

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до проведення практичних занять, організації самостійної роботи
та виконання розрахунково-графічної роботи
з навчальної дисципліни

«ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ»

*(для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності
183 – Технології захисту навколишнього середовища)»*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2025**

Методичні рекомендації до проведення практичних занять, організації самостійної роботи та виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Прикладна механіка рідин і газів» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. Ю. Л. Коваленко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 33 с.

Укладач канд. техн. наук, доц. Ю. Л. Коваленко

Рецензент

В. Є. Бекетов, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної екології міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою інженерної екології міст, протокол № 14 від 29.12.2023

Методичні рекомендації призначені для здобувачів спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища. Подано вимоги до оформлення, засоби та послідовність виконання завдань, список рекомендованих джерел, наведено приклади оформлення робіт.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ.....	5
2 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ З ДИСЦИПЛІНИ.....	6
3 САМОСТІЙНА РОБОТА.....	15
4 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА.....	16
4.1 Теоретичні основи розрахунків.....	17
4.2 Загальний вигляд трубопроводу.....	21
4.3 Вихідні дані для виконання завдання.....	23
4.4 Послідовність виконання завдання і приклад розрахунку.....	24
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	32

ВСТУП

Дисципліна «Прикладна механіка рідин і газів» складається із трьох змістових модулів.

Змістовий модуль 1 Явища переносу.

Змістовий модуль 2 Турбулентність.

Змістовий модуль 3 Механіка відкритих потоків.

Щодо кожної теми передбачено проведення практичних занять і закріплення знань студентів шляхом виконання практичних завдань.

Самостійна робота передбачає вивчення конспекту лекцій з дисципліни та додаткової літератури, а також виконання розрахункових завдань за темами курсу.

У процесі виконання розрахунково-графічного завдання здобувачі отримують поглиблення теоретичних знань та надбання практичних навичок у розрахунках характеристик потоків реальних рідин у напірних трубопроводах.

1 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Метою викладання навчальної дисципліни «Прикладна механіка рідин і газів» є формування у здобувачів системи знань про основні фізичні властивості рідин і газів та навичок їхнього використання в ході проєктування та обчислення параметрів роботи окремих видів обладнання, техніки і технологій захисту навколишнього середовища, моделювання та вирішення конкретних природозахисних завдань. Формування у здобувачів вміння продемонструвати навички вибору, планування, проєктування та обчислення параметрів роботи окремих видів обладнання, техніки і технологій захисту навколишнього середовища.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студенти мають навчитися:

- застосовувати сучасні теорії, підходи, принципи фундаментальні положення з фізики, математики, для моделювання руху рідин і газів в атмосферному повітрі, у водних об'єктах, у відкритих руслах, димових трубах, вентиляційних каналах та елементах обладнання природоохоронного призначення в процесі вирішення конкретних природозахисних завдань;

- застосовувати навички обчислення параметрів роботи окремих видів обладнання, техніки і технологій захисту навколишнього середовища, використовуючи знання фізико-хімічних властивостей рідин, газів та багатокомпонентних середовищ.

2 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ З ДИСЦИПЛІНИ

Практичне заняття № 1

Тема: «Основні терміни і визначення. Фізичні властивості рідин та газів».

Для повторення теоретичного матеріалу практичного заняття перегляньте розділи конспекту лекцій:

- 1.1 Основні терміни й визначення;
- 1.2 Фізичні властивості рідин і газів.

Завдання для виконання:

1. Рідина зберігається в бочці циліндричної форми. Діаметр бочки – 0,9 м. Висота – 1,5 м. Маса рідини – $(1\,000 + n)$, кг. Визначте густину рідини.
2. Тиск повітря 100 кПа, температура повітря n °С Визначте густину повітря.

Де n – Ваш порядковий номер у списку групи.

Відповідь подайте у вигляді файлу (у форматі PDF) з описом використаних формул, перевіркою одиниць розмірностей і ходу розрахунків.

Практичне заняття № 2

Тема: «Гідростатичний тиск».

Для повторення теоретичного матеріалу практичного заняття перегляньте розділи конспекту лекцій:

- 1.3 Гідростатичний тиск. Рівняння гідростатики. Енергетичний сенс напору;
- 1.4 Прилади для вимірювання гідростатичного тиску.

Завдання для виконання:

1. Визначити висоту капілярного підйому води у скляній трубці діаметром $d = 0,2$ мм. Графічну інтерпретацію вихідних даних завдання наведено на рисунку 1.1.

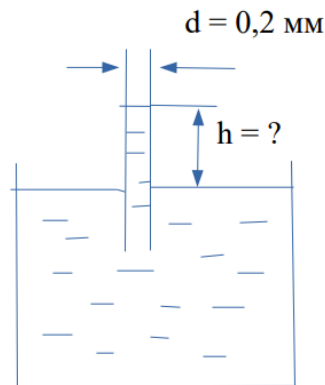


Рисунок 1.1 – Капілярний підйом води у скляній трубці

2. Визначити надлишковий тиск на вільній поверхні бензину в закритій посудині, якщо рівень бензину в п'єзометрі вищий за рівень бензину в посудині на 1 350 мм (рис. 1.2).

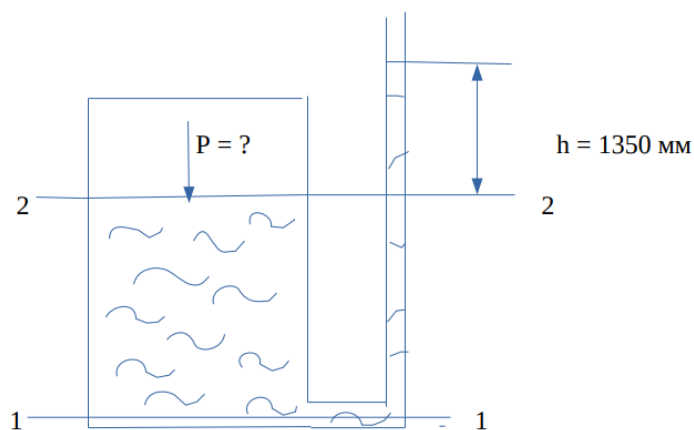


Рисунок 1.2 – Закрита посудина з п'єзометром

3. Визначити тиск води на дні річки глибиною 3 м. Відповідь виразити в Па, МПа, мм вод. ст., мм рт. ст., psi.

