

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

ЧЕРКАСЬКИЙ ІНСТИТУТ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ІМЕНІ ГЕРОЇВ ЧОРНОБИЛЯ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Кафедра автоматичних систем безпеки та електроустановок

МИГАЛЕНКО К.І., КОЛЕСНІКОВ Д.В., ЗАЇКА Н.П.



ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

**з курсу
«Технічна механіка рідини та газу»**

Черкаси – 2024

Мигаленко К.І., Колесніков Д.В., Заїка Н.П.: Лабораторний практикум з курсу «Технічна механіка рідини та газу» – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024 р. - 62 с.

Лабораторний практикум з курсу «Технічна механіка рідини та газу» розроблений у відповідності з робочою програмою дисципліни. Призначений для здобувачів вищої освіти ступеня «бакалавр» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» та 263 «Цивільна безпека» (ОПП «Цивільний захист» та «Охорона праці»). Він складається з шести лабораторних робіт.

У кожній лабораторній роботі приведено короткий теоретичний матеріал; схеми лабораторних установок та їх опис; викладено послідовність проведення роботи; методичні вказівки з обробки результатів та контрольні питання.

Завдяки проведенню лабораторних робіт курсанти та студенти отримують необхідні теоретичні знання та практичні навички для подальшого їх використання в професійній практичній діяльності.

ЗМІСТ

Сторінка

Правила і порядок виконання лабораторних робіт

Вимоги безпеки праці при виконанні лабораторних робіт

Лабораторна робота № 1

Способи вимірювання тиску та витрати рідини

Лабораторна робота № 2

Ілюстрація рівняння Бернуллі

Лабораторна робота № 3

Дослідження режимів руху рідини

Лабораторна робота № 4

Визначення втрат напору в трубах та пожежних рукавах

Лабораторна робота № 5

Визначення залежності дальності вильоту струменя від діаметра насадка і напору

Лабораторна робота № 6

Дослідження витікання рідини при змінному напорі в атмосфері

Додатки

Список літератури

Правила і порядок виконання лабораторних робіт

Виконання кожної лабораторної роботи передбачає самостійну підготовку, роботу в лабораторії та захист виконаної роботи. Кожна робота виконується групою курсантів (студентів) з 3-4 осіб.

При підготовці до лабораторної роботи курсанти (студенти) повинні самостійно опанувати теоретичні основи роботи, сутність методів вимірювання, призначення експериментального обладнання.

У лабораторії кожний курсант (студент) у складі групи має ознайомитися з лабораторним обладнанням, порядком проведення досліду і доповісти викладачу про готовність. З дозволу викладача і під його наглядом група проводить лабораторну роботу. Після цього кожний курсант в складі групи повинен самостійно провести обробку результатів, проаналізувати отримані результати і зробити висновок. Висновки мають містити результати досліджень, порівняння результатів лабораторної роботи з довідниковими даними, аналіз причин можливих розбіжностей.

Захист роботи проводиться в лабораторії кожним курсантом індивідуально після її оформлення. На захисті курсант має довести викладачу висновки роботи і відповісти на контрольні запитання.

Вказівки з роботи в лабораторії

Перед початком роботи необхідно:

1. Ретельно вивчити дану інструкцію.
2. Повторити навчальний матеріал з теми, що розглядається.
3. Підготувати форму звіту.

У процесі виконання роботи необхідно:

1. Суворо дотримуватися правил техніки безпеки праці.
2. Ознайомитися з конструктивними елементами лабораторної установки.
3. З приладами і обладнанням поводитися дбайливо та акуратно.
4. Дотримуватися методики та послідовності виконання роботи.
5. Підтримувати на робочому місці порядок.
6. Включати установку тільки з дозволу викладача.
7. Обертати маховички запірних вентилів поступово, без зайвих зусиль.
8. Економно витрачати воду під час проведення досліду.

Після закінчення роботи:

1. Прибрати робоче місце.
2. Скласти звіт щодо виконаної роботи.
3. Представити звіт про виконану роботу викладачеві.

Вимоги безпеки праці при виконанні лабораторних робіт

1. При роботі в лабораторії необхідно суворо дотримуватися правил безпеки праці та порядку проведення лабораторних робіт.
2. Ввімкнення лабораторних установок у роботу дозволяється тільки з дозволу викладача та в його присутності.
3. У лабораторії **забороняється**:
 - 3.1. Залишати без нагляду ввімкнене обладнання і установки.
 - 3.2. Доторкатися руками до електричних дротів і обладнання.
 - 3.3. Направляти струмінь води з пожежного ствола та іншого обладнання на елементи електромереж.
 - 3.4. Різко відкривати та закривати водорозбірну арматуру.
 - 3.5. Підвищувати тиск у водопровідній мережі вище за норми, що встановлені інструкцією.
 - 3.6. Палити, використовувати відкритий вогонь.
4. При виявленні будь-якого пошкодження курсант (студент) повинен відключити лабораторну установку і повідомити викладача.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

«Способи вимірювання тиску та витрати рідини»

Мета роботи: ознайомитись із приладами та способами вимірювання тиску і витрат рідини та навчитись визначати витрати рідини об'ємним способом за допомогою ствола-водоміра, трубки Піто та вставки Вентурі.

1. Теоретична частина

1.1. Тиск рідини

Важливою характеристикою рідини в стані спокою є гідростатичний тиск.

Види тиску:

- *атмосферний* (барометричний), вимірюється барометром в мм рт. ст.;

- *абсолютний* (повний), визначається як сума атмосферного і надлишкового тиску;

- *надлишковий* (манометричний), визначається манометром, п'єзометром у Па, м вод. ст., атм, кгс/см², бар;

- *вакууметричний*, визначається мановакууметром або вакууметром в Па, м вод. ст., атм, кгс/см², бар.

Співвідношення одиниць вимірювання тиску:

760 мм рт. ст. = 101325 Па = 0,1 МПа \approx 10 м вод. ст. \approx 1 атм. \approx 1 кгс/см² \approx 1 бар

Надлишковий тиск визначається за формулою:

$$P = \rho g H, \text{ Па}$$

де ρ – густина, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

H – висота стовпчика води над точкою вимірювання тиску, м.

За допомогою цієї формули можна також від *Па* переходити до інших одиниць вимірювання тиску, а саме: *мм рт. ст.* и *м вод. ст.*

Абсолютний тиск визначається за основним рівнянням гідростатики:

$$P_{\text{абс}} = P_a + \rho g H, \text{ Па}$$

де P_a – атмосферний тиск, Па;

H – показник п'єзометра, м вод. ст.

Атмосферний тиск залежить від висоти місця над рівнем моря і станом погоди. Нормальним є атмосферний тиск, який створений стовпчиком ртуті, висотою 760 мм, що відповідає 10 м вод. ст., або 0,1 мПа.

$$P_{\text{вакуум}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{абс}};$$

$$P_{\text{повне}} = P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + \rho g H;$$

$$P_{\text{маном}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{атм}} = \rho g H.$$

Закон Паскаля.

На основі основного рівняння гідростатики сформульований закон Паскаля: *зовнішній тиск, що прикладений до вільної поверхні рідини, передається в будь-яку точку рідини без змін.*

На основі закону Паскаля розроблені прості гідравлічні машини (преси, домкрати, підйомники).

1.2. Витрати рідини

Витрати рідини визначають за рівнянням нерозривності потоку:

$$Q = \omega v, \quad \text{м}^3/\text{с}$$

де $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$, площа поперечного перерізу водопроводу, м²;

v – швидкість руху води, м/с.

Об'ємний спосіб.

Величина витрати Q визначається за формулою:

$$Q = \frac{W}{\tau},$$

де Q - витрата води, л/с;

W - об'єм води у мірній ємкості, л;

τ - час заповнення ємкості, с.

Для одержання більшої точності у визначенні витрат води необхідно використовувати мірні ємкості.

За допомогою ствола-водоміра.

Для визначення витрат використовують провідність насадка ствола:

$$Q = p\sqrt{H} \quad \text{або} \quad Q = \sqrt{\frac{H}{S_H}},$$

де Q - витрата води, л/с;

p - провідність насадка (наведено у додатку 1);

S_H - опір насадка;

H - напір перед насадком, м.

Q - витрата води, л/с.

Витрату води з насадка визначаємо за показником манометра H , що встановлений на стволі-водомірі за формулою:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \text{ м}^3/\text{с}$$

де $\mu = \varepsilon \varphi$ - коефіцієнт витрати;

ε – степінь стиснення потоку;

φ – швидкісний коефіцієнт.

Значення коефіцієнтів для різних отворів і насадок, віднесених до вихідного перетину, наведено в додатку 2.

Витрата води при витіканні з пожежних стволів визначається різними способами на основі рівняння нерозривності потоку та рівняння Бернуллі:

$$Q = \omega v, \quad Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = H.$$

За допомогою трубки Піто

Витрати води визначаються за формулою:

$$Q = \omega \sqrt{2gH},$$

де Q - витрата води, л/с;

ω - площа поперечного перерізу отвору насадка ($\omega = 0.785 d^2$), м²;

H - напір перед насадком, м.

2. Хід лабораторної роботи

2.1. Визначення тиску

Визначення надлишкового тиску проводимо за допомогою манометра та п'єзометра.

Для визначення тиску п'єзометром на лабораторній установці (рис. 2.1.) знімаємо показники рівнів води у п'єзометрах і заносимо до табл. 2.1.

Переведення отриманого значення тиску в інші одиниці вимірювання проводиться за допомогою співвідношення розмірностей:

$$760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа} \approx 10 \text{ м вод. ст.} \approx 1 \text{ атм} \approx 1 \text{ кгс/см}^2 \approx 1 \text{ бар}$$

Надлишковий тиск визначаємо за формулою:

$$P_{\text{надл}} = \rho g H, \text{ Па}$$

Абсолютний тиск визначається за рівнянням гідростатики:

$$P_{\text{абс}} = P_a + \rho g H, \text{ Па}$$

Таблиця 2.1. Результати спостережень

P_a , Па	h , м вод. ст.	ρgh , Па	$P_{абс}$, Па

Для визначення тиску за манометром відкриваємо вентиль ПК і знімаємо показники і заносимо їх у табл. 2.2. При цьому необхідно враховувати ціну поділки на шкалі манометра.

Таблиця 2.2. Результати спостережень

P , кгс/см ²	P , атм	P , бар	P , Па	P , м вод. ст	P , мм рт. ст.

2.2. Вимірювання витрат рідини

Об'ємний спосіб.

Об'ємним способом витрата визначається за допомогою мірної ємності і секундоміра.

При витіканні рідини з отвору, насадка чи трубопровода, мірна ємкість підноситься під струмінь і заповнюється. Час заповнення визначається за допомогою секундоміра, а об'єм – мірним посудом.

Схема лабораторної установки

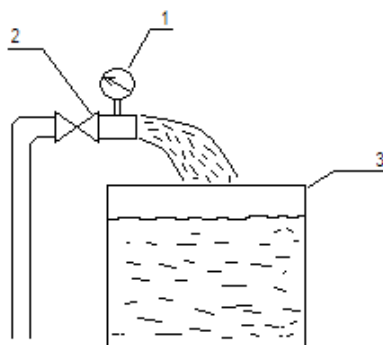


Рисунок 2.1. Схема установки з мірною ємністю
1- манометр, 2 - засувка на трубопроводі, 3 - мірна ємність.

Витрата визначається за формулою:

$$Q = \frac{W}{\tau}$$

Дані експерименту і розрахунку заносяться до табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Результати спостережень

$W,$ л	$\tau,$ с	$Q,$ л/с

За допомогою ствола-водоміра.

Схема лабораторної установки

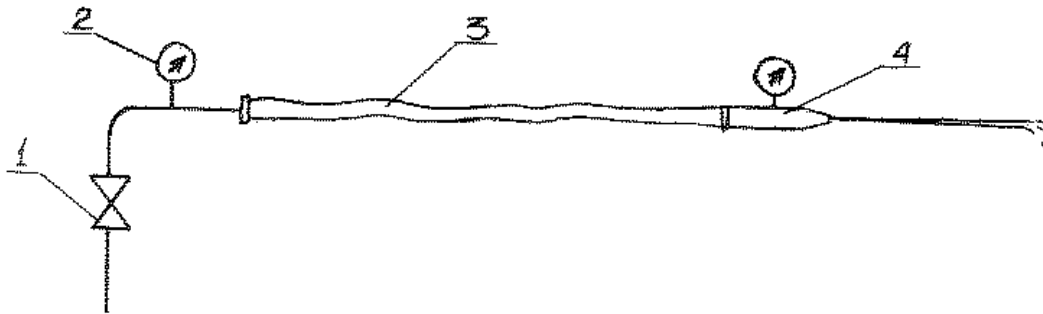


Рисунок 2.2. Схема рукавної лінії зі стволом-водоміром

1 - витратний вентиль, 2 - манометр, 3- пожежний рукав, 4 - ствол-водомір.

