолання опорів по довжині труби h_{mp} (втрати на тертя об стінки трубопроводу) та втрати натиску на подолання місцевих опорів h_m :

$$h_{z.o.} = h_{mp} + h_m, \quad (4.1)$$

Втрати натиску на подолання опорів тертя по довжині труби:

$$h_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \text{ м}, \quad (4.2)$$

де λ – коефіцієнт опору тертя;

l – довжина трубопроводу, м;

d – діаметр трубопроводу, м;

v – середня швидкість потоку, м/с;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Для ламінарного руху рідини в круглих трубах ($Re \leq 2320$)

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (4.3)$$

Для перехідного та турбулентного руху рідини ($2320 < Re < 100000$)

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (4.4)$$

Наведені формули справедливі для ізотермічних умов течії рідини. За умови нагрівання або охолодження рідини в трубі змінюється її в'язкість. Тому в разі неізотермічного руху рідини втрати тиску або напору множать на коефіцієнт f .

За ламінарного руху:

$$f = \left(\frac{Pr_{cm}}{Pr} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + 0,22 \left(\frac{Gr \cdot Pr}{Re} \right)^{0,15} \right], \quad (4.5)$$

де Pr – критерій Прандтля;

Pr_{cm} – критерій Прандтля у пристінного шару;

Gr – критерій Грасгофа.

За турбулентного руху:

$$f = \left(\frac{\text{Pr}_{em}}{\text{Pr}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (4.6)$$

Під час руху рідини по трубопроводах некруглого перетину за розрахунку втрат напору використовують ті ж формули, але як діаметр труби використовують еквівалентний діаметр.

У випадку руху рідини вигнутими трубами (змійовиками) величини втрати напору та тиску множать на поправковий коефіцієнт x :

$$x = 1 + 3,54 \frac{d}{2R}, \quad (4.7)$$

де R – радіус кривизни змійовика, м;
 d – еквівалентний діаметр труби, м.

Потік рідини під час руху в трубопроводі зустрічає різні перешкоди, які викликають зміни швидкості потоку або напрямку його руху та призводять до виникнення місцевих втрат напору. Ці перешкоди називаються місцевими опорами; до них належать раптове розширення, звуження або поворот трубопроводу, хрестовини, трійники, діафрагми, а також запірні та регулюючі крани, вентиля та засувки (рис. 4.1).

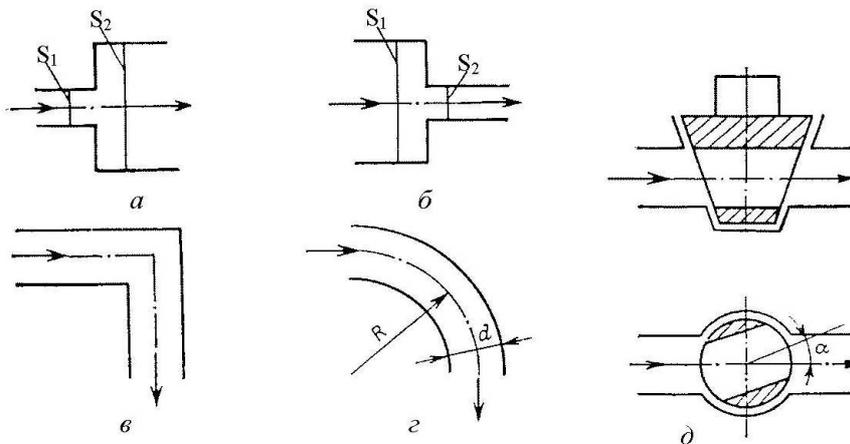


Рисунок 4.1 – Схеми місцевих опорів: а – розширення; б – звуження; в, г – повороти; д – кран

До місцевих опорів належать місця трубопроводу, в яких швидкість змінюється за величиною або напрямком (раптове розширення, звуження або заворот трубопроводу, а також регулювальні крани і вентиля).

$$h_m = \sum \varphi_M \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (4.8)$$

де $\sum \varphi_M$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів (безрозмірні).

Коефіцієнт місцевого опору φ_m залежить від виду опору:

- на вході рідини в трубу коефіцієнт залежить від форми вхідної кромки труби. Якщо краї гострі, то $\varphi_m = 0,5$; якщо краї тупі, $\varphi_m = 0,25$. У разі закругленої кромки $\varphi_m = 0,06 \dots 0,005$;

- на виході з труби $\varphi_m = 1$;

- у випадку раптового розширення труби коефіцієнт місцевого опору залежить від відношення квадрата діаметра вузької труби до квадрата діаметра широкої труби (див. додаток 4, таблиця Д.1);

- у випадку раптового звуження труби коефіцієнт також залежить від відношення квадрата діаметра вузької труби до квадрата діаметра широкої (див. додаток 4, таблиця Д.2);