Відповіді подайте у вигляді файлу (бажано у форматі PDF) з описом використаних формул, ходу розрахунків і довідкових даних.

Практичне заняття № 3

Тема: «Тиск на поверхню».

Для повторення теоретичного матеріалу практичного заняття перегляньте розділ конспекту лекцій: «1.5 Тиск на плоску і криволінійну поверхні. Закон Архімеда».

Завдання для виконання:

1. Визначити силу тиску, що діє на стінку акваріуму, заповненого водою, якщо його ширина – $(100 + n)$ см, висота – 600 мм, де n – номер студента у списку групи.

2. Щільно закрита бочка заповнена водою. У кришці бочки встановлено трубку висотою n м, заповнену водою до верхньої позначки. Внутрішній діаметр бочки – 2 м. Висота бочки – 3 м (рис. 1.3). Визначити силу тиску, яка діє на дно бочки.

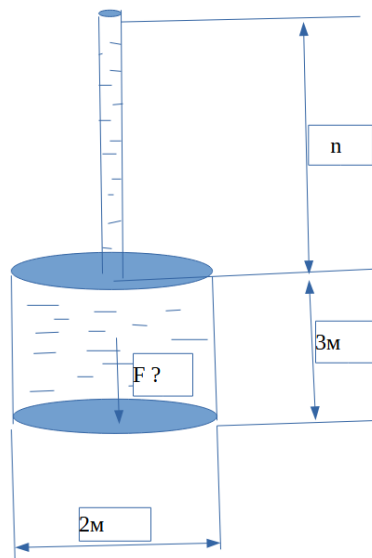


Рисунок 1.3 – Бочка з трубкою, заповненою водою до верхньої позначки

Практичне заняття № 4

Тема: «Основні види руху рідин. Витрати рідини. рівняння Бернуллі».

Для повторення теоретичного матеріалу практичного заняття перегляньте розділи конспекту лекцій:

- 2.1 Основні види руху рідини, витрата рідини, рівняння нерозривності рідини;
- 2.2 Рівняння Бернуллі для ідеальної і реальної рідин, його фізичний сенс.

Завдання для виконання:

1. За якого режиму (ламінарного або турбулентного) рідина протікатиме у трубопроводі діаметром 40 см зі швидкістю 0,5 м/с? В'язкість рідини $= 10^{-6}$ м²/с.

Рекомендована послідовність розв'язання задачі:

- розрахувати значення критерія Re;
- для визначення характеру руху порівняти значення Re з $Re_{кр}$.

2. У трубі діаметром $d = 0,5$ м рухається вода зі швидкістю $u = 0,8$ м/с.

Визначити її об'ємну витрату Q і масову витрату M .

Оцінити обсяг басейну W , який можна заповнити водою з цієї труби за добу.

3. Вода рухається в горизонтальній трубі, що звужується. Діаметр труби перед початком звуження – 50 мм, після звуження – 25 мм. Швидкість води на вході у звуження – 2 м/с. Тиск води на вході у трубу 2 ат.

Визначити швидкість і тиск води на виході із труби.

Рекомендована послідовність розв'язання задачі:

- подати умови задачі у графічній формі. (Зразок наведено на рисунку 1.4);
- використовуючи рівняння нерозривності, визначити швидкість води на виході із труби;
- використовуючи рівняння Бернуллі для ідеальної рідини вивести співвідношення для визначення тиску води на виході з ділянки труби, що звужується;
- перевірити розмірність.

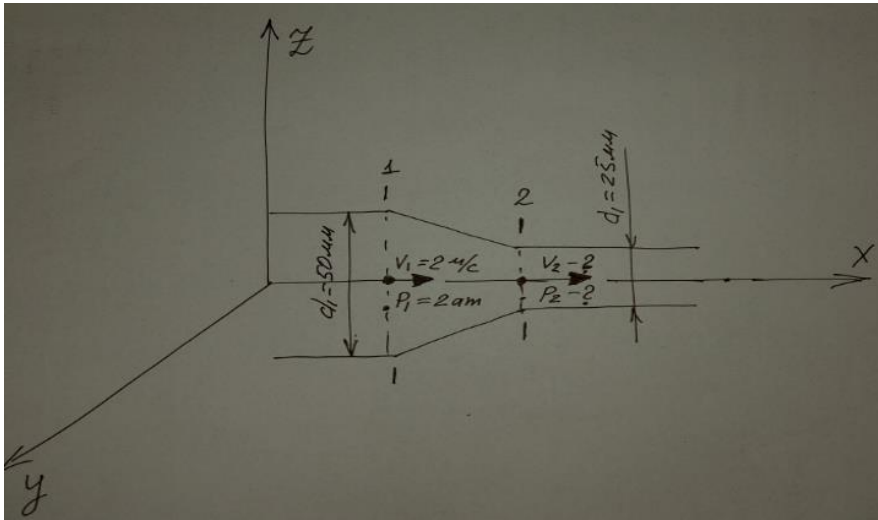


Рисунок 1.4 – Вихідні дані задачі в графічній формі

Практичне заняття № 5

Тема: «Гідравлічний опір».

Для повторення теоретичного матеріалу практичного заняття перегляньте розділи конспекту лекцій:

- 2.3 Гідравлічний опір;
- 2.4 Місцеві гідравлічні опори; місцеві втрати тиску.

Завдання для виконання:

1. По трубопроводу рухається вода. Витрата води – 120 л/с. Кінематична в'язкість води – $0,9 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Еквівалентна шорсткість стін труби – $0,5 \times 10^{-3} \text{ м}$. Діаметр труби – 200 мм. Довжина труби – 15 м.

Визначити втрати тиску.

Рекомендована послідовність розв'язання задачі:

- виразити діаметр труби та витрату води в одиницях системи СІ;
- визначити середню швидкість води;
- визначити значення критерію Рейнольдса;
- визначити значення гідравлічного коефіцієнта тертя, скориставшись формулою Альтшуля;

– визначити втрати тиску на тертя по всій довжині трубопроводу, скориставшись формулою Дарсі – Вейсбаха.