Визначення витрати за допомогою ствола водоміра проводиться шляхом зняття показників манометра, встановленого на стволі. Показник манометра вкаже нам величину тиску в стволі. Від тиску переходять до напору за допомогою формули:

$$i = \frac{D}{\rho g} \dot{i}$$

Знаючи напір перед насадком, а також опір або провідність насадка, обраховується витрата за формулами:

$$Q = p\sqrt{H} \quad \text{або} \quad Q = \sqrt{\frac{H}{S_H}}$$

Дані спостережень і розрахунку заносяться до табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Результати спостережень

$P,$ кгс/см ²	$H,$ м вод. ст.	$d_{нас},$ мм	$p,$ провідн. нас.	$S_H,$ опір нас.	$Q,$ л/с

За допомогою трубки Піто.

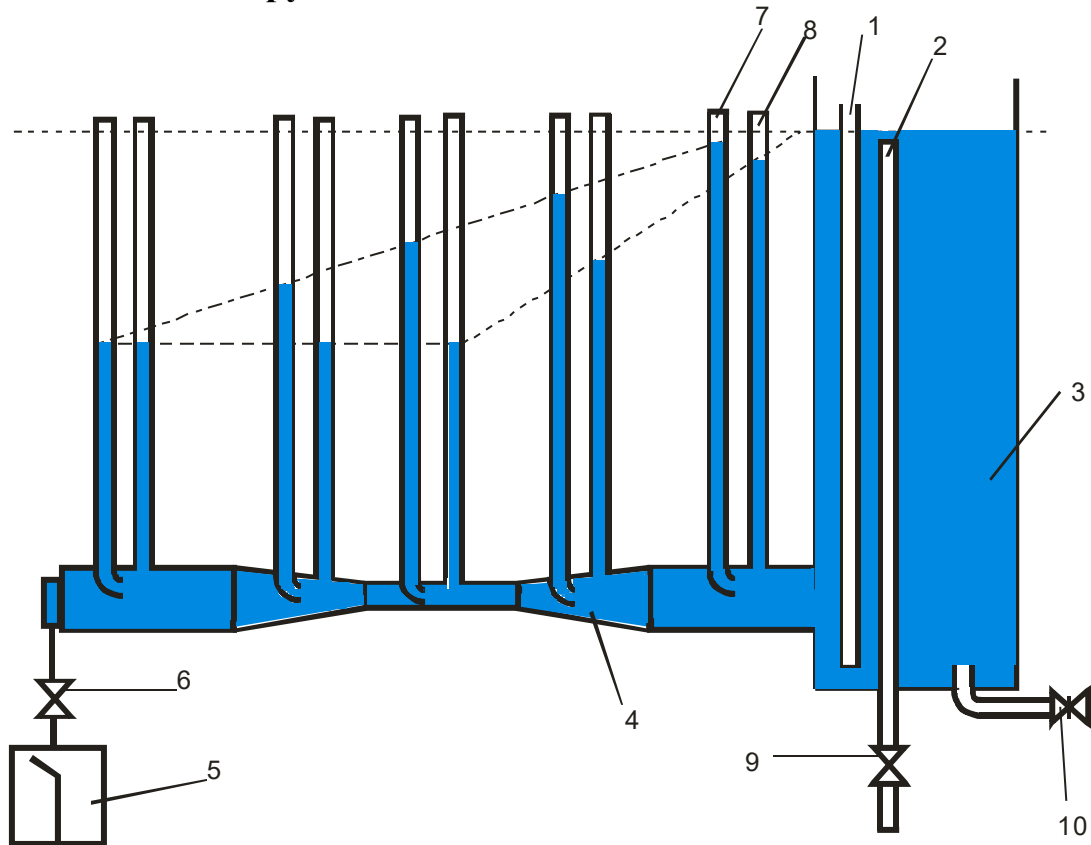


Рисунок 2.3. Лабораторна установка для перевірки рівняння Бернуллі.

Установка складається з баку (3) з показником рівня води (1) та переливною трубою (2), вставки Вентурі (4), вентиля переливної труби (9), вентиля живлення баку водою (10), системи труб для підводу та відводу води, мірної ємності (5). Для регулювання режиму роботи установки служить вентиль (6). В п'яти перерізах вставки Вентурі встановлено п'єзометри (7) та трубки Піто (8).

Витрата за допомогою трубки Піто визначається таким чином:

- на лабораторній установці встановлюється усталений режим руху рідини;
- в будь-якому перерізі знімається показник рівня рідини в трубці Піто і п'єзометрі, різниця цих рівнів і буде дорівнювати швидкісному напору

$$H = \frac{\alpha v^2}{2g};$$

- витрата обраховується за формулою:

$$Q = \omega \sqrt{2gH}$$

де ω - площа поперечного перерізу вставки Вентурі в місці встановлення п'єзометра і трубки Піто на вставці Вентурі;

H – швидкісний напір.

Дані спостережень і розрахунку заносяться до табл. 2.5.

Таблиця 2.5. Результати спостережень

d , мм	ω , м ²	$H_{\text{Піто}}$, м вод. ст.	$H_{\text{п'єзометра}}$, м вод. ст.	H , м вод. ст.	Q , м ³ /с

ЗВІТ З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 1

«Способи вимірювання тиску та витрати рідини»

Мета роботи: ознайомитись з приладами та способами вимірювання тиску і витрат рідини та навчитись визначати витрати рідини об'ємним способом за допомогою ствола-водоміра, трубки Піто та вставки Вентурі.

Хід лабораторної роботи

1. Визначення тиску

Визначення надлишкового тиску за допомогою манометра. Переведення отриманого значення тиску в інші одиниці вимірювання проводимо за допомогою формули $P = \rho gh$, і співвідношення розмірностей:

760 мм рт. ст. = 101325 Па = 0,1 МПа \approx 10 м вод. ст. \approx 1 атм \approx 1 кгс/см² \approx 1 бар

Дані спостережень і розрахунку заносяться до табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Обробка результатів роботи

P , кгс/см ²	P , атм	P , бар	P , Па	P , м вод. ст	P , мм рт. ст.

Визначення абсолютного тиску

Абсолютний тиск визначається за допомогою основного рівняння гідростатики:

$$P_{абс} = P_a + \rho gH$$

де P_a – атмосферний тиск, Па;

H – показник п'єзометра, м вод. ст.

Дані спостережень і розрахунку заносяться до табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Обробка результатів роботи

P_a , Па	H , м вод. ст.	ρgH , Па	$P_{абс}$, Па

2. Визначення витрати рідини

Витрата води може бути визначена одним із наведених нижче способів.

Об'ємний спосіб

Витрата об'ємним способом визначається за допомогою мірної ємкості і секундоміра.

При витіканні рідини з отвора, насадка чи трубопровода, мірна ємкість підноситься під струмінь і заповнюється. Час заповнення визначається за допомогою секундоміра, а об'єм мірною ємністю.

Схема лабораторної установки

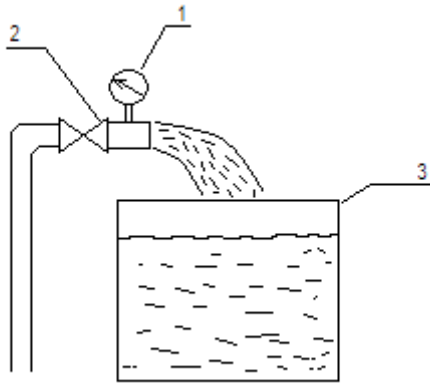


Рисунок 3.1. Схема установки з мірною ємністю

1 - манометр, 2 - засувка на трубопроводі, 3 - мірна ємність.

Витрата визначається за формулою:

$$Q = \frac{W}{\tau}$$

де Q - витрата води, л/с;
 W - об'єм води у мірній ємності, л;
 τ - час заповнення ємності, с.

Дані спостережень і розрахунку заносяться до табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Обробка результатів роботи

W , л	τ , с	Q , л/с

За допомогою ствола-водоміра

Схема лабораторної установки

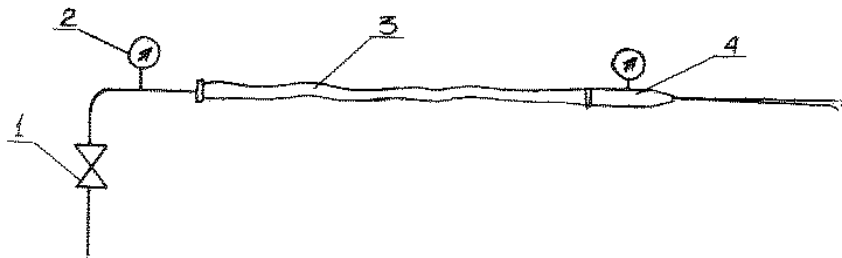


Рисунок 3.2. Схема рукавної лінії зі стволем-водоміром

1 - витратний вентиль, 2 - манометр, 3- пожежний рукав, 4 - ствол-водомір.

Визначення витрати за допомогою ствола водоміра проводиться шляхом зняття показників манометра, встановленого на стволі. Показники манометра вкажуть нам величину тиску в стволі. Від тиску переходять до напору за допомогою формули:

$$H = \frac{P}{\rho g} \quad \text{М}$$

Знаючи напір перед насадком, а також опір або провідність насадка, обраховується витрата за формулами:

$$Q = p\sqrt{H} ; \text{ або } Q = \sqrt{\frac{H}{S_H}}$$

- де Q - витрата води, л/с;
 p - провідність насадка;
 S_H - опір насадка;
 H - напір перед насадком, м;
 Q - витрата води, л/с.

Дані спостережень і розрахунку заносяться до табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Обробка результатів роботи

P , кгс/см ²	H , м вод. ст.	$d_{нас}$, мм	p , провідн. нас.	S_H , опір нас.	Q , л/с

За допомогою трубки Піто

Схема установки

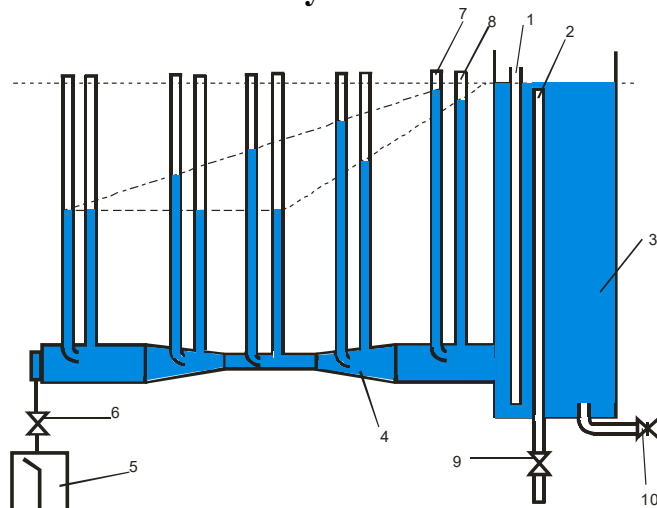


Рисунок 3.3. Лабораторна установка для перевірки рівняння Бернуллі.

Установка складається з бака (3) з показником рівня води (1) та переливною трубою (2), вставки Вентурі (4), вентиля переливної труби (9), вентиля живлення бака водою (10), системи труб для підводу та відводу води, мірної ємності (5). Для регулювання режиму роботи установки слугує вентиль (6). В п'яти перерізах вставки Вентурі встановлено п'єзометри (7) та трубки Піто (8).

Витрата за допомогою трубки Піто визначається таким чином:

- на лабораторній установці встановлюється постійний режим руху рідини по вставці Вентурі
- знімається показник рівня рідини в трубці Піто і п'єзометрі, різниця цих рівнів і буде дорівнювати швидкісному напору H , який підставляється в наступну формулу
- витрата обраховується за формулою:

$$Q = \omega \sqrt{2gH}$$

де ω - площа поперечного перерізу в місці встановлення п'єзометра і трубки Піто на вставці Вентурі;

H – значення швидкісного напору ($H = \frac{\alpha v^2}{2g}$).