- за наявності колін у трубах (рис. 4.2) коефіцієнт залежить від кута коліна α (див. додаток 4, таблиця Д.3);



Рисунок 4.2 – Схема відводу

- у випадку відводів, що встановлені на комунікаціях трубопроводів (рис. 4.3), коефіцієнт визначається за формулою

$$\varphi_m = \left[0,131 \left(\frac{d}{R} \right)^{3,5} \right] \cdot \frac{\alpha}{90}, \quad (4.9)$$

де d – діаметр труби, м;

R – радіус закруглення, м;

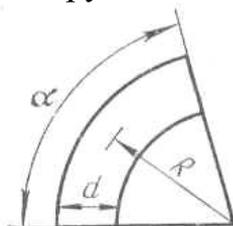


Рисунок 4.3 – Схема коліна

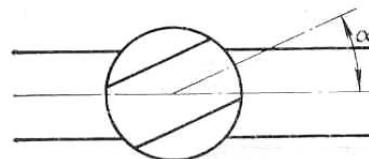


Рисунок 4.4 – Схема крана

- у кранах (рис. 4.4) коефіцієнт залежить від кута повороту крана α (див. додаток 4, таблиця Д.4).

Усереднені значення коефіцієнтів місцевих опорів: наведено в додатку 4, табл. Д.5.

Загальний гідравлічний опір мережі трубопроводів $\Delta P_{заг}$ є однією з визначальних величин під час розрахунку потужності двигуна насоса N для перекачування рідини:

$$N = \frac{Q_v \cdot \Delta P}{1000 \eta_y}, \text{ кВт}, \quad (4.10)$$

де Q_v – об'ємна витрата рідини, м³/с;

η_y – загальний коефіцієнт корисної дії насосної установки (дорівнює 0,6...0,8), який є добутком складових гідравлічного ККД насоса η_n , ККД передачі η_n та ККД двигуна η_o .

Загальний гідравлічний опір є сумою витрати тиску на: подолання опору тертя та місцевих опорів ΔP_{mp} , підйом рідини ΔP_{nid} та різниці тиску в просторі на вході до мережі трубопроводів та на виході з неї ΔP_{don} :

$$\Delta P_{заг} = \Delta P_{mp} + \Delta P_{nid} + \Delta P_{don}, \quad (4.11)$$

Втрати тиску на подолання опору тертя та місцевих опорів розраховуються з рівняння

$$\Delta P_{mp} = \left(\lambda \frac{l}{d_e} + \sum \varphi_m \right) \frac{v^2 \cdot \rho}{2}, \quad (4.12)$$

де v – постійна швидкість потоку, м/с, $v = Q_v / S$;

S – площа перерізу труби, м².

Для змійовика:

$$\Delta P_{mp.зм} = \Delta P_{mp} \cdot x. \quad (4.13)$$

З рівняння (4.12) коефіцієнт тертя в прямій трубі:

$$\lambda = \left(\frac{2 \Delta P_{mp}}{v^2 \cdot \rho} - \sum \varphi_m \right) \frac{d_e}{l}. \quad (4.14)$$

Для змійовика коефіцієнт тертя дорівнює

$$\lambda = \left(\frac{2 \Delta P_{mp.зм}}{v^2 \cdot \rho} - \sum \varphi_m \right) \frac{d_e}{l} = \left(\frac{2 \Delta P_{mp} \cdot x}{v^2 \cdot \rho} - \sum \varphi_m \right) \frac{d_e}{l}. \quad (4.15)$$

Втрати тиску на підйом рідини:

$$\Delta P_{nid} = \rho \cdot g \cdot H, \quad (4.16)$$

де H – перепад рівнів на вході та виході з трубопроводу, м.

4.2. Будова та принцип дії лабораторної установки

Лабораторна установка для дослідження гідравлічних опорів складається з трьох трубопроводів, з'єднаних між собою (рис. 4.5). Перший трубопровід 1 являє собою мідний змійовик, який розміщено всередині теплообмінника 2. Його виконано з трубки внутрішнім діаметром $d_1 = 8$ мм; змійовик має 40 витків діаметром $D = 110$ мм. Загальна довжина першого трубопроводу $l_1 = 15$ м. До нього також належать бобишки 5' і 5" (вхід та вихід з них слід вважати місцевими опорами – вхід і вихід з труби).

Другий трубопровід 3 є продовженням змійовика, його виготовлено зі сталюї труби з внутрішнім діаметром $d_2 = 20$ мм. Довжина другого

трубопроводу $l_2 = 1,5$ м. На ньому розміщено один вентиль 4 (місцевий опір). Бобишка 5' з'єднує змійовик та трубопровід 3.