2. По трубопроводу рухається вода. Витрата води – 120 л/с. Діаметр труби – 200 мм.

Визначити втрати тиску на подолання таких місцевих опорів:

1. Вхід потоку з резервуара в трубу.
2. Різке розширення потоку за зміни діаметра труби з 0,2 м до 0,3 м.

Рекомендована послідовність розв’язання задачі:

- надати у графічній формі умови задачі;
- виразити діаметр труби та витрату води в одиницях системи СІ;
- визначити середню швидкість води у відповідному перерізі трубопроводу;
- користуючись конспектом лекцій або іншим джерелом інформації, вибрати емпіричну формулу та за її допомогою розрахувати значення коефіцієнтів місцевих опорів для входу потоку з резервуара в трубу та різкого розширення потоку;
- визначити втрати тиску на подолання місцевих опорів, скориставшись формулою Вейсбаха;
- виконати перевірку розмірності;
- проаналізувати отримані результати та зробити висновки.

Практичне заняття № 6

Тема: «Рух рідини у відкритих руслах».

Для повторення теоретичного матеріалу практичного заняття перегляньте розділи конспекту лекцій:

- 3.1 Рух рідини у відкритих руслах; рівняння рівномірного руху; емпіричні формули для швидкісного коефіцієнта;
- 3.2 Залежності між геометричними і гідравлічними характеристиками русел простих перетинів;

– 3.3 Розрахунок характеристик руху рідини у відкритих руслах.

Завдання для виконання.

Вода тече в лотку трапецієподібного перерізу з однаковою крутістю укосів. Глибина лотка $h = 50$ см. Ширина русла по дну $b = 1$ м; ширина русла по вільній поверхні $B = 1,5$ м. Довжина русла $L = 10$ м, перепад висот $\Delta z = 0,5$ м. Коефіцієнт шорсткості стінок лотка $n = 0,03$.

Накреслити схему перерізу лотка трапецієподібного перерізу з однаковою крутістю укосів. Вказати на кресленні вихідні дані для виконання завдання. Визначити середню швидкість V та об'ємну витрату води Q .

Рекомендована послідовність розв'язання задачі:

- визначити ухил дна русла;
- визначити величину змоченого периметра; якщо лоток трапецієподібного перерізу, це буде сума ширини русла по дну та двох укосів. Для визначення розміру укосу потрібно зробити рисунок перерізу русла, виділити на ньому прямокутний трикутник, гіпотенузою в якому буде укіс;
- визначити площу перерізу лотка, враховуючи, що це площа трапеції;
- визначити гідравлічний радіус потоку;
- визначити швидкісний коефіцієнт, використовуючи одну з відомих емпіричних формул (Павловського або Маннінга);
- застосувавши рівняння рівномірного руху води у відкритому руслі, визначити середню швидкість V . Не забути вказати розмірність;
- визначити об'ємну витрату води Q .

Практичне заняття № 7

Тема: «Дренажний колодязь. Приплив води до колодязя».

Для повторення теоретичного матеріалу практичного заняття перегляньте розділ конспекту лекцій:

- 3.4 Рух ґрунтових вод.

Завдання для виконання.

З досконалого (розташованого на водоупорі) колодязя відкачують воду. Товщина водоносного горизонту $H = 2$ м. Мінімальний рівень води у колодязі, необхідний для роботи насоса $h_0 = 0,3$ м. Радіус колодязя $r_0 = 0,5$ м. Коефіцієнт фільтрації водоносного шару $k = 10^{-2}$ см/с.

Визначити максимальну витрату води, яку можна відкачувати Q , л/с; м³/хв.

Рекомендована послідовність розв'язання задачі:

– намалювати розрахункову схему завдання, позначивши літерами та цифрами усі вихідні дані (рис. 1.5);

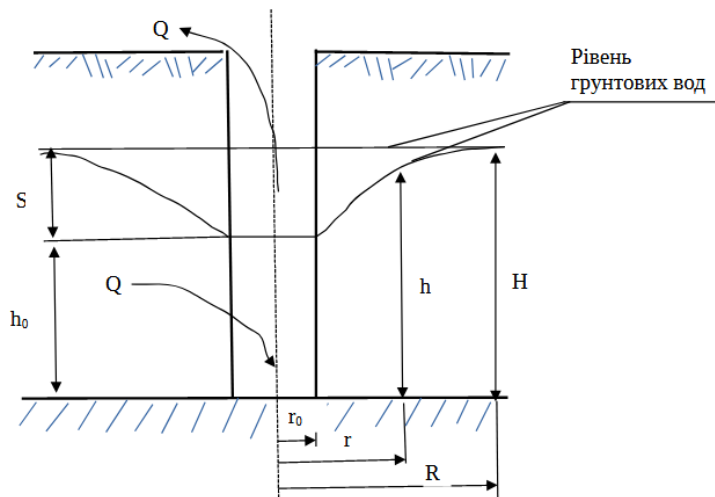


Рисунок 1.5 – Досконалий (розташований на водоупорі) колодязь

- перевести значення коефіцієнта фільтрації водоносного шару k в м/с;
- застосувавши формулу Зіхарда, визначити радіус впливу колодязя;
- застосувавши формулу визначення припливу води в колодязь, обчислити витрату води;
- отримане значення перевести до л/с; м³/хв.

Практичне заняття № 8

Тема: «Осадження твердих частинок у рідині».

Для повторення теоретичного матеріалу практичного заняття перегляньте відеозапис або презентацію лекції:

– осадження твердих частинок у рідині.

Завдання для виконання.

Частинки пилу сферичної форми потрапляють із димової труби в атмосферу.

Діаметр частинки – 10 мкм. Густина пилу – 2 000 кг/м³. Густина повітря – 1,2 кг/м³.

З якою швидкістю порошинки осідатимуть на землю?

Рекомендована послідовність розв’язання задачі:

- користуючись довідниковими даними, визначити коефіцієнт аеродинамічного опору сферичної частинки;
- записати формулу швидкості руху твердих частинок у рідині;
- перевірити одиниці вимірювання, за результатом скоригувати вихідні дані.