Дані спостережень і розрахунку заносяться до табл. 3.5.

Таблиця 3.5. Обробка результатів роботи

d , мм	ω , м ²	$\frac{\alpha v^2}{2g}$, м вод. ст.	$\frac{P}{\rho g}$, м вод. ст.	H , м вод. ст.	Q , м ³ /с

Контрольні питання:

1. Що вивчає гідростатика?
2. Гідростатичний тиск та його властивості.
3. Основне рівняння гідростатики.
4. Види тиску.
5. Прилади для вимірювання тиску.
6. Одиниці вимірювання тиску і їх співвідношення.
7. Закон Паскаля.
8. Дати визначення витрати.
9. Способи визначення витрати.
10. Формули, одиниці вимірювання витрати.

Висновки: _____

Виконав _____

Перевірив _____

Оцінка _____

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

«Ілюстрація рівняння Бернуллі»

Мета роботи: дослідна перевірка закону збереження енергії для потоку реальної рідини у трубі з перемінним поперечним перерізом.

1. Теоретична частина

Рівняння Бернуллі для ідеальної рідини виведено на основі трьох рівнянь статки Ейлера.

Сума геометричного, п'єзометричного та швидкісного напорів називається повним або гідродинамічним напором.

$$Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H = \text{const}$$

- де: Z – геометричне положення точки відносно площини зрівняння, м;
 P – гідростатичний тиск, Па;
 ρ – густина рідини, кг/м³;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 v – середня швидкість руху рідини, м/с;
 H – повний гідродинамічний напір, який складається із:
 Z – геометричного напору;
 $\frac{P}{\rho g}$ – п'єзометричного напору, м;
 $\frac{v^2}{2g}$ – швидкісного напору, м.

Для усталеного потоку реальної рідини, яка повільно змінюється, для двох довільно вибраних поперечних перерізів рівняння Бернуллі має вигляд:

$$Z + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{1-2}$$

- де: Z – геометричне положення точки відносно площини зрівняння, м;
 $\frac{P}{\rho g}$ – п'єзометричний напір, м;
 $\frac{\alpha v^2}{2g}$ – швидкісний напір, м;
 α – коефіцієнт кінетичної енергії (коефіцієнт Кориоліса), який залежить від ступеня нерівномірності розподілу швидкостей в поперечному перерізі потоку

- ($\alpha = 1.05 \dots 1.1$ – для турбулентного режиму руху рідини;
 $\alpha = 2$ – для ламінарного режиму руху рідини);
- h_{1-2} – втрати напору на подолання гідравлічного опору в трубопроводі, м;
- ρ – густина рідини, кг/м³;
- g – прискорення вільного падіння; $g=9.81$ м/с²;
- v – середня швидкість руху рідини, що визначається за

$$\text{формулою: } v = \frac{Q}{\omega},$$

де Q - витрата рідини, м³/с;

ω - площа поперечного перерізу, м².

Рівняння Бернуллі виражає закон збереження енергії для потоку рідини, яка рухається.

Потік рідини має запас потенційної та кінетичної енергії.

Потенційна енергія, $E_{\text{п}}$ складається із геометричного і п'єзометричного напорів та визначається за формулою:

$$E_{\text{п}} = Z + \frac{P}{\rho g},$$

де Z – геометричний напір, м;

$\frac{P}{\rho g}$ - п'єзометричний напір (P – гідростатичний тиск, Па; ρ - густина рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²).

Кінетична енергія потоку є швидкісним напором і визначається за формулою:

$$E_{\text{к}} = \frac{v^2}{2g}$$

де v - середня швидкість руху рідини, м/с.

Питома енергія потоку – це є сума потенціальної та кінетичної енергій.

$$E_{\text{пит.}} = E_{\text{п}} + E_{\text{к}}$$

Рівняння Бернуллі широко застосовується у різних розділах гідравліки для рішення багатьох практичних задач. Робота деяких приладів та механізмів, які застосовуються в підрозділах МНС, також заснована на використанні законів гідравліки. До них відносяться: трубка Піто, водомір Вентурі, ствол-водомір, водоструменевий насос та інші струменеві апарати.

2.Хід лабораторної роботи

Опис лабораторної установки

Лабораторна робота з дослідження рівняння Бернуллі проводиться в дослідній лабораторії на установці, схема якої зображена на рис. 2.1.

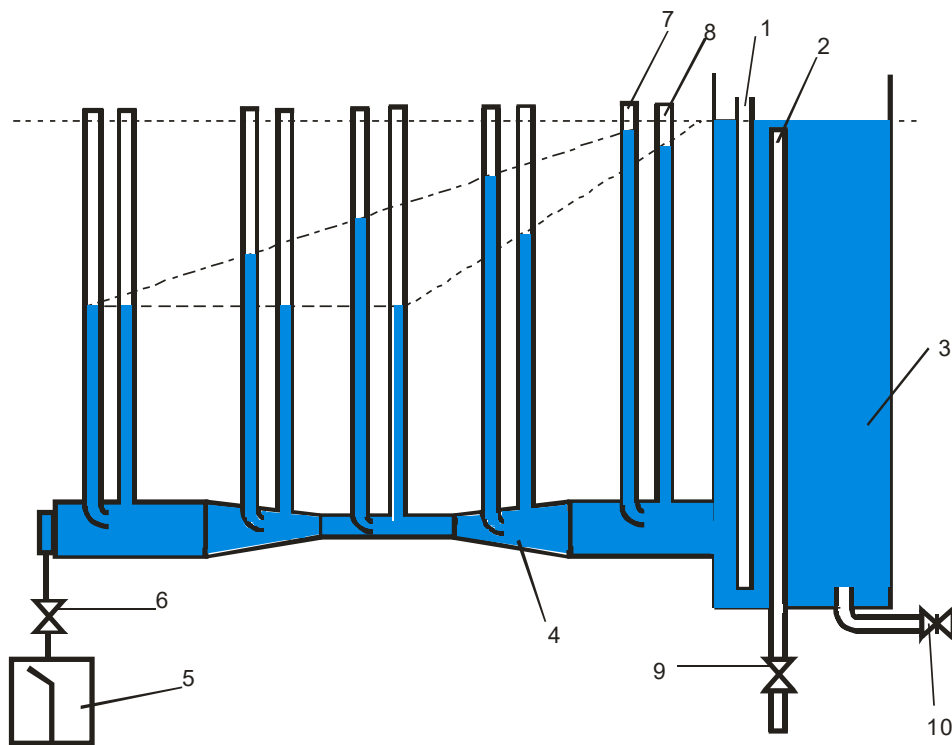


Рисунок 2.1. Лабораторна установка для дослідження закону збереження енергії

Установка складається з баку (3) з показником рівня води (1), контрольно-переливної труби (2), трубки Вентурі (4), вентилів переливної труби (9), вентилів живлення бака водою (10), системи труб для підводу та відведення води, мірної ємкості (5). Для регулювання режиму роботи установки використовується регулювальний вентиль (6). У п'яти поперечних перерізах трубки Вентурі встановлені п'єзометри (8) та швидкісні трубки Піто (7).

Послідовність проведення роботи

1. Відкрити вентиль (9) переливної труби.
2. Відкрити вентиль живлення бака водою (10) та заповнити бак (3) водою.
3. Записати в табл. 2.1 величину рівня води (H) напірного бака (3) за показниками трубки (2).
4. Регулювальним вентилем (6) встановити режим дослідження. При встановленні режиму необхідно контролювати граничний рівень заповнення баку та постійну величину напору при проведенні дослідження.
5. Встановити робочий режим дослідження протягом 2...4 хвилин до повної стабілізації потоку води.

6. Виміряти п'єзометричний напір $\frac{P}{\rho g} = \frac{P}{\gamma}$ за показниками п'єзометри та гідродинамічний напір $Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} = H$ за показниками трубок Піто для всіх перерізів. Отримані значення записати в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Результати спостережень

№	H	W	τ	Показники в перерізах																		
				H ₁	\underline{P}_1 γ	d ₁	<i>l</i> _{I-II}	H ₂	\underline{P}_2 γ	d ₂	<i>l</i> _{II-III}	H ₃	\underline{P}_3 γ	d ₃	<i>L</i> _{III-IV}	H ₄	\underline{P}_4 γ	d ₄	<i>l</i> _{IV-V}	H ₅	\underline{P}_5 γ	d ₅

7. Повернути регулюючий вентиль (6) мірної ємності (5) до упору в зворотну сторону з одночасним включенням секундоміру.

8. Заповнити мірну ємність водою та визначити час її заповнення за секундоміром.

9. Змінити режим роботи установки за допомогою регулювального вентиля (6) та повторити пункти 6, 7 та 8.

10. Всі результати спостережень записати в табл. 2.1.

ЗВІТ З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 2

«Ілюстрація рівняння Бернуллі»

Мета роботи: дослідна перевірка закону збереження енергії для потоку реальної рідини у трубі з перемінним поперечним перерізом.

Таблиця 3.1. Результати спостережень

№	H	W	τ	Показники в перерізах																		
				H ₁	$\frac{P_1}{\gamma}$	d ₁	l _{I-II}	H ₂	$\frac{P_2}{\gamma}$	d ₂	l _{II-III}	H ₃	$\frac{P_3}{\gamma}$	d ₃	l _{III-IV}	H ₄	$\frac{P_4}{\gamma}$	d ₄	l _{IV-V}	H ₅	$\frac{P_5}{\gamma}$	d ₅
1																						
2																						
3																						

Обробка результатів лабораторної роботи

1. Визначаємо величину швидкісного напору, як різницю гідродинамічного та потенціального напорів:

$$\frac{\alpha v^2}{2g} = \left(Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} \right) - \left(Z + \frac{P}{\rho g} \right)$$

2. Визначити площі поперечних перерізів трубопроводу за формулою:

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

де d - внутрішній діаметр вставки Вентурі, м.

3. Визначити Q_{сер} води за формулою:

$$Q = \frac{W}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

де W – об'єм мірної ємності, м³;

τ – час заповнення мірної ємності, с.

4. Визначити швидкість потоку в кожному перерізі та середню швидкість потоку за формулами:

$$v = \frac{Q}{\omega}, \text{ м/с}, \quad v_{\text{сер}} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5}{5}$$

де $v_{1,2,3,4,5}$ – середня швидкість руху води у перемінних поперечних перерізах, м/с;

Q – витрата води, м³/с;

ω - площа поперечного перерізу, м².

9. Визначити швидкісний напір $\frac{\alpha v^2}{2g}$ в кожному перерізі. Для розрахунків коефіцієнт α приймається рівним $\alpha = 1$.

Результати розрахунків заносимо в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Обробка результатів роботи

№ перерізу	Q	ω	$v_{\text{сер}}$	$\frac{\alpha v^2}{2g}$	h_e	i

Графік зміни напорів



10. За даними табл. 3.1., 3.2. побудувати графік зміни п'єзометричного $\frac{P}{\rho g}$ та швидкісного $\frac{\alpha v^2}{2g}$ напорів.

8. У висновку роботи дати пояснення залежності зміни напорів у трубопроводі з перемінним перерізом.

Контрольні питання:

1. Гідростатичний та гідродинамічний напори.
2. Гідравлічні характеристики потоку рідини.
3. Рівняння нерозривності потоку рідини.
4. Рівняння Бернуллі та його енергетичний зміст.
5. Назвати прилади, пожежно-технічне обладнання та елементи пожежної техніки, робота яких заснована на застосуванні рівняння Бернуллі.

Висновки: _____

Виконав _____

Перевірив _____

Оцінка _____

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

«Дослідження режимів руху рідини»

Мета роботи: створення та дослідження різних режимів руху рідини на лабораторній установці та підтвердження досліджуваних режимів критичним числом Рейнольдса.

1. Теоретична частина

Прийнято розрізняти два різних за характером режими руху рідини. Режими руху дослідив у 1883 р. англійський фізик О. Рейнольдс. За станом струменя підфарбованої рідини, яка вводилася в основний потік у прозорій трубці, він порівнював режими руху рідини при змінних величинах швидкості.

Ламінарний рух рідини - коли струмені рухаються паралельними шарами без перемішування.

Турбулентний рух рідини - коли виникає безладне перемішування різних шарів рідини, яка рухається.

На основі обробки дослідних даних встановлено, що більш повно режим руху рідини характеризується числом значенням безрозмірної величини, яка називається числом Рейнольдса та визначається за формулою:

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

де v - швидкість потоку, м/с;

d - діаметр трубопроводу, м;

ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с, який залежить від температури води.