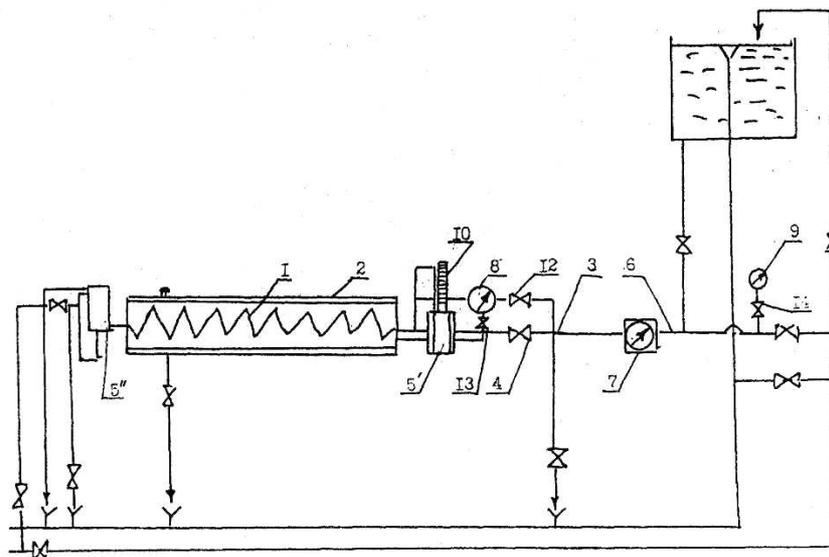


Рисунок 4.5 – Схема лабораторної установки

Третій трубопровід 6 є продовженням другого трубопроводу 3. Це стальна труба з внутрішнім діаметром $d_3 = 13$ мм. Місцеві опори: 6 колін під кутом 90° та витратомір 7. Довжина трубопроводу $l_3 = 2,6$ м.

Для вимірювання тиску в мережі використовуються два манометри 8 та 9. Третій трубопровід закінчується в місці приєднання манометра 9.

Для вимірювання температури води використовують термометр 10, установлений на трубопроводі подачі води, яка регулюється за допомогою вентилів 4 та 12. Підключення манометрів здійснюється за допомогою вентилів 13 та 14.

4.3. Методика досліджень та методики розв'язування задач

Методика досліджень. Перед початком роботи перевірити, щоб усі вентиля були закриті.

Відкрити вентиль 11 для промивання мережі та закрити його через 5 хв.

Повністю відкрити вентиля 4, 13, 14. Обережно відкрити вентиль 12, відрегулювати задане значення тиску (не більше 450 кПа) за його допомогою та за показаннями манометра 9. Через 5 хв записати в журналі спостережень показання манометрів 8 і 9 та термометра 10. За допомогою секундоміра визначити час повного оберту стрілки циферблата витратоміра.

Зафіксований об'єм води, який пройшов через витратомір V (м^3), поділити на час проходження цього об'єму τ (с), у результаті отримаємо значення об'ємної витрати Q_V ($\text{м}^3/\text{с}$).

Усі фіксовані значення V , τ і Q_V занести до робочого зошита.

Обробка експериментальних даних.

1. Розрахунок коефіцієнтів тертя у змійовику на ділянці першого трубопроводу.

Із рівняння витрати розрахувати середню швидкість води в змійовику

$$v_1 = \frac{Q_V}{0,785 \cdot d_1^2}. \quad (4.17)$$

У нашому випадку $d_1 = 9 \cdot 10^{-3}$ м.

Коефіцієнт тертя в змійовику $\lambda_{зм}$ розраховують за формулою (4.14), в якій $\Delta P_{тр.зм}$ відповідає показанню манометра 8 (у Па), а $\sum \varphi_m$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів на ділянці першого трубопроводу: це два входи в трубу та два виходи з труби (бобишки 5' і 5'').

Об'ємну густину води з достатньою вірогідністю можна приймати $\rho = 1000$ кг/м³;

2. Розрахунок гідравлічного опору мережі трубопроводів.

Загальний гідравлічний опір мережі розраховується за формулою (4.11). У нашому випадку

$$\Delta P_{заг.} = \Delta P_{тр} + \Delta P_{нід}, \quad (4.18)$$

де

$$\Delta P_{тр} = \Delta P_{тр1} + \Delta P_{тр2} + \Delta P_{тр3}; \quad (4.19)$$

$$\Delta P_{нід} = \rho \cdot g \cdot H, \quad (H = 0,6 \text{ м}). \quad (4.20)$$

Для розрахунку $\Delta P_{тр1}$ для першого трубопроводу використовують формули (4.7); (4.12); (4.13). У результаті їхнього спільного перетворення отримаємо:

$$\Delta P_{тр1} = \left(\lambda \frac{l}{d} \left(1 + 3,54 \frac{d}{D} \right) + \sum \varphi_m \right) \frac{v_1^2 \cdot \rho}{2}. \quad (4.21)$$

Коефіцієнт тертя λ_1 залежить від значення критерію Re. Його можна розрахувати за формулою (4.3) або (4.4).