3 САМОСТІЙНА РОБОТА

Самостійна робота – це складова підготовки майбутнього фахівця.

Вона дозволяє здобувачу навчитися працювати з нормативною та довідковою літературою, виконувати пошук джерел науково-технічної інформації, а також набути умінь щодо обробки й аналізу отриманої інформації.

Для успішного складання іспиту з дисципліни «Прикладна механіка рідин і газів» здобувач повинен самостійно опрацювати питання за темами модулів та виконати заплановані робочою програмою практичні завдання.

Перевірку якості засвоєння теоретичного матеріалу й рівня набутих умінь студентами викладач здійснює за результатами виконання практичних завдань.

Контроль якості засвоєння матеріалу викладач проводить під час модульного та підсумкового контролю.

4 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

Метою розрахунково-графічного завдання є поглиблення теоретичних знань та надбання практичних навичок у розрахунках характеристик потоків реальних рідин у напірних трубопроводах.

Об'єктом розгляду є напірний трубопровід, через який споживачі мають отримувати воду з певною витратою.

Джерелами місцевих гідродинамічних опорів у системі є ділянки за живими перерізами потоку, де відбувається перебудова структури потоку рідини, а саме: вхід потоку з резервуара в трубу, раптове звуження або розширення потоку, поворот трубопроводу.

У завданні на розрахунково-графічну роботу наводяться основні характеристики системи:

- схема трубопроводу та його специфікація, яка визначає геометричну конфігурацію ділянок трубопроводу та розташування елементів утворення місцевих опорів;
- матеріал, з якого виготовлено трубопровід і тривалість його експлуатації;
- витрата рідини та зовнішній тиск на вільній поверхні рідини в резервуарі;
- вид (назва) рідини та її температура.

Результатом роботи мають бути визначені або розраховані:

- питома вага рідини, коефіцієнт її кінематичної в'язкості, еквівалентна шорсткість труб;
- лінійні втрати напору в трубопроводі;
- місцеві втрати напору;
- сумарні втрати напору;
- рівень води в резервуарі;
- втрати тиску в трубопроводі.

Пояснювальна записка до розрахунково-графічної роботи має включати титульний лист, зміст, вихідні дані обраного варіанта, розрахункову схему трубопроводу із зазначеними на ній вихідними даними, розрахунки лінійних втрат напору в трубопроводі, місцевих втрат напору та інших параметрів.

4.1 Теоретичні основи розрахунків

Для потоку рідини у випадку, якщо між розрахунковими перерізами 1–1 і 2–2 немає відведення або протоків рідини, умова нерозривності є умовою постійності витрати і її можна записати так:

$$V_1 \cdot \omega_1 = V_2 \cdot \omega_2,$$

де V_1 – середня швидкість потоку рідини у першому перерізі;

V_2 – середня швидкість потоку рідини у другому перерізі;

ω_1 – площа потоку рідини у першому перерізі;

ω_2 – площа потоку рідини у другому перерізі.

Це рівняння нерозривності для потоку, з якого виходить важлива особливість руху рідини – у разі зменшення площі живого перерізу середня швидкість збільшується, а у разі збільшення площі середня швидкість зменшується.

Існує два типи руху рідини: ламінарний і турбулентний.

Ламінарним рухом реальної рідини називають її впорядкований рух, за якого елементарні цівки є плавними лініями. Визначення можливості реалізації ламінарного режиму руху рідини в круглих трубах проводять за величиною числа Рейнольдса

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu},$$

де V – середня швидкість течії;

d – діаметр труби;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Критерій встановлення ламінарного режиму: $Re < 2\,320$.

Турбулентним рухом реальної рідини називають її нестационарний рух, за якого для елементарних цівок властива хаотична, нерегульована і нестационарна картина їхнього розподілу в потоці.

Критерій реалізації турбулентного режиму руху рідини в круглих трубах – $Re > 2\,320$.

Рівняння Бернуллі для реальної рідини при сталому, плавно змінному за рухом потоку реальної рідини, для двох перерізів трубки струму має такий вигляд:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot V_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot V_2^2}{2 \cdot g} + h_{1-2},$$

де V_1 і V_2 – середні швидкості течії в живих перерізах;

α – коефіцієнт кінетичної енергії (Коріоліса), що приймається при турбулентному режимі руху рівним 1,0–1,1, а при ламінарному $\alpha = 2$ (у круглій трубі);

h_{1-2} – втрати повного тиску або питомої енергії (енергія на одиницю ваги) на подолання сил гідравлічного опору руху потоку на ділянці між перерізами.

Ліва частина рівняння є сумою двох видів енергії: потенційною, такою, що складається з енергії положення z і енергії тиску a , також кінетичної енергії, віднесених до одиниці ваги рухомої рідини. Її також називають гідродинамічним або повним тиском H_t . Величину $H = z + \frac{p}{\gamma}$ називають *п'єзометричним тиском*, а величину $\frac{V^2}{2g}$ – *швидкісним тиском*.

Права частина рівняння є сумою двох видів енергії: потенційною і кінетичної, а також враховує втрати повного тиску в потоці рідини на ділянці між двома живими перерізами.

Гідравлічним опором називають втрати механічної енергії рухомої реальної (в'язкої) рідини на роботу сил тертя, яка переходить в тепло.

Втрати повного тиску в потоці рідини на ділянці між двома живими перерізами складаються із втрат за довжиною і суми місцевих втрат

$$\Delta h_{1-2} = h_L + \sum h_m,$$

де h_L – втрати тиску за довжиною потоку;

$\sum h_m$ – сума місцевих втрат тиску.

Втрати тиску за довжиною трубопроводу постійного перетину визначають за формулою Вейсбаха –Дарсі

$$h_L = \lambda \cdot \left(\frac{l}{d}\right) \cdot \left(\frac{v^2}{2g}\right),$$

де λ – гідравлічний коефіцієнт тертя (коефіцієнт Дарсі);

l – довжина ділянки трубопроводу, на якому визначаються втрати тиску;

d – діаметр трубопроводу.

Для визначення гідравлічного коефіцієнта тертя можна рекомендувати формулу А. Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_y}{d} + \frac{68}{Re}\right)^{0,25},$$

де Δ_y – еквівалентна шорсткість стінок трубопроводу.