Кожному режиму руху рідини відповідають чисельні величини критерія Рейнольдса. Для круглого трубопроводу $Re_{кр} = 2320$.

Якщо $Re < Re_{кр} = 2320$ - ламінарний режим,

$Re > Re_{кр} = 2320$ - турбулентний режим.

2. Хід лабораторної роботи

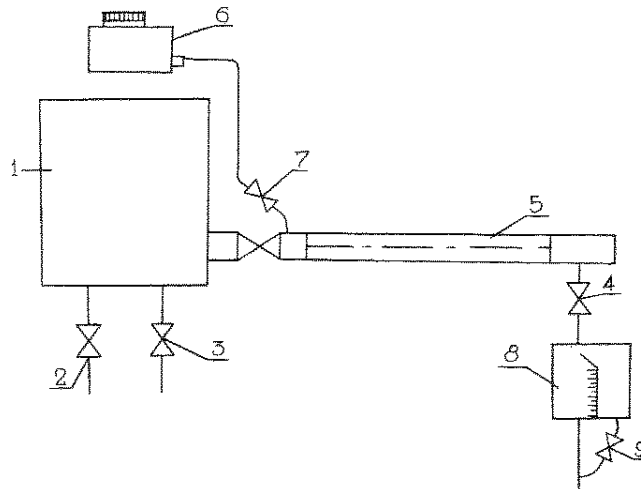


Рисунок 3.1. Лабораторна установка для дослідження режимів руху рідин
1 – бак; 2 – вентиль для заповнення бака водою; 3 – вентиль труби рівня переливу;
4 – вентиль регулювання витрат; 5 – прозора труба; 6 – ємність з підфарбованою водою;
7 – зажими для регулювання подачі підфарбованої води; 8 – мірний бак; 9 – вентиль зливу
води з мірного баку.

Для дослідження режимів руху рідини використовується прозорий трубопровід (5), що приєднаний до водонапірного баку (1). Вентилем (4) регулюється подача води з трубопроводу, а зажимом (7) вводиться струмінь підфарбованої води. За рухом струменя підфарбованої рідини в потоці проводимо візуальні спостереження і заміряємо об'єм води, що пройшов по трубопроводу (5) у мірний бак (8), який має шкалу розмірності в літрах. Час заповнення баку вимірюється секундоміром.

Термометром визначаємо температуру води. Діаметр прозорі труби вимірюємо штангельциркулем.

Послідовність проведення роботи

1. Відкрити вентилі (2) та (3), заповнити бак (1) водою.
2. Повільним відкриттям вентиля (4) встановити мінімальну витрату води у прозорій трубі.
3. Відкрити зажим (7) від ємності з підфарбованою рідиною (6) так, щоб її швидкість та швидкість основного потоку води співпадали, тобто струмені рухалися рівномірно без перемішування (ознака ламінарного руху).
4. Заповнити мірний бак, закривши вентиль (9) та одночасно включити секундомір. Зняти показник рівня води у баці (8).
5. Заміряти температуру води в мірному баці термометром.
6. Повільним відкриванням вентиля (4) збільшити швидкість руху води в прозорій трубі, доки струмінь підфарбованої води не буде змішуватися з основною масою води (ознака турбулентного руху). Зміну швидкості руху води провести як мінімум три рази.
7. Провести повторно заміри витрати води, за п. 4 та 5.

8. Заміряти діаметр прозорої труби штангельциркулем.
9. Закрити вентилі (2) та (4).
10. Результати замірів занести в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1. Результати спостережень

Найменування величини	Одиниці вимірюван ня	Дані спостережень		
		1	2	3
Режим, що спостерігається візуально				
Об'єм води, W				
Час наповнення ємності, t				
Температура води, t ⁰ C				

ЗВІТ З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 3

«Дослідження режимів руху рідини»

Мета роботи: створення та дослідження різних режимів руху рідини на лабораторній установці та підтвердження досліджуваних режимів критичним числом Рейнольдса.

Обробка результатів лабораторної роботи

1. Витрату води визначаємо за формулою:

$$Q = \frac{W}{t}, \text{ м}^3/\text{с},$$

де W – об'єм води, м^3 ;

t – час заповнення ємності, с.

2. Визначаємо площу поперечного перерізу труби.

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ м}^2$$

де d – діаметр труби, м.

3. Визначаємо швидкість руху води за формулою:

$$v = \frac{Q}{\omega}, \text{ м/с}$$

3. Визначаємо значення числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu},$$

де v – швидкість руху води, м/с;

d – діаметр труби, мм;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$ ($\nu = f(t^{\circ}\text{C})$ додаток 3).

4. Порівнюємо одержані значення числа Рейнольдса з критичним значенням і визначаємо режим руху рідини. Результати розрахунків заносимо до табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Обробка результатів роботи

Найменування величини	Одиниці вимірювання	Результати		
		1	2	3
Режим, що спостерігається візуально Об'єм води, W Час наповнення ємності, t Температура води, $t^{\circ}\text{C}$ Витрата води, Q Діаметр трубопроводу, d Середня швидкість руху води, v Коефіцієнт кінематичної в'язкості, ν Число Рейнольдса, Re Режим руху рідини за числом Рейнольдса				

Висновки: _____

Контрольні питання:

1. Рівняння нерозривності потоку рідини.
2. Формула та одиниці вимірювання витрат рідини.
3. Ламінарний режим руху рідини.
4. Турбулентний режим руху рідини.
5. Формула для визначення числа Рейнольдса.

Виконав _____

Перевірив _____

Оцінка _____

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

«Визначення втрат напору в трубах та пожежних рукавах»

Мета роботи: визначити коефіцієнт опору стандартного пожежного рукава.

1. Теоретична частина

Однією із основних задач гідравлічного розрахунку є визначення втрат напору на подолання гідравлічних опорів.

Розрізняють два види втрат напору:

- втрати напору на подолання опорів за довжиною h_l , які виникають при тертях рідини об стінки трубопроводів та шарів рідини один об другий;

- місцеві втрати напору h_m , що виникають у місцях, де потік зазнає тієї чи іншої місцевої деформації. Таке явище спостерігається при проходженні потоку через засувки, крани, повороти, різкі звуження або розширення тощо.

Втрати напору по довжині, при рівномірному усталеному русі рідини, можуть бути визначені за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

де h_l - втрати напору по довжині, м;
 λ - коефіцієнт гідравлічного опору;
 l - довжина трубопроводу, м;
 R - гідравлічний радіус, м;
 v - середня швидкість потоку, м/с;
 $\frac{v^2}{2g}$ - швидкісний напір, м.

Гідравлічний радіус R враховує вплив форми та розмірів поперечного перерізу потоку на рух рідини і може бути визначений за формулою:

$$R = \frac{\omega}{\chi},$$

де ω - площа поперечного перерізу, м²;
 χ - змочений периметр, м.

Для круглих напірних труб гідравлічний радіус дорівнює:

$$R = \frac{\pi D^2}{4\pi D} = \frac{D}{4}$$

Тоді для круглих напірних труб формула Дарсі-Вейсбаха буде мати вигляд:

$$h_l = \lambda \frac{l}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Існує велика кількість формул для визначення коефіцієнта λ , він залежить від режиму руху рідини, від шорсткості поверхні трубопроводу або пожежного рукава.

При ламінарному режимі ($Re < 2320$) коефіцієнт гідравлічного тертя λ визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

При турбулентному режимі ($Re > 2320$) коефіцієнт λ залежить від області турбулентності.

Альтшуль пропонує визначити область турбулентності за критерієм

$$Re = \frac{\Delta_{екв}}{d},$$

де Re – число Рейнольдса,

$\Delta_{екв}$ - еквівалент висоти виступів шорсткості поверхні трубопроводів або пожежних рукавів, мм (визначаємо за додатком 4);

d – діаметр трубопроводу, мм.

Перша область турбулентності це область абсолютно гладких труб

$$Re = \frac{\Delta_{екв}}{d} < 10.$$

Втрати напору в цій області пропорційні швидкості в степені 1,75.

$$h_l = k_2 v^{1,75}$$

В'язкий підшарок перекриває шорстку поверхню і при русі води діють тільки в'язкісні сили.

Коефіцієнт λ визначаємо за формулою Блазіуса

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

Друга область турбулентності – це перехідна область.

$$500 > Re = \frac{\Delta_{екв}}{d} > 10$$

В цій області турбулентності діють в'язкісні та інерційні сили. Її ще називають до квадратичною областю турбулентності.

Втрати напору пропорційні швидкості в степені від 1,75 до 2, але ще не 2.

$$h_l = k_n v^{1,75...2}$$

Коефіцієнт гідравлічного тертя визначаємо за формулою А. Д. Альтшуля

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_{\hat{a}\hat{a}\hat{a}}}{d} \right)^{0.25}$$

Третя область турбулентності – це область абсолютно шорстких труб, або її ще називають – квадратична область.

$$Re \frac{\Delta_{екв}}{d} > 500$$

В цій області діють тільки інерційні сили. Втрати напору пропорційні швидкості в квадраті.

$$h_l = k_m v^2$$

Для цієї області пропонується визначити коефіцієнт гідравлічного тертя за формулою Шифринсона:

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{\Delta \hat{a} \hat{a}}{d} \right)^{0.25}$$

Для сталених та чавунних труб, якщо швидкість руху води $v = 1,2$ м/с, коефіцієнт λ можна визначити за формулою Ф. А. Шевельова:

$$\lambda = \frac{0,021}{d^{0.3}}$$

Для трубопроводів втрати напору визначаємо за формулою:

$$h_l = A l Q^2,$$

де h_l – втрати напору по довжині, м;

A – питомий опір одного погонного метра;

l – довжина трубопроводу, м;

Q – витрата води, л/с.

Опір всього трубопроводу $S = A l$.

Місцеві втрати напору можна визначити за формулою Вейсбаха:

$$h_m = \xi \cdot \frac{v^2}{2g},$$

де h_m – місцеві втрати напору, м;

ξ – коефіцієнт місцевого опору;

$\frac{v^2}{2g}$ – швидкісний напір, м.

У деяких випадках втрати напору на місцеві опори (в пожежних гідрантах, колонках, водоміраx тощо) визначаються за формулою:

$$h_m = S Q^2,$$

де S – місцевий опір.

Місцеві втрати напору в рукавних з'єднаннях у відношенні до втрат за довжиною всієї лінії невеликі, тому їх не вираховують окремо, а відносять до загальних втрат напору в рукавних лініях.

Втрати напору в пожежних рукавах визначаються за формулою:

$$h = n S_p Q^2 = A_p l Q^2,$$

де h – втрати напору, м;

n – кількість стандартних рукавів довжиною 20 м;

S_p – опір одного стандартного рукава довжиною 20 м;

Q – витрати води, л/с;

A_p – питомий опір;

l – довжина рукавної лінії, м.

2. Хід лабораторної роботи

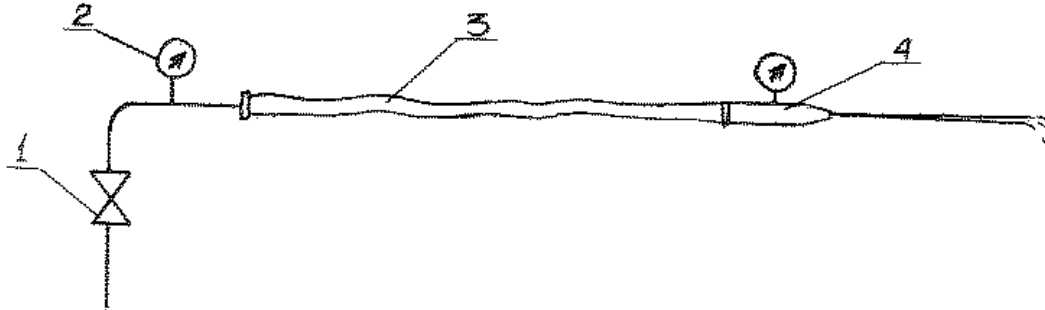


Рисунок 4.1. Схема лабораторної установки

1 - витратний вентиль, 2 – манометр, 3 - пожежний рукав, 4 - ствол-водомір (з манометром).

Послідовність проведення лабораторної роботи

1. Приєднати пожежний рукав до водопровідної мережі, усунувши згинання.
2. Відкрити вентиль (1), створити напір на стволі-водомірі.
3. Зняти показники манометрів.
4. Занести показники в табл. 2.1.
5. Збільшити напір на стволі-водомірі.
6. Повторити три рази п 4, 5.
7. Закрити вентиль (1).
8. Розібрати схему установки та прибрати робоче місце.