$\Delta P_{тр2}$ для другого трубопроводу розрахувати за формулою 4.14, де $l_2 = 1,5$ м, а $d_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ м.

Втрати тиску $\Delta P_{тр3}$ у третьому трубопроводі розрахувати також за формулою (4.14), при цьому враховуємо, що $l_3 = 2,5$ м; $d_3 = 13 \cdot 10^{-3}$ м. Сума коефіцієнтів місцевих опорів розраховується за допомогою наведеної у додатку 4 таблиці Д.4. На цій ділянці трубопроводу знаходяться два трикутники (90°), чотири коліна (90°) і витратомір.

Отримане значення $\Delta P_{заг.}$ порівняти із заміряним значенням $\Delta P_{заг.}$, яке відповідає показанням манометра 9.

Методики розв'язування задач.

Приклад 1. Всмоктувальний трубопровід насоса має довжину $l = 5$ м та діаметр $d = 32$ мм, висота всмоктування $h = 0,8$ м (рис. 4.6). Визначити

тиск наприкінці трубопроводу (перед насосом), якщо витрата масла ($\rho = 890 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 10 \text{ мм}^2/\text{с}$), $Q = 50 \text{ л/хв}$, коефіцієнт опору коліна $\xi_k = 0,3$, вентилі $\xi_v = 4,5$, фільтра $\xi_f = 10$.

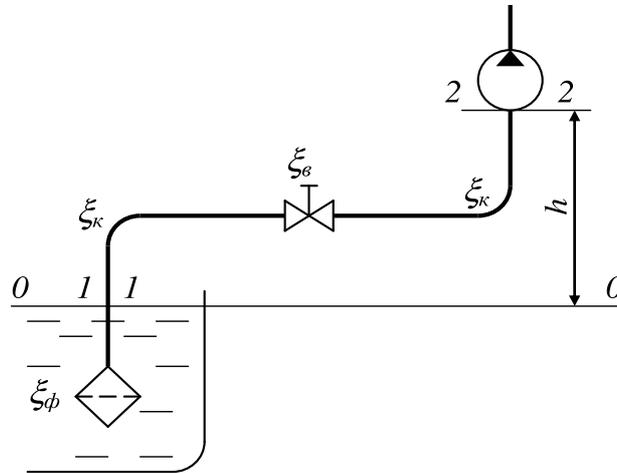


Рисунок 4.6 – До умови прикладу 1

Розв'язок

Визначаємо швидкість, число Рейнольдса та коефіцієнт гідравлічного тертя по довжині при витраті $Q = \frac{50}{60} = 0,833 \text{ л/с}$:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,833 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,032^2} = 1,04 \text{ м/с};$$

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{1,04 \cdot 0,032}{10 \cdot 10^{-6}} = 3330;$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} = \frac{0,3164}{3330^{0,25}} = 0,042.$$

Сума коефіцієнтів місцевих опорів

$$\Sigma \xi = \xi_f + 2 \cdot \xi_k + \xi_v = 10 + 2 \cdot 0,3 + 4,5 = 15,1.$$

Втрати напору у всмоктувальному трубопроводі

$$h_n = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \left(0,042 \cdot \frac{5}{0,032} + 15,1 \right) \cdot \frac{1,04^2}{2 \cdot 9,81} = 1,2 \text{ м}.$$

З рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 та 2-2 відносно поверхні порівняння 0-0

$$\frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 = \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2 + h_n,$$

у якому $v_1 = 0$, $p_1 = p_{\text{атм}} = 10^5 \text{ Па}$, $z_1 = 0$, $v_2 = 1,04 \text{ м/с}$, $z_2 = h$, $h_n = 1,2 \text{ м}$, $\alpha = 1$, знаходимо тиск перед насосом

$$p_2 = p_{атм} - \rho \cdot g \cdot (h + h_n) - \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 =$$

$$= 100000 - 890 \cdot 9,81 \cdot (0,8 + 1,2) - \frac{890}{2} \cdot 1,04^2 = 82000 \text{ Па.}$$

Приклад 2. До горизонтальної труби змінного перерізу ($D = 150$ мм, $d = 50$ мм), по якій прокачують рідину ($\rho = 750$ кг/м³), приєднаний диференціальний манометр, різниця рівнів ртуті в якому $h = 120$ мм (рис. 4.7).