Значення еквівалентної шорсткості для деяких труб (мм):

- нові сталеві суцільнотягнуті труби – 0,02–0,1;
- нові чавунні труби – 0,25–1;
- сталеві водопровідні труби, що знаходилися в експлуатації – 1,2–1,5.

Місцеві гідравлічні опори – це втрати механічної енергії потоку через локальні (місцеві) збудження його рівномірності або плавної зміни. Такі місцеві збудження виникають при:

- вході потоку з резервуару в трубу при гострих вхідних кромках;
- вході в трубу з сіткою;
- при різкому розширенні трубопроводу;
- при різкому звуженні трубопроводу;
- при різкому повороті трубопроводу (гостре коліно);
- при вході потоку з труби в резервуар.

Місцеві втрати тиску визначають за формулою Вейсбаха

$$h_M = \xi_M \frac{V^2}{2g},$$

де ξ_M – коефіцієнт місцевого опору;

V – середня швидкість потоку в перетині за місцем місцевого опору (окрім входу потоку в резервуар).

Величину коефіцієнта місцевого опору приймають рівною:

– при вході потоку з резервуару в трубу – $\xi_M = 0,5$;

– при вході в трубу з сіткою – $\xi_M = 6$;

– при різкому розширенні трубопроводу – $\xi_M = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 = \left[\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 - 1\right]$;

– при різкому звуженні трубопроводу – $\xi_M = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)$,

де $\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - (d_2 - d_1)^2}$;

– при різкому повороті трубопроводу (гостре коліно) – $\xi = 1 - \cos(\alpha)$,

де α – кут повороту трубопроводу;

– при вході потоку з труби в резервуар під рівень рідини (у цьому випадку середню швидкість приймають у перетині перед входом) – $\xi = 1$.

Для гідравлічного розрахунку трубопроводу встановлена:

– пропускна спроможність трубопроводу (витрата рідини);

– повний тиск у кінцевому перетині трубопроводу;

– вид перекачувальної рідини і її температура;

– матеріал трубопроводу;

– конфігурація трубопроводу (розташування, довжина і діаметр його колін).

Завданням розрахунку є визначення повного тиску в його початковому перетині, що забезпечує задану пропускну спроможність трубопроводу.

Порядок розрахунку:

– складаємо рівняння Бернуллі для умов руху води в заданому трубопроводі;

- знаходимо питому вагу рідини, відповідну заданій температурі;
- знаходимо коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, відповідний заданій температурі;
- визначаємо еквівалентну шорсткість труб (за довідником [1]);
- обчислюємо втрати тиску за довжиною кожної ділянки трубопроводу з постійним діаметром за формулою Вейсбаха – Дарсі;
- обчислюємо сумарні втрати тиску по довжині трубопроводу;
- визначаємо наявність і вид місцевих опорів;
- обчислюємо місцеві втрати тиску для кожного з місцевих опорів;
- обчислюємо сумарні місцеві втрати тиску в трубопроводі;
- обчислюємо повні втрати тиску, підсумовуючи сумарні місцеві втрати і втрати за довжиною трубопроводу;
- визначаємо повний тиск у початковому перетині трубопроводу, підставляючи в ліву частину рівняння Бернуллі величину повного тиску в кінцевому перетині і повні втрати тиску в трубопроводі.

4.2 Загальний вигляд трубопроводу

Є резервуар, заповнений водою. До резервуару приєднана труба, по якій вода витікає в навколишнє середовище.

Загальний вигляд трубопроводу показано на рисунку 4.1.

Труба має круглий перетин, її умовно можна розділити на п'ять ділянок.

Довжина кожної з ділянок позначена на схемі буквою «l» із підрядковим індексом, відповідним номеру ділянки.

Діаметр першої – третьої та п'ятої ділянок дорівнює d_1 , а четвертої – d_2 .

Перша ділянка розташована горизонтально. Друга з'єднана з першою гострим кутом і розташована під кутом до горизонту α .

Третя, четверта і п'ята ділянки розташовані горизонтально, третя приєднана до другої гострим кутом, на стику третьої та четвертої відбувається раптове розширення рідини, а четвертої і п'ятої – раптове звуження.

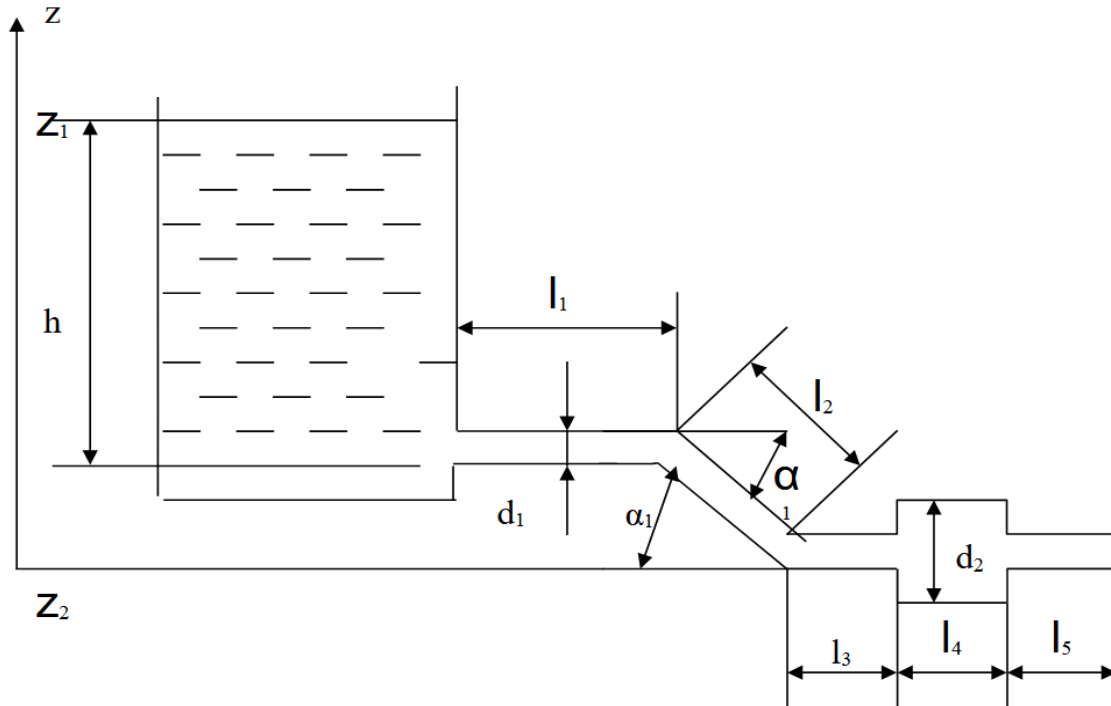


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд трубопроводу

Координата точки витікання води в навколишнє середовище позначена z_2 , координата рівня поверхні води в резервуарі – z_1 .