Таблиця 4.1. Результати спостережень

Номер вимірів	P_1	P_2
1.		
2.		
3.		

ЗВІТ З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 4

« Визначення втрат напору в трубах та пожежних рукавах »

Мета роботи: визначити коефіцієнт опору стандартного пожежного рукава.

Обробка результатів лабораторної роботи

1. Визначити витрати води зі ствола водоміра

$$Q = p \sqrt{H_{\text{ств.}}}, \text{ л/с,}$$

де P - провідність насадка (визначаємо за додатком 1);

$H_{\text{ств.}}$ - напір на стволі, м. вод. ст.

2. Визначити втрати напору в пожежному рукаві

$$\Delta h = h_1 - h_2,$$

де $h_1 = \frac{P_1}{\rho g}$, $h_2 = \frac{P_2}{\rho g}$,

$$\Delta h = \left(\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} \right),$$

Таблиця 4.1. Результати спостережень

P_1	P_2

3. Визначити опір пожежного рукава $l = 20$ м

$$S = \frac{h}{Q^2}, \quad \left[\frac{\text{м. вод. ст.} \cdot \text{с}^2}{\text{л}^2} \right]$$

3.1. Одержані значення S порівняти з даними, наведеними у додатку 5 і зробити висновки.

3.2. Результати розрахунків занести до табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Обробка результатів роботи

№ вимірів	Q	Δh	S
1.			
2.			
3.			

Контрольні питання:

1. Фактори, які визначають лінійні втрати напору у трубах.
2. Фактори, які визначають лінійні втрати напору у пожежних рукавах.
3. Формули втрат напору по довжині пожежного рукава.
4. Чому коефіцієнт опору прогумованих рукавів менший, ніж у непрогумованих?
5. Як впливає режим руху рідини на втрати напору в трубах?
6. Дати визначення абсолютно гладких труб.
7. Які труби називають гідравлічно-шорсткими?
8. Формула втрат напору в місцевих опорах.

Висновки: _____

Виконав _____

Оцінка _____

Викладач _____

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

«Визначення залежності дальності вильоту струменя від діаметра насадка і напору»

Мета роботи: визначити залежність дальності вильоту струменя від діаметра насадка і напору.

1. Теоретична частина

У багатьох сучасних машинах і апаратах широко використовується витікання рідин з отворів і насадок. З гідравлічної точки зору витікання води з насадок характеризується цілим рядом закономірностей, які необхідно знати пожежнику-рятувальнику.

При витіканні струменя із насадка або отвору в тонкій стінці на струмінь діють інерційні сили, сили тяжіння та опір повітря. Дальність вильоту струменя залежить від діаметра насадка, напору перед насадком та кута нахилу струменя до горизонту.

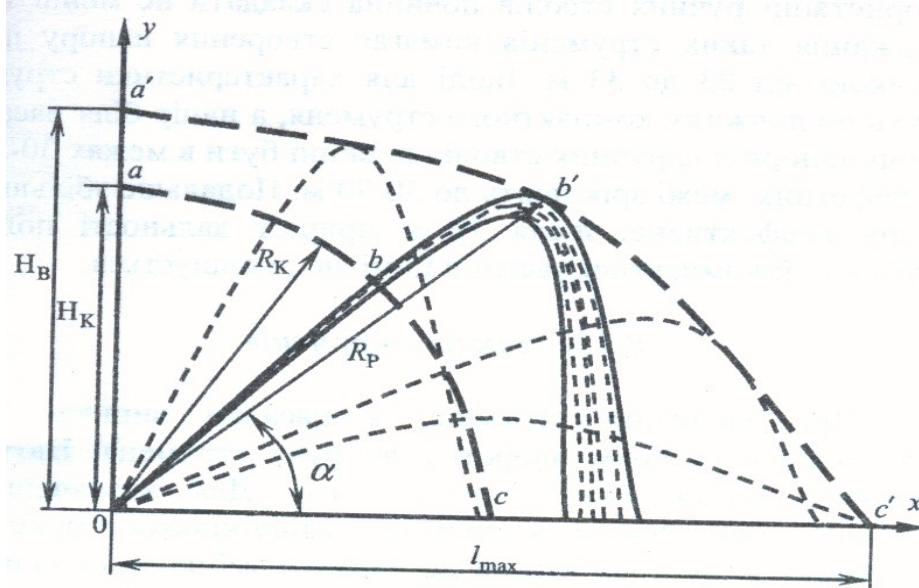


Рисунок 5.1. Схема похилого струменя

abc – траєкторія компактної частини струменя;

a'b'c' – траєкторія роздробленої частини струменя.

Під час витікання з отвору струмінь рідини стискається внаслідок інерції частинок рідини, що рухається до отвору за криволінійними траєкторіями.

Стискання струменя характеризується коефіцієнтом стиснення:

$$\varepsilon = \frac{\omega_{\text{ст}}}{\omega_{\text{отв}}}$$

де $\omega_{\text{ст}}$ - площа перетину стиснутої частини струменя;

$\omega_{\text{отв}}$ - площа поперечного перерізу отвору.

Швидкість у стисненому перетині може бути визначена за рівнянням:

$$v = \varphi \sqrt{2gH},$$

де $\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}}$ - коефіцієнт швидкості;

g - прискорення вільного падіння;

H - напір, під яким проходить витікання рідини, м.

Витрата рідини визначається за формулою:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH},$$

де $\mu = \varepsilon \varphi$ - коефіцієнт витрат.

Значення коефіцієнтів для різних отворів і насадок, віднесених до вихідного перетину, наведено в додатку 2.

Витрата води при витіканні з пожежних стволів може бути визначена одним із наведених нижче способів.

Об'ємний спосіб

Величина витрати Q визначається за формулою:

$$Q = \frac{W}{\tau},$$

де Q - витрата води, л/с;

W - об'єм води у мірній ємкості, л;

τ - час заповнення ємкості, с.

Для одержання більшої точності у визначенні витрат води необхідно використовувати мірні баки ємністю не менше 500 л.

За допомогою ствола-водоміра

Для визначення витрат використовують формули:

$$Q = p\sqrt{H} \quad \text{або} \quad Q = \sqrt{\frac{H}{S_H}},$$

де Q - витрата води, л/с;

p - провідність насадка;

S_H - опір насадка;

H - напір перед насадком, м.

Значення провідностей і опорів насадок приведено в додатку 1.

За допомогою трубки Піто

Витрата води визначається за формулою:

$$Q = \omega \varphi \sqrt{2gH},$$

- де Q - витрата води, л/с;
 ω - площа поперечного перерізу отвору насадка, м²;
H - напір перед насадком, м;
 φ - поправочний коефіцієнт для кожної трубки на калібр отвору.

2. Хід лабораторної роботи

Для проведення лабораторної роботи використовується установка, де на одному живлячому трубопроводі встановлено три циліндричні насадки діаметром 3, 5, 7 мм, з манометром.

При постійному напорі перед насадками можна визначити залежність дальності польоту струменя від діаметра спринку. Змінюючи напір перед насадком, можна визначити залежність дальності польоту струменя від напору перед насадком.

Вимірюючи витрати води через сприск насадка мірної ємності при змінному напорі можна визначити залежність витрат води від напору перед насадком.

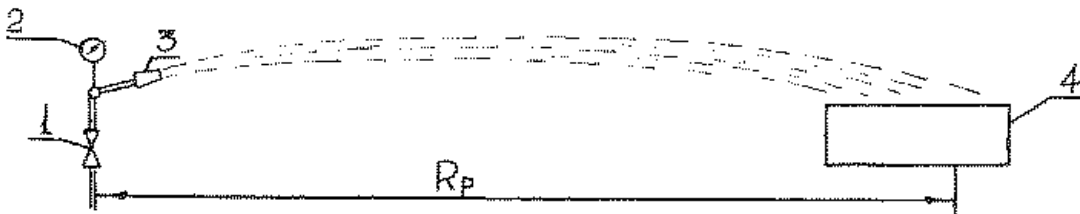


Рисунок 5.1. Схема лабораторної установки.

1. – вентиль; 2 – манометр; 3 – змінний насадок; 4 - мірна ємність.

Послідовність проведення роботи

1. Відкриваючи вентиль 1, встановити тим самим постійний напір перед насадками.
2. Виміряти дальність вильоту струменя.
3. Занести показники у таблицю спостережень (табл. 5.1.)
4. Перекрыти два насадки.
5. Збільшити напір перед насадком вентилем 1 і заміряти дальність вильоту струменя. Величину напору і відповідний радіус дії струменя занести до таблиці спостережень (табл. 5.2.)
6. Виконати п. 5 і одночасно заміряти об'єм води та час наповнення мірної ємності.
7. Пункти 5 та 6 повторити 3-4 рази.

8. Визначити витрати води при змінному напорі перед насадками.

9. Побудувати графіки залежності:

- а) дальності вильоту струменя від діаметра насадка;
- б) дальність вильоту струменя від напору перед насадком;
- в) витрати води від напору перед насадком.

10. Результати оформити звітом з лабораторної роботи і написати висновки.

Таблиця 5.1. Результати спостережень

$d_{\text{нас}}, \text{ мм}$	$R_c, \text{ м}$
16	
19	
22	

Таблиця 5.2. Результати спостережень

№ заміру	$H, \text{ м}$	$R_c, \text{ м}$	$W, \text{ м}^3$	$\tau, \text{ с}$
1				
2				
3				

ЗВІТ З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 5

«Визначення залежності дальності вильоту струменя від діаметра насадка і напору»

Мета роботи: визначити залежність дальності вильоту струменя від діаметра насадка і напору.

Обробка результатів спостережень

Величина витрати Q визначається за формулою:

$$Q = \frac{W}{\tau},$$

де Q - витрата води, л/с;
 W - об'єм води у мірній ємкості, л;
 τ - час заповнення ємності, с.

Для визначення витрат за допомогою ствола-водоміра використовують формули:

$$Q = p\sqrt{H} \quad \text{або} \quad Q = \sqrt{\frac{H}{S_H}},$$

де Q - витрата води, л/с;
 p - провідність насадка;
 S_H - опір насадка;
 H - напір перед насадкою, м;
 Q - витрата води, л/с.

Результати обчислень заносимо до табл. 5.1 та будуємо графіки залежностей дальності вильоту струменя від діаметра насадка та напору і графік залежності витрати води від напору перед насадком.

Таблиця 5.1. Обробка результатів спостережень

№ заміру	H , м	R_c , м	Q , л/с	$d_{\text{нас}}$, с
1				
2				
3				
4				
5				
6				

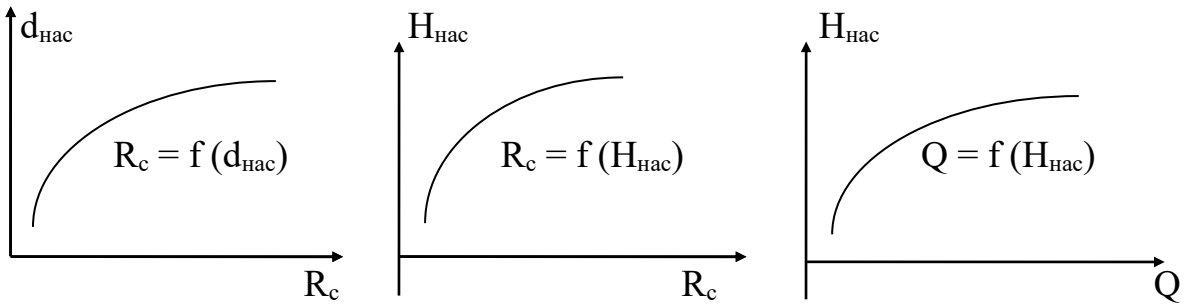


Рисунок 3.1. Графіки залежностей дальності вильоту струменя від діаметра насадка та напору і залежності витрат води від напору.

Контрольні питання:

1. Види та призначення насадків.
2. Види струменів.
3. Фактори, що впливають на дальність вильоту струменів пожежних стволів.
4. Формули для визначення швидкості витікання та витрат води з отворів і насадків.
5. Стиснення струменя.
6. Як впливає кут нахилу струменя до горизонту на дальність вильоту струменя.
7. Формула реакції струменя.

Висновки: _____

Виконав _____

Перевірив _____

Оцінка _____

Лабораторна робота № 6

«Дослідження витікання рідини при змінному напорі в атмосферу»

Мета: навчитися визначати швидкість спорожнення будь-яких ємностей та резервуарів.