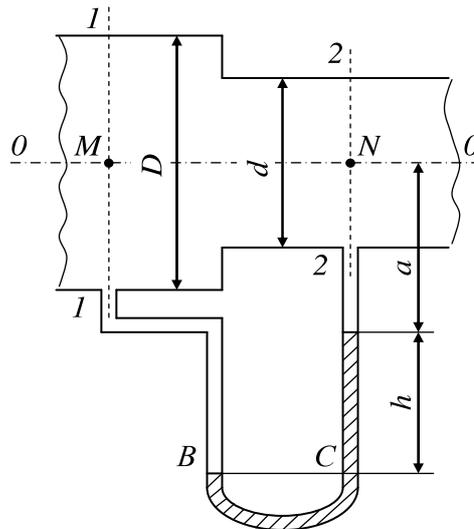


Рисунок 4.7 – До умови прикладу 2

Розв'язок

Запишемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 й 2-2 відносно поверхні 0-0 ($z_1 = z_2 = 0$):

$$\frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} = \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \xi_{\text{вс}} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g},$$

де $\xi_{\text{вс}}$ – коефіцієнт опору раптового звуження, який визначається за формулою

$$\xi_{\text{вс}} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right) = 0,5 \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 - \left(\frac{50}{150} \right)^2 \right] = 0,445.$$

З рівняння Бернуллі знайдемо різницю п'єзометричних висот, приймаючи $\alpha = 1$

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} - \frac{p_2}{\rho \cdot g} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \cdot \left(1 + \xi_{\text{вс}} - \frac{v_1^2}{v_2^2} \right).$$

З рівняння нерозривності потоку (2.8) одержуємо

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{d}{D}\right)^2.$$

Тому

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} - \frac{p_2}{\rho \cdot g} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \cdot \left(1 + \xi_{p3} - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right).$$

Нехай тиск у точках M і N дорівнюють відповідно p_1 і p_2 . Тоді тиск в точках B і C

$$\begin{aligned} p_B &= p_1 + \rho \cdot g \cdot (a + h); \\ p_C &= p_2 + \rho \cdot g \cdot a + \rho_{pm} \cdot g \cdot h. \end{aligned}$$

Оскільки

$$p_B = p_C,$$

то

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot (a + h) = p_2 + \rho \cdot g \cdot a + \rho_{pm} \cdot g \cdot h,$$

або

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} - \frac{p_2}{\rho \cdot g} = h \cdot \left(\frac{\rho_{pm}}{\rho} - 1\right).$$

Підставляючи вираження (4.14) у вираження (4.13), одержуємо

$$\begin{aligned} v_2 &= \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h \cdot \left(\frac{\rho_{pm}}{\rho} - 1\right)}{1 + \xi_{p3} - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,12 \cdot \left(\frac{13600}{750} - 1\right)}{1 + 0,445 - \left(\frac{50}{150}\right)^4}} = 5,26 \text{ м/с.} \\ v_1 &= v_2 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 = 5,26 \cdot \left(\frac{50}{150}\right)^2 = 0,584 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

Витрата рідини

$$Q = v_2 \cdot S_2 = 5,26 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} = 0,0103 \text{ м}^3/\text{с} = 10,3 \text{ л/с}.$$

Приклад 3. Прямим горизонтальним трубопроводом довжиною $l = 150$ м необхідно подавати $V = 10$ м³/год рідини. Припустимі втрати натиску $h_{mp} = 10$ м. Визначити необхідний діаметр трубопроводу, коефіцієнт тертя якого $\lambda = 0,03$.

Розв'язок

$$\text{Припустимі втрати натиску на тертя } h_{mp} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}.$$

Швидкість визначається, як $v = \sqrt{\frac{d \cdot h_{mp} \cdot 2g}{\lambda \cdot l}}$, а також швидкість можна виразити: $v = \frac{V}{S} = \frac{4V}{3,14d^2}$. Прирівняємо та позбудемось кореня:

$$\frac{16V^2}{9,86d^4} = \frac{d \cdot h_{mp} \cdot 2g}{\lambda \cdot l}.$$

$$\text{Звідси } d = \sqrt[5]{\frac{V^2 \cdot \lambda \cdot l \cdot 8}{9,86 \cdot h_{mp} \cdot g}} = \sqrt[5]{\frac{(2,8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,03 \cdot 150 \cdot 8}{9,86 \cdot 10 \cdot 9,8}} = 0,043 \text{ м.}$$

Приклад 4. Трубопроводом з внутрішнім діаметром $d = 75$ мм треба перекачати $V = 25$ м³/год рідини густиною $\rho = 1200$ кг/м³ в'язкістю $\mu = 1,7 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Кінцева точка трубопроводу вище за початкову на $h = 24$ м. Довжина трубопроводу $l = 112$ м. На ньому встановлено 2 прямокутних вентилів та 5 прямокутних відводи. Знайти необхідну потужність насосної установки, якщо її ККД 0,6.