На поверхню води в резервуарі і на точку витікання води в навколишнє середовище впливає однаковий атмосферний тиск P_a .

Обсяг резервуара можна вважати достатньо великим, щоб не враховувати швидкість зниження рівня води в резервуарі, і приймати глибину точки підключення труби постійною – h .

4.3 Вихідні дані для виконання завдання

Вихідні дані для розрахунку трубопроводу наведено у таблиці 4.1.

Значення еквівалентної шорсткості необхідно визначити самостійно, виходячи із зазначеного в завданні матеріалу труб, користуючись довідковою літературою.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку трубопроводу

Варіант	Витрата води	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	d_1	d_2	α	P_a	t_b	Матеріал труби
	л/с	м	м	м	м	м	мм	мм	град	кПа	°С	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Зразок	120	15	2,1	12	50	18	200	300	45	98	25	сталеві зварні помірно іржаві
1	110	12	2,2	13	49	17	180	312	44	99	26	сталеві зварні, які були в експлуатації
2	115	11	2,3	14	48	16	190	315	43	97	27	сталеві старі іржаві
3	98	10	2,4	15	47	15	210	314	42	96	28	суцільнотягнені сталеві нові
4	97	9	2,5	16	46	14	220	317	41	95	29	суцільнотягнені сталеві, які були в експлуатації
5	98	8	1,8	17	45	13	230	320	40	94	30	оцинковані сталеві нові
6	95	16	1,7	18	44	12	240	321	32	99	31	оцинковані сталеві, які були в експлуатації
7	90	13	1,9	19	43	11	250	322	33	93	32	чавунні нові
8	109	14	2,4	20	42	10	260	333	34	99	33	Чавунні, які були в експлуатації
9	87	17	2,5	9	41	9	255	325	35	92	34	сталеві зварні, які були в експлуатації
10	85	9	1,8	10	40	8	233	327	36	90	35	сталеві старі іржаві
11	87	8	3	12	52	20	177	308	44	99	20	цільнотянуті сталеві нові
12	85	9	2,1	13	49	21	180	306	43	97	19	цільнотянуті сталеві, які були в експлуатації
13	108	12	2,2	14	48	17	190	305	42	96	17	оцинковані сталеві нові
14	110	11	2,3	15	47	16	210	312	41	95	26	оцинковані сталеві, які були в експлуатації
15	115	10	2,4	16	46	15	220	315	40	94	27	чавунні нові

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
16	98	9	2,5	17	45	14	230	314	32	99	28	Чавунні, які були в експлуатації
17	97	8	1,8	18	44	13	240	317	33	93	29	сталеві зварні, які були в експлуатації
18	98	16	1,9	19	43	12	250	320	34	99	30	сталеві старі іржаві
19	95	13	2,1	20	42	11	260	321	35	92	31	цільнотянуті сталеві нові
20	90	14	2,2	9	41	10	255	322	36	90	32	цільнотянуті сталеві, які були в експлуатації
21	109	17	2,3	10	40	9	233	333	44	99	33	оцинковані сталеві нові
22	87	9	2,4	13	51	8	178	325	43	97	34	оцинковані сталеві, які були в експлуатації
23	85	10	2,5	14	56	22	187	327	42	96	35	чавунні нові
24	108	11	1,8	15	57	23	211	314	41	95	26	Чавунні, які були в експлуатації
25	104	12	1,9	16	45	24	231	317	40	94	27	сталеві старі іржаві
26	98	13	2,1	17	46	25	243	320	32	99	28	цільнотянуті сталеві нові
27	97	14	2,2	18	47	26	216	321	33	93	23	цільнотянуті сталеві, які були в експлуатації
28	98	16	2,3	19	58	32	213	322	34	99	24	оцинковані сталеві нові
29	95	17	2,1	20	52	31	218	321	35	92	32	оцинковані сталеві, які були в експлуатації
30	90	9	2	9	54	21	231	322	36	90	33	чавунні нові

4.4 Послідовність виконання завдання і приклад розрахунку

Складемо рівняння Бернуллі для умов руху води в заданому трубопроводі.

Для двох перерізів труби рівняння Бернуллі має такий вигляд:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot V_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot V_2^2}{2 \cdot g} + h_{1-2}.$$

Поверхню води в резервуарі будемо вважати перерізом № 1

Переріз витікання води в навколишнє середовище – перерізом № 2.

Розглянемо це рівняння виходячи із особливостей руху води в заданому трубопроводі.

На поверхню води в резервуарі і на точку витікання води в навколишнє середовище впливає однаковий атмосферний тиск P_a , тому $P_1 = P_2 = P_a$.

Точку витікання води в навколишнє середовище, позначену z_2 , будемо приймати за початок відліку координати вертикалі, тому $z_2 = 0$.

Враховуючи, що питома вага води мало змінюється при зміні тиску, будемо вважати, що $\gamma_1 = \gamma_2$.

Обсяг резервуара можна вважати достатньо великим, щоб не враховувати швидкість зниження рівня води в резервуарі, тому $V_1 = 0$.

α – коефіцієнт кінетичної енергії (Коріоліса), приймаємо при турбулентному режимі руху $\alpha = 1,0$.

Враховуючи зазначене, рівняння Бернуллі набуває такий вигляд:

$$z_1 = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \Sigma h_i.$$

Як видно із схеми загального вигляду трубопроводу, координата поверхні води в резервуарі z_1 складається із глибини води в резервуарі над точкою її витікання і перепаду висот коліна l_2 : $z_1 = h + l_2 \sin \alpha$.