Теоретичний матеріал

Класифікація отворів

Витікання рідини крізь отвори вивчають давно. Теорія витікання рідин крізь отвори покладена в основу розрахунків дальnobійності витікаючої струминки; карбюраторів; ежекторів; сопел.

Розрізняють отвори різної форми і розмірів.

1. **Малими рахують отвори** у яких розмір по висоті менше 10 відсотків від діючого над отвором напору.

$$D(a) \leq 0.1 H.$$

Якщо в кожній точці отвору тиск однаковий, то це **також гідравлічно малий отвір**.

2. **Гідравлічно великий отвір** – це отвір в кожній точці якого напір змінюється.

Отвори бувають в тонких стінках

$$b \leq 0.67 H$$

і в товстих стінках

$$b > 0.67 H.$$

На характер витікання також впливає :

- 1) стиснення струменя;
- 2) постійний напір;
- 3) змінний напір;
- 4) рівень води за отвором.

Згідно з цим розрізняють:

- 1) струмені з повним стисненням;
- 2) неповним стисненням;
- 3) досконалим;
- 4) недосконалим.

1. Повне стиснення – це стиснення по всьому периметру.

2. Неповне стиснення – стиснення з 2-х або 3-х сторін.

3. Досконале стиснення, якщо бічні стінки не впливають на витікання рідини.

Стисливість рідини характеризується коефіцієнтом стиснення:

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega} \quad (1).$$

де ω_c - стиснена площа поперечного перерізу струменя.

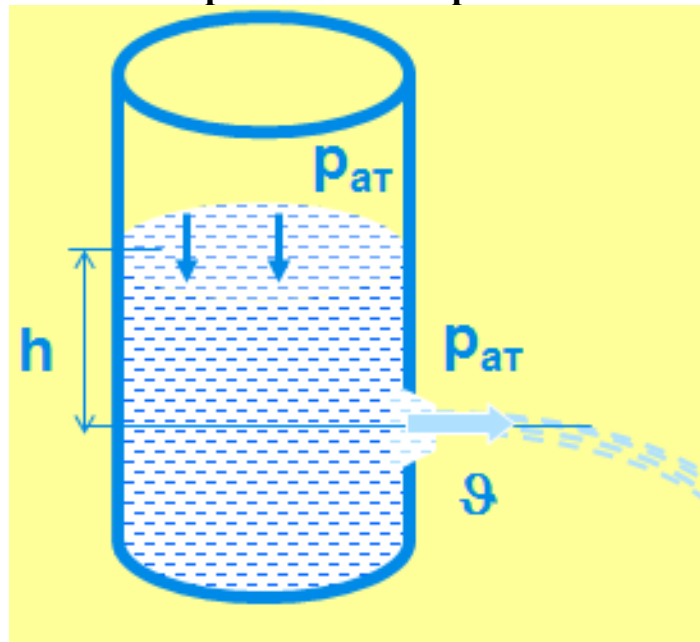
ω - початкова площа.

Є три випадки витікання рідини в залежності від рівня води за отвором:

- 1) вільне – це витікання в повітря;
- 2) підтоплене – підтоплення витікаючого струменя рівнем води в баці Б (MN);
- 3) затоплене – це коли струмінь витікаючої рідини виходить під рівень води в іншому резервуарі.

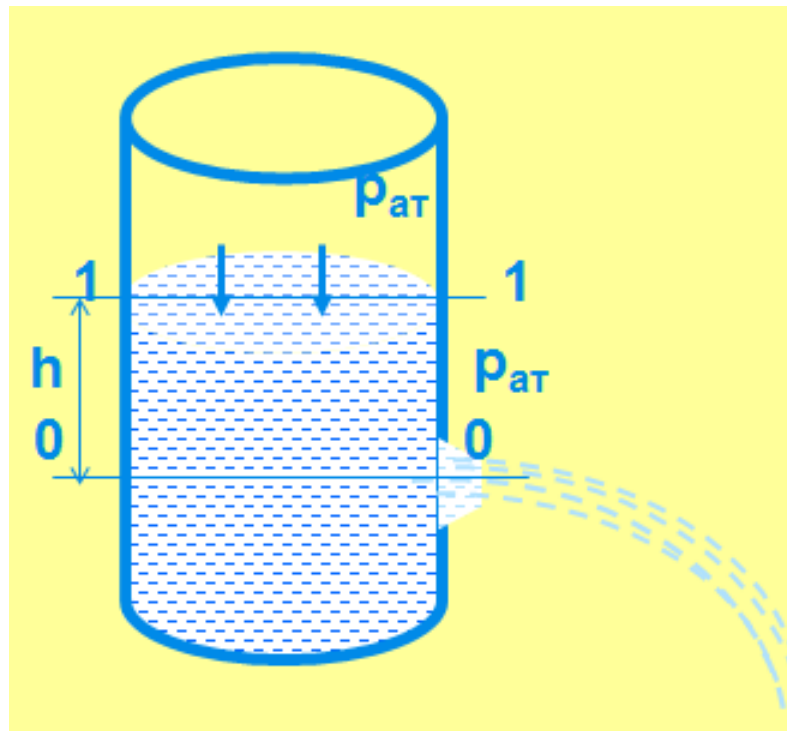
1. Витікання рідини з круглого отвору в тонкій стінці

Витікання через малий отвір в тонкій стінці.



В процесі витікання потенційна енергія рідини перетворюється в кінетичну енергію витікаючого струменя.

Потенційна енергія рідини



Потенціальна енергія в початковому перерізі 1-1 або на вході в отвір.

$$E_{ex} = m \cdot g \cdot h + \frac{m \cdot p_{at}}{\rho} = \frac{m(\rho g h + p_{at})}{\rho} = \frac{m \cdot p_{ex}}{\rho}$$

В ємності рідина практично не рухається, кінетична енергія дорівнює нулю. При переході від перерізу 1-1 до перерізу 0-0 виникає перетворення потенціальної енергії положення в потенціальну енергію тиску.

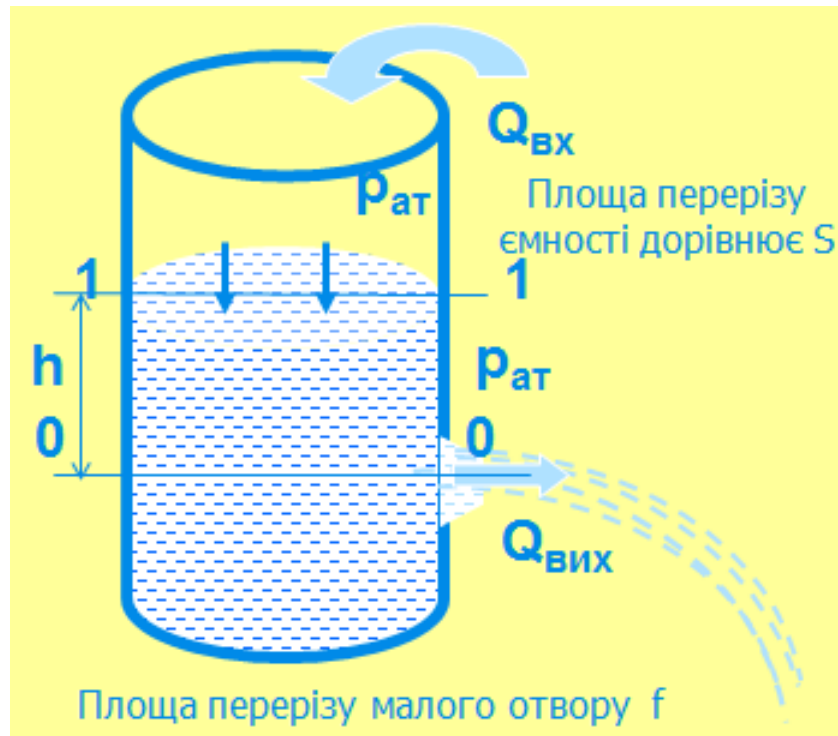
Потенціальна енергія на виході із отвору:

$$E_{вых} = \frac{m \cdot p_{вых}}{\rho} = \frac{m \cdot p_{at}}{\rho}$$

Напір витікання

Напір витікання – різниця потенціальних енергій одиниці ваги рідини на вході і виході.

Витікання при постійному напорі означає витікання при постійній різниці тиску Δp .

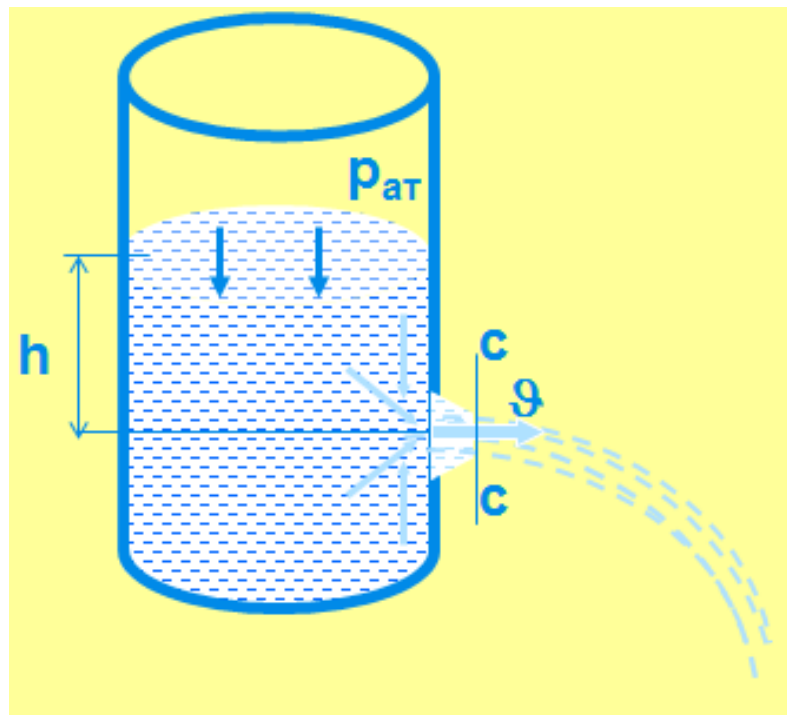


$$H = \frac{E_{\text{ex}} - E_{\text{vyx}}}{mg} = h = \frac{\rho g h}{\rho g} = \frac{p_{\text{ex}} - p_{\text{vyx}}}{\rho g} = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

**Виведення розрахункових залежностей
(малий отвір в тонкій стінці)**

Основна задача:

Визначення швидкості і витрати витікаючого струменя.



Струминки підходять до отвору зі всіх сторін. Сила інерції вертикальних струминок стискає ядро струменя і з'являється на виході стиснутий переріз $s-s$ (на відстані приблизно $0,5 d$ від стінки посудини).

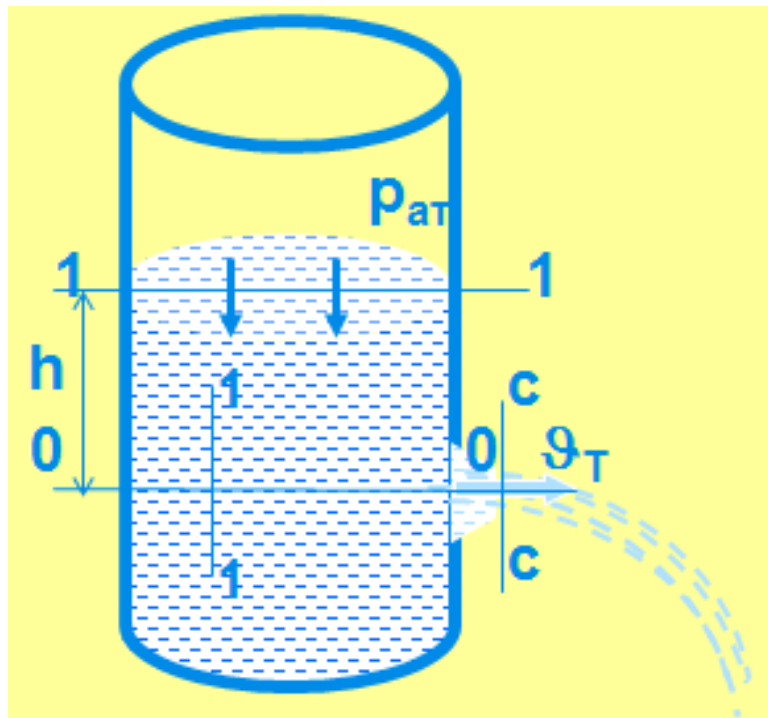
Малий отвір – його висота d не перевищує $0,1$ напору h над центром отвору. При цьому напір в отворі постійний по всьому перерізу.