Розв'язок

Потужність насосної установки $N = \frac{V \cdot \Delta P}{1000\eta}$. Загальний гідравлічний опір $\Delta P = \Delta P_{mp} + \Delta P_{нід}$. $\Delta P_{нід} = \rho \cdot g \cdot h = 1200 \cdot 9,8 \cdot 24 = 282240$ Па.

$$\Delta P_{mp} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \varphi_{м.о.} \right) \frac{v^2 \cdot \rho}{2}.$$

Згідно таблиці Д.5 додатку 4 сумарний коефіцієнт місцевих опорів

$$\sum \varphi_{м.о.} = 2 \cdot 1 + 5 \cdot 0,13 = 2,65.$$

$$\text{Швидкість } v = \frac{V}{S} = \frac{4V}{3,14d^2}, \quad v = \frac{4 \cdot 0,0069}{3,14(75 \cdot 10^{-3})^2} = 1,56 \text{ м/с.}$$

Критерій Рейнольдса $Re = \frac{1,56 \cdot 75 \cdot 10^{-3} \cdot 1200}{1,7 \cdot 10^{-3}} = 82588$, отже режим руху – турбулентний.

$$\text{При цьому } \lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} = \frac{0,3164}{82588^{0,25}} = 0,019.$$

$$\Delta P_{mp} = \left(0,019 \frac{112}{75 \cdot 10^{-3}} + 2,65 \right) \frac{1,56^2 \cdot 1200}{2} = 45300 \text{ Па.}$$

$$\Delta P = 45300 + 282240 = 327540.$$

Таким чином, необхідна потужність насосної установки

$$N = \frac{6,94 \cdot 327540}{1000 \cdot 0,6} = 3,8 \text{ кВт.}$$

4.4. Задачі для самостійного розв'язування

1. Всмоктувальний трубопровід насоса має довжину l та діаметр d , висота всмоктування дорівнює h (рис. 4.6). Визначити тиск наприкінці трубопроводу (перед насосом), якщо витрата масла густиною ρ та в'язкістю ν дорівнює Q , коефіцієнт опору коліна дорівнює ξ_{κ} , вентиля – ξ_v та фільтра – ξ_{ϕ} . Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань до задачі 1

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
$l, \text{ м}$	3,5	4	3	4,5	6
$d, \text{ мм}$	25	28	23	30	35
$h, \text{ м}$	2	1,5	2,5	1	1,5
$\rho, \text{ кг/м}^3$	800	820	840	810	830
$\nu, \text{ мм}^2/\text{с}$	8,5	8	10,5	11	9
$Q, \text{ л/хв}$	30	35	45	40	55
ξ_{κ}	0,31	0,29	0,32	0,28	0,27
ξ_v	4,55	4,54	4,53	4,56	4,51
ξ_{ϕ}	9,8	9,7	9,6	9,9	10,1

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
$l, \text{ м}$	3,4	4,1	3,6	4,7	5,5
$d, \text{ мм}$	24	29	26	31	34
$h, \text{ м}$	1,6	1,7	2,6	1,9	1,8
$\rho, \text{ кг/м}^3$	850	860	900	880	870
$\nu, \text{ мм}^2/\text{с}$	8,6	8,8	10,2	10,4	9,2
$Q, \text{ л/хв}$	32	52	54	38	39
ξ_{κ}	0,33	0,35	0,36	0,37	0,34
ξ_v	4,11	4,45	4,56	4,58	4,6
ξ_{ϕ}	10,2	10,4	9,4	9,3	9,5

2. До горизонтальної труби змінного перерізу від D до d , по якій прокачують рідину густиною ρ , приєднаний диференціальний манометр, різниця рівнів ртуті в якому h (рис. 4.7). Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 4.2.

3. Прямим горизонтальним трубопроводом довжиною l необхідно подавати рідину в кількості V . Припустимі втрати натиску h_{mp} . Визначити необхідний діаметр трубопроводу, коефіцієнт тертя якого λ . Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.2 – Варіанти завдань до задачі 2

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
D , мм	120	130	160	140	125
d , мм	70	85	90	75	95
ρ , кг/м ³	740	760	770	790	780
h , мм	100	105	110	120	108

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
D , мм	115	135	155	165	145
d , мм	80	95	100	105	110
ρ , кг/м ³	800	820	840	830	810
h , мм	90	115	125	130	118

Таблиця 4.3 – Варіанти завдань до задачі 3

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
l , м	100	120	180	200	140
h_{np} , м	11	8	12	13	15
V , м ³ /год	9	9,5	13	13,5	12
λ	0,04	0,02	0,06	0,1	0,08

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
l , м	130	160	190	170	110
h_{np} , м	14	7	16	6	5
V , м ³ /год	11	14	11,5	8	8,5
λ	0,05	0,07	0,11	0,01	0,09

4. Трубопроводом з внутрішнім діаметром d треба перекачати рідини у кількості V з густиною ρ та в'язкістю μ . Кінцева точка трубопроводу вище за початкову на h . Довжина трубопроводу l . У заданій кількості на ньому встановлено пробочні крани, прямоточні вентиля та прямокутні відводи. Знайти необхідну потужність насосної установки за заданого ККД. Варіанти вихідних даних для розрахунків наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Варіанти завдань до задачі 4