Тоді глибина води в резервуарі, яка забезпечує гідростатичний тиск, необхідний для витікання заданої витрати води визначимо за формулою:

$$h = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \Sigma h_i - l_2 \sin \alpha.$$

Розрахуємо питому вагу води γ , (Н/м³) залежно від її температури, використовуючи рівняння (поліном четвертого ступеню), яке було отримано експериментально та наведено у довідковій літературі.

$$\gamma = 9809,1 + 0,4972t - 0,07167t^2 + 3,67 \times 10^{-4}t^3 - 1,05 \times 10^{-6}t^4, \text{ Н/м}^3,$$

де t – температура води, °С.

Приклад розрахунку.

$$\gamma = 9\,809,1 + 0,4\,972 \times 25 - 0,07\,167 \times 25^2 + 3,67 \times 10^{-4} \times 25^3 - 1,05 \times 10^{-6} \times 25^4 = 9\,809,1 + 12,43 - 44,793\,75 + 5,734\,3 - 0,410\,156 \approx 9\,780, \text{ Н/м}^3.$$

Кінематичну в'язкість ($\text{м}^2/\text{с}$) води залежно від її температури можна розрахувати, використовуючи рівняння (поліном четвертого ступеню), яке було отримано експериментально та наведено у довідковій літературі.

$$\nu = (177,2 - 5,393\,1t + 0,095\,03t^2 - 8,66 \times 10^{-4} t^3 + 3,06 \times 10^{-6} t^4) \times 10^{-8}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Приклад розрахунку.

$$\nu = (177,2 - 5,393\,1 \times 25 + 0,095\,03 \times 25^2 - 8,66 \times 10^{-4} \times 25^3 + 3,06 \times 10^{-6} \times 25^4) \times 10^{-8} = (177,2 - 134,827\,5 + 59,393\,75 - 13,531\,2 + 1,195\,3) 10^{-8} \approx 89,43 \times 10^{-8}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

За таблицею 4.1 довідника [1] еквівалентна шорсткість сталевих зварних помірно іржавих труб, що були в експлуатації,

$$\Delta = 0,5 \text{ мм} = 0,5 \times 10^{-3} \text{ м}.$$

Визначимо швидкість води в характерних перерізах труби.

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_5 = \frac{Q}{\omega_1}, \text{ м/с};$$

$$V_4 = \frac{Q}{\omega_2}, \text{ м/с}.$$

Виразимо витрату води і діаметр ділянки труби в основних одиницях системи СІ.

Приклад розрахунку.

$$Q = 120 \text{ л/с} = 0,12 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$d_1 = 200 \text{ мм} = 0,2 \text{ м},$$

$$d_2 = 300 \text{ мм} = 0,3 \text{ м}.$$

Площа перерізу круглого профілю визначається за формулою

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

Приклад розрахунку.

$$\Omega_1 = \frac{3,14 \times 0,2^2}{4} = 0,0314 \text{ м}^2;$$

$$\omega_2 = \frac{3,14 \times 0,3^2}{4} = 0,07065 \text{ м}^2;$$

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_5 = \frac{0,12}{0,0314} = 3,82 \text{ м/с};$$

$$V_4 = \frac{0,12}{0,07065} = 1,7 \text{ м/с}.$$

Визначимо значення критерія Рейнольдса та перевіримо зроблено раніше припущення про турбулентний характер руху води в трубі.

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}.$$

Приклад розрахунку.

$$Re_{1-3,5} = \frac{3,82 \times 0,2}{89,43 \times 10^{-8}} = 854\,000.$$

$$Re_4 = \frac{1,7 \times 0,3}{89,43 \times 10^{-8}} = 570\,000.$$

Виходячи з того, що отримані значення критерію Рейнольдса суттєво більші, ніж 2 300, підтверджується зроблено раніше припущення про турбулентний характер руху води в трубі.

Визначення лінійних втрат напору.

Втрати напору за довжиною потоку відбуваються на п'яти ділянках трубопроводу, які є круглими трубами з постійними діаметрами.

Для визначення гідравлічного коефіцієнта тертя скористуємося формулою А. Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \times \left(\frac{\Delta y}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}.$$

Втрати тиску за довжиною трубопроводу постійного перетину визначимо за формулою Вейсбаха – Дарсі

$$h_L = \lambda \cdot \left(\frac{l}{d} \right) \cdot \left(\frac{v^2}{2g} \right).$$

Приклад розрахунку.

Гідравлічний коефіцієнт тертя на ділянках 1-3; 5.

$$\lambda_{1-3,5} = 0,11 \times \left(\frac{0,5 \times 10^3}{0,2} + \frac{68}{854\,000} \right)^{0,25} = 0,11 \times (0,002\,5 + 0,000\,796)^{0,25} = 0,026\,4.$$

Втрати тиску на ділянці трубопроводу l_1 .

$$h_{1л} = \frac{0,026\,4 \times 15 \times 3,82^2}{0,2 \times 2 \times 9,81} = 1,47 \text{ м.}$$

Втрати тиску на ділянці трубопроводу l_2 .

$$h_{2л} = \frac{0,0264 \times 2,1 \times 3,82^2}{0,2 \times 2 \times 9,81} = 0,21 \text{ м.}$$

Втрати тиску на ділянці трубопроводу l_3 .

$$h_{3л} = \frac{0,0264 \times 12 \times 3,82^2}{0,2 \times 2 \times 9,81} = 1,18 \text{ м.}$$

Втрати тиску на ділянці трубопроводу l_5 .

$$h_{5л} = \frac{0,026\,4 \times 18 \times 3,82^2}{0,2 \times 2 \times 9,81} = 1,77 \text{ м.}$$

Гідравлічний коефіцієнт тертя на ділянці 4:

$$\lambda_4 = 0,11 \times \left(\frac{0,5 \cdot 10^3}{0,3} + \frac{68}{570\,000} \right)^{0,25} = 0,11 \times (0,001\,67 + 0,000\,119)^{0,25} = 0,022\,6.$$

Втрати тиску за довжиною трубопроводу 4:

$$h_{4\text{ л}} = \frac{0,022\,6 \times 50 \times 1,7^2}{0,3 \times 2 \times 9,81} = 0,55 \text{ м.}$$

Сумарні лінійні втрати напору

$$h_{\text{л}} = h_{1\text{л}} + h_{2\text{л}} + h_{3\text{л}} + h_{4\text{л}} + h_{5\text{л}} = 1,47 + 0,21 + 1,18 + 0,55 + 1,77 = 5,17 \text{ м.}$$

Джерелами місцевих втрат напору є:

- вхід із резервуара до труби;
- гостре коліно між ділянками 1 і 2;
- гостре коліно між ділянками 2 і 3;
- раптове розширення трубопроводу між ділянками 3 і 4;
- раптове звуження трубопроводу між ділянками 4 і 5.