Швидкість і витрата визначаються в стиснутому перерізі струменя.

Визначення теоретичної швидкості і теоретичної витрати (ідеальна рідина).

Основа розрахунку – закони збереження маси і енергії.

В ідеальній рідині не виникають сили тертя і сили інерції, тому немає гідравлічних опорів і енергії рідини на вході і виході із отворів рівні.



Закон збереження енергії

$$\frac{m \cdot p_{вх}}{\rho} = \frac{m \cdot p_{вих}}{\rho} + \frac{m v^2}{2}$$

Теоретична швидкість

$$v_T = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Теоретична витрата

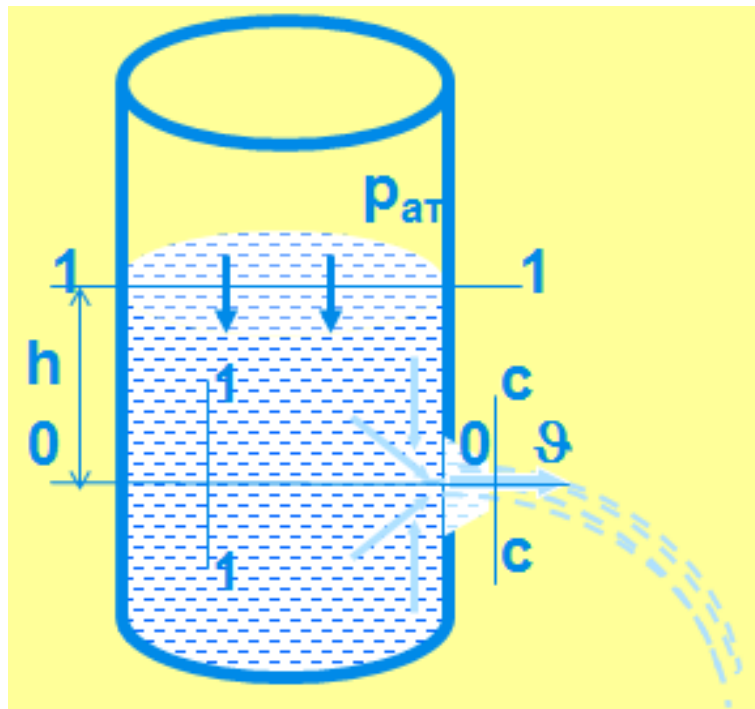
$$Q_T = v_T \cdot \omega = \omega \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Витікання реальної рідини

В реальній рідині виникають:

1. Втрати енергії через силу тертя призводять до зменшення швидкості і витрати.

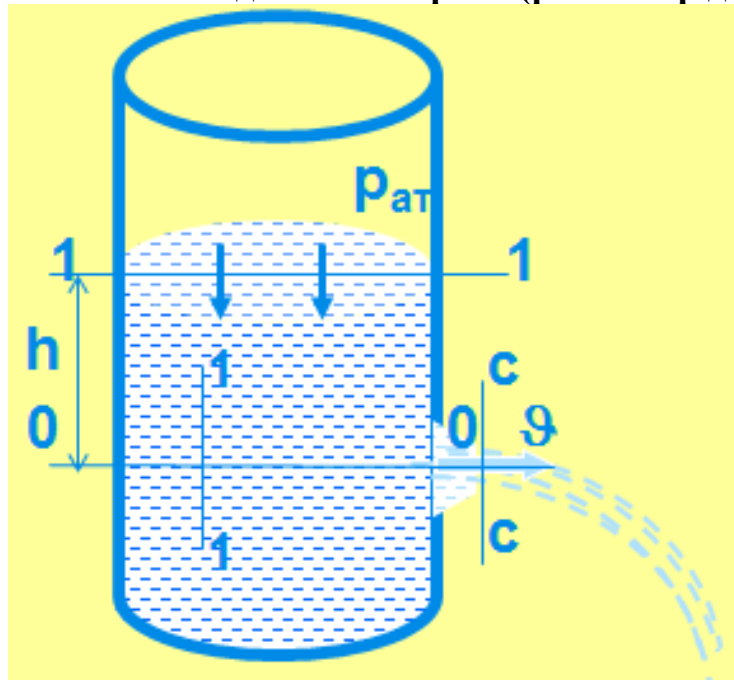
2. Стискання струменя через силу інерції приводить до зменшення витрати.



Коефіцієнт стискання струменя

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}$$

Визначення швидкості і витрати (реальна рідина)



Дійсна швидкість

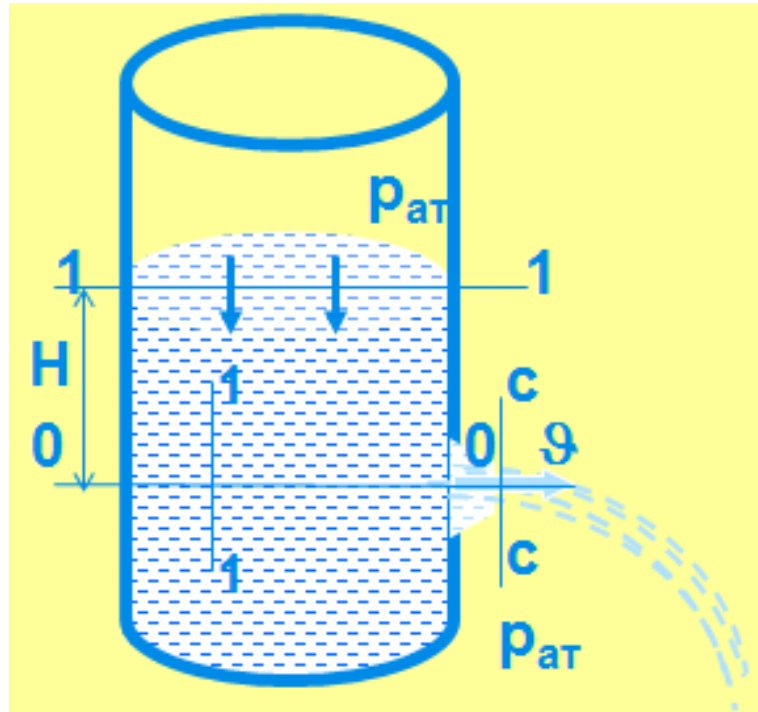
$$g = \varphi \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

$\varphi < 1$ – коефіцієнт швидкості

Дійсна витрата

$$Q = \vartheta \cdot \omega_c = \varphi \cdot \varepsilon \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad \mu < 1 \text{ – коефіцієнт витрати}$$

Визначення швидкості (реальна рідина, використання р-ня Бернуллі)



Р-ня Бернуллі для перерізу 1-1 и С-С

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \vartheta_1^2}{2g} = z_c + \frac{p_c}{\rho g} + \frac{\alpha_c \vartheta_c^2}{2g} + h_{1-c}$$

$$Z_1 = h; \quad p_1 = p_{atm}; \quad \vartheta_1 = 0;$$

$$Z_c = 0; \quad p_c = p_{atm};$$

$$\vartheta_c = ? \text{ - визначається}; \quad \alpha_c = 1;$$

$$h_{1-c} = h_{ex} = \xi_{ex} \cdot \vartheta_c^2 / 2g \text{ - втрати на вході в отвір}$$

Швидкість в стиснутому перерізі струменя

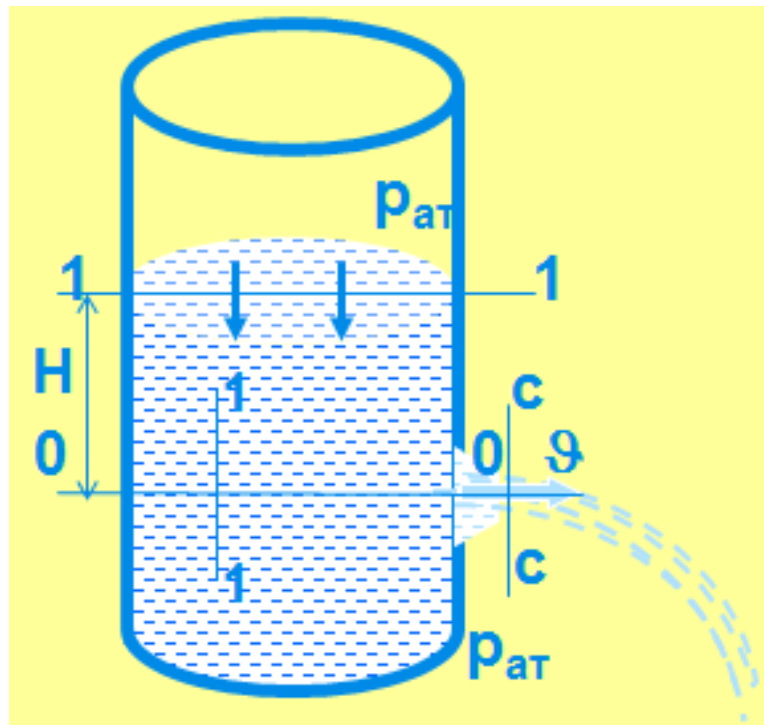
$$\vartheta_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_{ex}}} \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_{ex}}} \quad \varphi < 1 \text{ – коефіцієнт швидкості}$$

Визначення витрати (реальна рідина)

Витрата – кількість рідини, що протікає через переріз струменя за одиницю часу.

Витрата дорівнює добутку швидкості в перерізі потоку на площу перерізу.



$$Q = \vartheta_c \cdot \omega_c = \varphi \cdot \varepsilon \cdot \omega \sqrt{2gH} = \mu \cdot \omega \sqrt{2gH} = \mu \cdot \omega \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

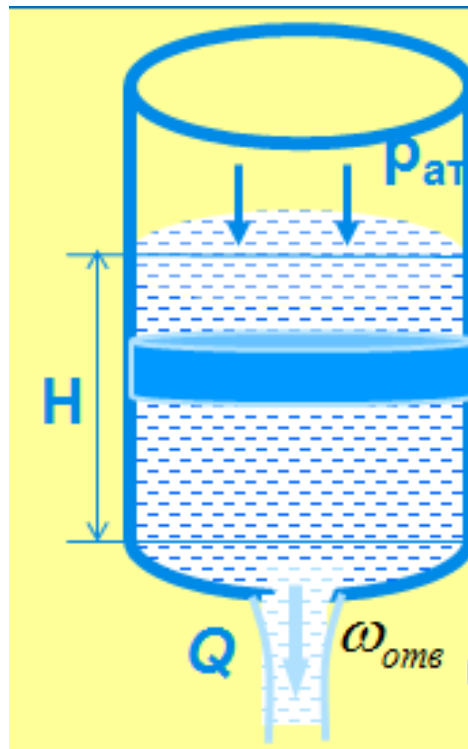
$$\mu = \varphi \cdot \varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_{ex}}} \cdot \varepsilon$$

$\mu < 1$ – коефіцієнт витрати, враховує вплив сил

тертя і сил інерції.

Спорожнення резервуарів Витікання при змінному напорі

Задача: визначити час спорожнення резервуара від рідини



$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}$$

$$T = \frac{\omega \cdot H}{Q} = \frac{2\omega \cdot H}{\mu \cdot \omega_{ome} \sqrt{2gH}}$$

Спрощена формула: $T = \frac{2W}{Q}$

1.1. Загальні відомості

Витікання рідини в атмосферу (при наявності або відсутності припливу) є одним з видів неусталеного руху рідини. В даному випадку рівень рідини в резервуарі (напір) змінюється з часом, а при зміні напору змінюється з часом і витрата, і швидкість витікання.