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
d , мм	65	80	50	90	55
ρ , кг/м ³	15	30	17	50	40
μ , Па·с	1,8	1,22	1,73	1,64	1,55

Продовження таблиці 4.4

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	1	2	3	4	5
$V, \text{ м}^3/\text{год}$	5	6	7	9	8
$l, \text{ м}$	100	110	105	115	120
вентиль прямоточний	1	2	1	3	1
відвід	1	3	2	1	1
ККД	0,65	0,67	0,68	0,69	0,73

Вихідні дані	Варіанти завдань				
	6	7	8	9	10
$d, \text{ мм}$	70	100	95	85	60
$\rho, \text{ кг/м}^3$	20	35	23	45	10
$\mu, \text{ Па}\cdot\text{с}$	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$V, \text{ м}^3/\text{год}$	11	12	15	13	10
$l, \text{ м}$	130	140	145	135	125
кран пробочний	3	1	3	1	2
відвід	3	2	1	1	2
ККД	0,74	0,75	0,72	0,71	0,7

4.5. Зміст звіту

Звіт з роботи повинен містити:

1. Номер та назву роботи.
2. Мету роботи.
3. Загальні відомості (стисло).
4. Опис будови та принципу дії лабораторної установки.
5. Опис дослідження із результатами обробки експериментальних даних.
6. Розв'язок задач згідно варіанту.
7. Висновки з виконання роботи.

4.6. Контрольні запитання

1. Що таке гідравлічні опори?
2. Як визначаються втрати натиску на подолання опорів тертя по довжині труби?
3. Як визначити коефіцієнт опору тертя? Від чого він залежить?
4. Як розрахувати втрату тиску або напору за неізотермічних умов?
5. Як розрахувати втрату тиску або напору у випадку руху рідини по змійовикам?

6. Що таке місцеві опори? Коли вони виникають? Наведіть приклади.
7. За якою формулою визначаються втрати натиску на подолання місцевих опорів?
8. Як визначається потужність двигуна насоса?
9. Сумою яких складових є загальний гідравлічний опір?
10. Як визначаються втрати тиску на подолання опору тертя та місцевих опорів?
11. Як визначаються втрати тиску на підйом рідини?

ДОДАТОК 1
ЗАЛЕЖНІСТЬ КОЕФІЦІЄНТА ВИТРАТ ВОДОМІРА
ВЕНТУРИ ВІД ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА (при $d_2/d_1 = 0,5$)

Re	200	400	600	800	1000	4000	10⁴	2·10⁴	4·10⁴	3·10⁵	10⁶
μ	0,7	0,8	0,84	0,86	0,88	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99

ДОДАТОК 2
РОЗМІРИ ТА МАСИ ТРУБ ЗГІДНО ГОСТ 3262-75

Зовнішній діаметр	Товщина стінки труб			Маса 1 м труб, кг		
	легких	звичайних	підсиленних	легких	звичайних	підсиленних
10,2	1,8	2,0	2,5	0,37	0,40	0,47
13,5	2,0	2,2	2,8	0,57	0,61	0,74
17,0	2,0	2,2	2,8	0,74	0,80	0,98
21,3	2,35	-	-	1,10	-	-
21,3	2,5	2,8	3,2	1,16	1,28	1,43
26,8	2,35	-	-	1,42	-	-
26,8	2,5	2,8	3,2	1,5	1,66	1,86
33,5	2,8	3,2	4,0	2,12	2,39	2,91
42,3	2,8	3,2	4,0	2,73	3,09	3,78
48,0	3,0	3,5	4,0	3,33	3,84	4,34
60,0	3,0	3,5	4,5	4,22	4,88	6,16
75,5	3,2	4,0	4,5	5,71	7,05	7,88
88,5	3,5	4,0	4,5	7,34	8,34	9,32
101,3	3,5	4,0	4,5	8,44	9,60	10,74
114,0	4,0	4,5	5,0	10,85	12,15	13,44
140,0	4,0	4,5	5,5	13,42	15,04	18,24
165,0	4,0	4,5	5,5	15,88	17,81	21,63

ДОДАТОК 3
ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ НА ЛІНІІ НАСИЧЕННЯ

Температура, t, °С	Густина, ρ , кг/м ³	Питома теплоємність, C_p , кДж/(кг·К)	Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/(м·К)	Кінематичний коефіцієнт в'язкості, $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Критерій Прандтля, Pr
0	999,8	4,237	0,551	1,790	13,7
10	999,6	4,212	0,575	1,300	9,56
20	998,2	4,204	0,599	1,000	7,06
30	995,6	4,199	0,618	0,805	5,50
40	992,2	4,199	0,634	0,659	4,30
50	988,0	4,199	0,648	0,556	3,56
60	983,2	4,204	0,659	0,479	3,00
70	977,7	4,212	0,668	0,415	2,56
80	971,8	4,216	0,674	0,366	2,23
90	965,3	4,224	0,680	0,326	1,95
100	958,3	4,229	0,683	0,295	1,75