Розрахунок місцевої втрати напору на вході з резервуара до труби.

Місцеві втрати тиску визначають за формулою Вейсбаха

$$h_1 = \xi_1 \frac{V^2}{2g},$$

де ξ_1 – коефіцієнт місцевого опору;

V – середня швидкість потоку в перетині за місцем місцевого опору.

Величину коефіцієнта місцевого опору при вході потоку з резервуару в трубу приймають рівною: $\xi_1 = 0,5$.

Приклад розрахунку.

$$h_{1\text{м}} = \frac{0,5 \times 3,82^2}{2 \times 9,81} = 0,37 \text{ м}$$

Розрахунок місцевої втрати напору на гострому коліні між ділянками 1 і 2.

$$h_2 = \xi_2 \frac{v_2^2}{2g},$$

$$\xi_2 = 1 - \cos(\alpha),$$

де α – кут повороту трубопроводу.

Приклад розрахунку.

$$\xi_2 = 1 - \cos(45) = 0,293,$$

$$h_{2м} = \frac{0,293 \times 3,82^2}{2 \times 9,81} = 0,216 \text{ м.}$$

Розрахунок місцевої втрати напору на гострому коліні між ділянками 2 і 3 розраховується аналогічно місцевої втрати напору на гострому коліні між ділянками 1 і 2.

$$h_{3м} = 0,216 \text{ м.}$$

Розрахунок місцевої втрати напору на різкому розширенні трубопроводу між ділянками 3 і 4.

$$h_4 = \frac{\xi_4 \cdot v_2^2}{2 \cdot g},$$

$$\xi_4 = \left[\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 - 1 \right]^2.$$

Приклад розрахунку.

$$\xi_4 = \left[\left(\frac{0,3}{0,2} \right)^2 - 1 \right]^2 = 1,56;$$

$$h_{4м} = \frac{1,56 \times 1,7^2}{2 \times 9,81} = 0,23 \text{ м.}$$

Розрахунок місцевої втрати напору на різкому звуженні трубопроводу між ділянками 4 і 5.

$$h_5 = \frac{\xi_5 \cdot V_1^2}{2 \cdot g};$$

$$\xi_5 = \frac{1}{\varepsilon} - 1,$$

$$\text{де } \varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - (d_1 - d_2)^2}.$$

Приклад розрахунку.

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - (0,3 - 0,2)^2} = 0,609;$$

$$\xi_5 = \frac{1}{0,609} - 1 = 0,642;$$

$$h_{5M} = \frac{0,642 \cdot 3,82^2}{2 \cdot 9,81} = 0,477 \text{ м.}$$

Визначення сумарної втрати напору:

$$\sum h_{1-5} = \sum h_l + \sum h_m.$$

Приклад розрахунку.

$$\sum h_{1-5} = 5,17 + 0,37 + 0,216 + 0,216 + 0,23 + 0,477 = 6,68 \text{ м.}$$

Визначення рівня води в резервуарі:

$$h = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \sum h_l - l_2 \sin \alpha.$$

Приклад розрахунку.

$$h = \frac{3,82^2}{2 \cdot 9,81} + 6,68 - 2,1 \sin 45 = 7,42 - 1,48 = 5,93 \text{ м.}$$

Визначення втрати тиску в трубопроводі

$$\Delta P = \gamma \cdot \sum h_i.$$

Приклад розрахунку.

$$\Delta P = 9\,780 \times 6,68 = 65\,300 \text{ Па.}$$

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Константинов Ю. М. Інженерна гідравліка [Електрон. ресурс] : підручник / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – Київ : Слово, 2006. – 432 с. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <http://koha.kname.edu.ua/cgi-bin/koha/opac-ISBDdetail.pl?biblionumber=4946>, вільний (дата звернення: 10.05.2025). – Назва з екрана.

2. Шушляков Д. О. Технічна механіка рідин і газів [Електрон. ресурс] : навч. посіб. для студ. 2 курсу будів. спец. / Д. О. Шушляков. – Електрон. текст. дані. — Харків : ХНАМГ, 2006 . – 78 с. – Режим доступу: <http://koha.kname.edu.ua/cgi-bin/koha/opac-ISBDdetail.pl?biblionumber=8982>, вільний (дата звернення: 10.05.2025). – Назва з екрана.

3. Коваленко Ю. Л. Конспект лекцій з дисципліни «Прикладна механіка рідин і газів» для студентів 2 курсу денної та 3 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.040106 – Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування (професійне спрямування «Екологія та охорона навколишнього середовища», «Екологічна безпека») [Електрон. ресурс]. / Ю. Л. Коваленко, Т. В. Дмитренко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 53 с. – Режим доступу: https://eprints.kname.edu.ua/45170/1/2017_печ.71Л_ПМЖГ_ред.2.pdf, вільний (дата звернення: 05.06.2025). – Назва з екрана.

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
до проведення практичних занять, організації самостійної роботи
та виконання розрахунково-графічної роботи
з навчальної дисципліни

«ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
денної та заочної форм навчання зі спеціальності
183 – Технології захисту навколишнього середовища)*

Укладач **КОВАЛЕНКО** Юрій Леонідович

Відповідальний за випуск *Т. В. Дмитренко*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *Ю. Л. Коваленко*

План 2024, поз. 77М

Підп. до друку 10.06.2025. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 1,9.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.