ДОДАТОК 4
ДО ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ МІСЦЕВИХ ОПОРІВ

Таблиця Д.1 – Місцеві опори у випадку раптового розширення труби

d_1^2 / d_2^2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
φ_m	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16	0,09	0,04	0,01	0

Таблиця Д.2 – Місцеві опори у випадку раптового звуження труби

d_1^2 / d_2^2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
φ_m	0,47	0,45	0,38	0,34	0,30	0,25	0,20	0,15	0,09	0

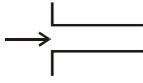
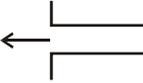
Таблиця Д.3 – Місцеві опори за наявності колін у трубах

α	5	10	15	30	45	60	90
φ_m	0,02	0,03	0,04	0,13	0,24	0,47	1,13

Таблиця Д.4 – Місцеві опори у кранах

α	5	10	20	30	40	45	50	60	65	70
φ_m	0,05	0,29	1,56	5,47	17,3	31,2	52,6	20,6	48,6	675

Таблиця Д.5 – Усереднені значення коефіцієнтів місцевих опорів

Вид опору		φ_m
	1. Вхід повітря (рідини) у трубопровод: а) труба із закругленими кінцями б) труба з гострими кінцями	0,2 0,5
	2. Вихід з трубопроводу: а) повітря б) рідини	1,0 1,0
	3. Засув газовий	0,5
	4. Кран рідинний пробочний	2,0
	5. Відвід: а) для газу; б) для рідини	0,23 0,13
	6. Вентиль нормальний (рідинний)	4...5
	7. Вентиль прямочний	1,0

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Механіка рідин і газів в галузі [Електронне видання] : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» / А.О. Шевченко, О.А. Маяк, С.В. Прасол. Харків : ДБТУ, 2024. 92 с. URL : <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/61194>.

2. Гідравліка та гідропневмопривід : опорний конспект лекцій для студентів, що навчаються за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» (освітній ступінь – «бакалавр»). Видання 2-ге, доповнене і перероблене / А.О. Шевченко, І.В. Бабкіна, О.А. Маяк, С.В. Прасол. Харків : ХДУХТ, 2020. 67 с.

3. Гідравліка, гідравлічні машини та гідропневмопривід. Ч. 1. Гідравліка і гідравлічні машини / В.Р. Кулінченко, І.В. Дубковецький, О.М. Деменюк. Київ : НУХТ, 2011. 246 с.

4. Гідромеханіка в прикладах та задачах : навч. посібник / В.Г. Чебан, Ю.О. Рутковський, А.М. Зинченко, О.А. Бревнов. Алчевськ: ДонДТУ, 2010. 189 с.

5. Гідравліка та гідропневмопривід : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів, що навчаються за напрямом підготовки

6.050502 «Інженерна механіка» у 2 ч. Ч. 1. Гідростатика та гідродинаміка / О.А. Маяк, А.О. Шевченко. Харків : ХДУХТ, 2016. 31 с.

6. Процеси і апарати харчових виробництв. У 2 ч. Ч.1. Основи курсу. Гідравлічні, гідромеханічні та механічні процеси : конспект лекцій для студентів, що навчаються за спеціальністю 181 «Харчові технології» (освітній ступінь – «бакалавр») / О.І. Черевко [та ін.]. Харків : ХДУХТ, 2020. С. 20–37.

7. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник. 2-ге вид., доп. та випр. / О.І. Черевко, А.М. Поперечний. Харків : Світ Книг, 2014. С. 42–86.

8. Механіка рідин та газів в галузі (спец. 131 «Прикладна механіка») [Електронний ресурс] : Портал дистанційного навчання Державного біотехнологічного університету. URL :

<http://moodle.btu.kharkiv.ua/course/view.php?id=2426>.

9. Механіка рідин і газів в галузі (спец. 133 «Галузеве машинобудування») [Електронний ресурс] : Портал дистанційного навчання Державного біотехнологічного університету. URL :

<http://moodle.btu.kharkiv.ua/course/view.php?id=2327>.

Навчальне електронне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимах

МЕХАНІКА РІДИН ТА ГАЗІВ В ГАЛУЗІ

Частина 2.

ОСНОВИ КІНЕМАТИКИ ТА ДИНАМІКИ РІДИНИ

Методичні вказівки
до практичних та лабораторних робіт

Укладачі:

ШЕВЧЕНКО Андрій Олександрович
МИХАЙЛОВ Валерій Михайлович
ПРАСОЛ Світлана Володимирівна

Підп. до друку 30.12.2024 р. Один електронний оптичний диск (CD-ROM);
супровідна документація. Об'єм даних 1,32 Мб. Тираж 10 прим.

Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44