Основною практичною задачею вивчення витікання рідини при змінному напорі є визначення часу спорожнення або наповнення різних резервуарів, цистерн, водосховищ, судноплавних шлюзів і т. п. Час зміни рівняння рідини в призматичному резервуарі від напору H_1 до напору H_2 при наявності припливу Q_0 (йому відповідає напір H_0) може бути визначений за теоретичною формулою

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} + \sqrt{H_0} \cdot \ln \frac{\sqrt{H_0} - \sqrt{H_1}}{\sqrt{H_0} - \sqrt{H_2}} \right), \quad (1)$$

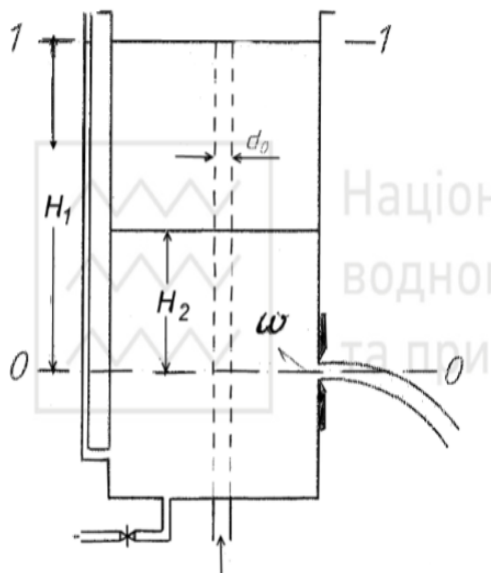


Схема до визначення часу витікання рідини в атмосферу при змінному напорі

Де ω – площа отвору;
 Ω – площа горизонтального перерізу резервуара;
 μ - коефіцієнт витрати отвору;
 H_1 – напір на початок витікання;
 H_2 – напір на кінець витікання;
 H_0 – сталий напір при усталеному русі з витратою Q_0 , яка дорівнює припливу.

Якщо приплив відсутній ($Q_0 = 0$), що і розглядається в даній роботі то $H_0 = 0$ і час зміни напору від H_1 до H_2 визначається формулою:

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}). \quad (2)$$

Якщо в формулі (2) припустити, що $H_2 = 0$, то одержимо формулу для визначення часу повного спорожнення резервуара в такому вигляді

$$t = \frac{2\Omega \sqrt{H_1}}{\mu\omega\sqrt{2g}}. \quad (3)$$

1.2. Склад лабораторної роботи

Визначення дослідним шляхом часу часткового і повного спорожнення резервуара через малий отвір в тонкій стінці і співставлення його з теоретичним часом витікання, який визначається залежностями (2) і (3).

1.3. Дослідна установка

Установка представлена резервуаром призматичної форми (рис.1), обладнаним п'єзометром, переливною трубою, зовнішній діаметр якої d_0 , в боковій стінці резервуара встановлений круглий малий отвір діаметром d . Вода в резервуар подається по трубі, на якій встановлений вентиль.

1.4. Виконання роботи і обробка дослідів

1. При закритому отворі заповнюють резервуар водою до рівня, при якому починається злив води через переливну трубу. Перекривають вентиль подачі води і по п'єзометру фіксується напір H_1 . Відкривають отвір і одночасно включають секундомір. Через деякий відрізок часу записують рівень води в п'єзометрі (напір H_2) і фіксують час зниження напору від H_1 до H_2 не зупиняючи секундоміра. Коли рівень води знизиться до $H_2 = 0$, виключають секундомір і фіксують час повного спорожнення резервуара.

2. Вимірюють розміри резервуара в плані a і b , зовнішній діаметр переливної труби d_0 і діаметр отвору d .

3. Обчислюють площу отвору $\omega = \pi d^2 / 4$, площу перерізу переливної труби $\omega_0 = \pi d_0^2 / 4$ і площу резервуара в плані за виключенням площі перерізу переливної труби, тобто

$$\Omega = a \cdot b - \frac{\pi d_0^2}{4} . \quad (4)$$

4. За формулами (2) і (3) обчислюють теоретичний час зміни напору від H_1 до H_2 і час повного спорожнення резервуара.

5. Співставляють дослідний час витікання з теоретичним.

Результати дослідження

N	V	H	ω	T
1				
2				
3				

ЗВІТ З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ № 6

«Дослідження витікання рідини при змінному напорі в атмосфері»

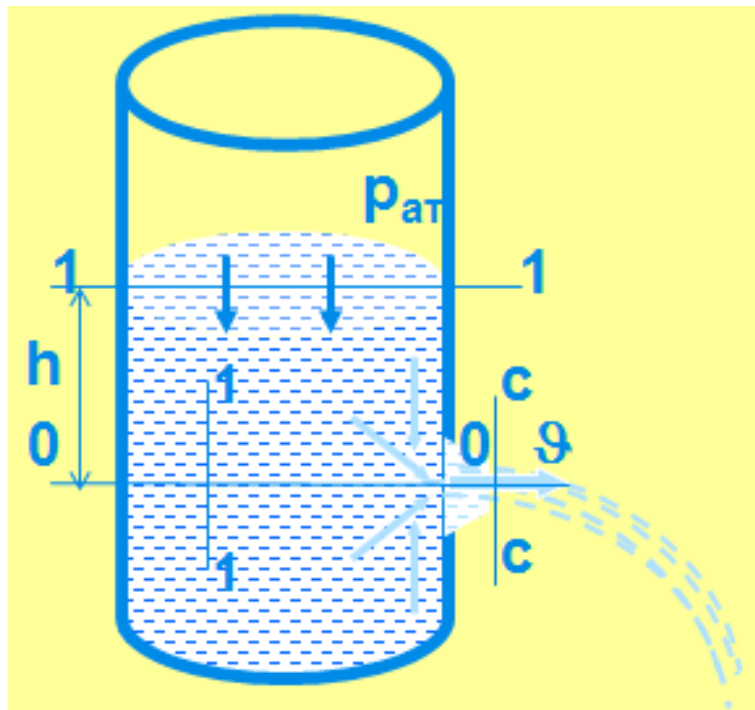
Мета: навчитися визначати швидкість спорожнення будь-яких ємностей та резервуарів.

Витікання реальної рідини

В реальній рідині виникають:

3. Втрати енергії через силу тертя призводить до зменшення швидкості і витрати.

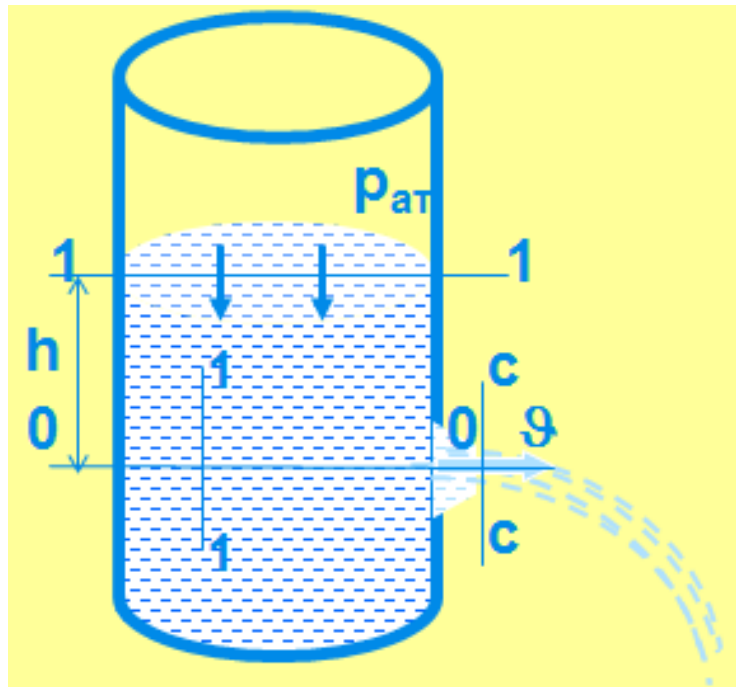
4. Стискання струменя через силу інерції призводить до зменшення витрати.



Коефіцієнт стискання струменя

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}$$

Визначення швидкості і витрати (реальна рідина)



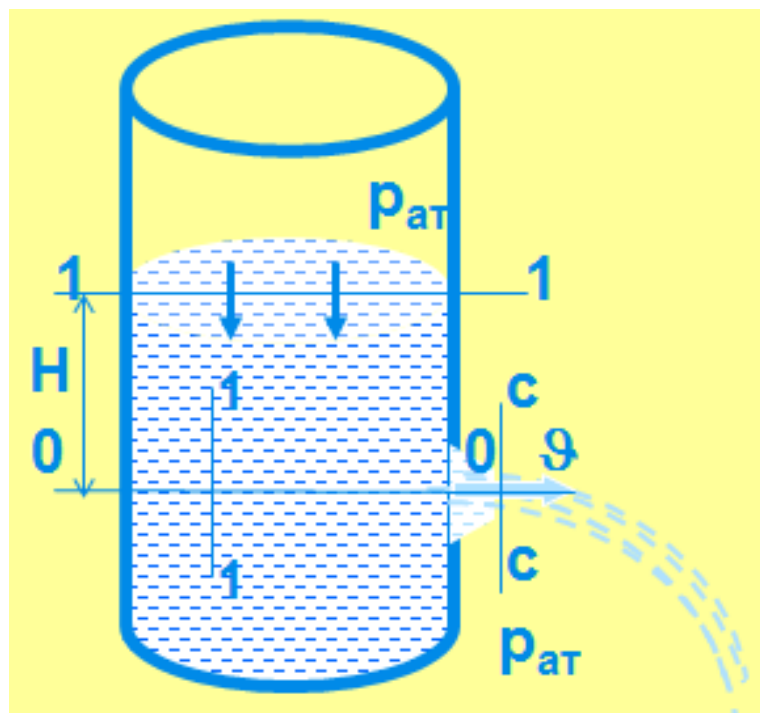
Дійсна швидкість

$$v = \varphi \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad \varphi < 1 \text{ – коефіцієнт швидкості}$$

Дійсна витрата

$$Q = v \cdot \omega_c = \varphi \cdot \varepsilon \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad \mu < 1 \text{ – коефіцієнт витрати}$$

**Визначення швидкості
(реальна рідина, використання р-ня Бернуллі)**



Р-ня Бернуллі для перерізу 1-1 и С-С

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_c + \frac{p_c}{\rho g} + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + h_{1-c}$$

$$Z_1=h; p_1=p_{atm}; v_1=0;$$

$$Z_c=0; p_c=p_{atm};$$

$$v_c=? - \text{визначається}; \alpha_c=1;$$

$$h_{1-c}=h_{ex}=\xi_{ex} \cdot v_c^2/2g - \text{втрати на вході в отвір}$$

Швидкість в стиснутому перерізі струменя

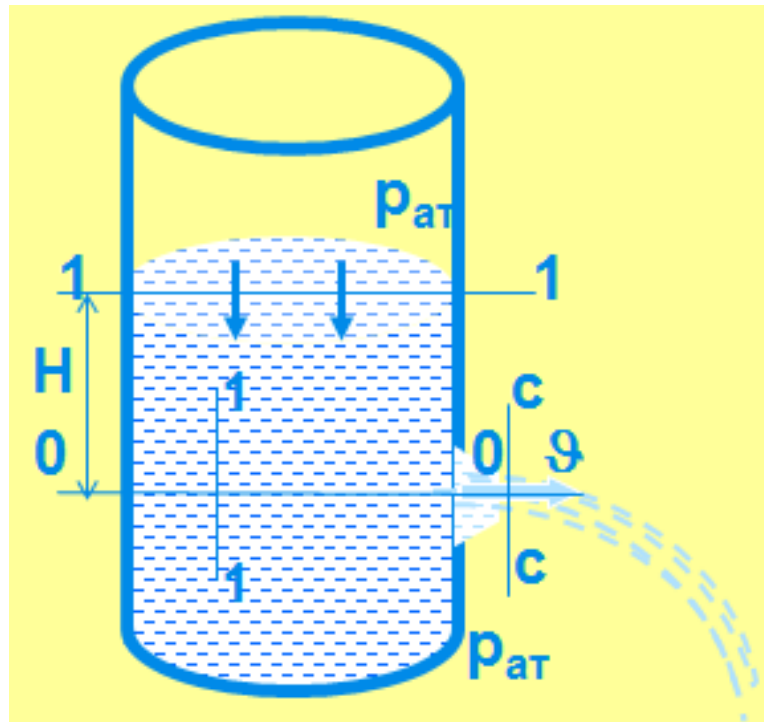
$$v_c = \frac{1}{\sqrt{1+\xi_{ex}}} \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\xi_{ex}}} \quad \varphi < 1 - \text{коефіцієнт швидкості}$$

Визначення витрати (реальна рідина)

Витрата – кількість рідини, що протікає через переріз струменя за одиницю часу.

Витрата дорівнює добутку швидкості в перерізі потоку на площу перерізу.



$$Q = v_c \cdot \omega_c = \varphi \cdot \varepsilon \cdot \omega \sqrt{2gH} = \mu \cdot \omega \sqrt{2gH} = \mu \cdot \omega \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

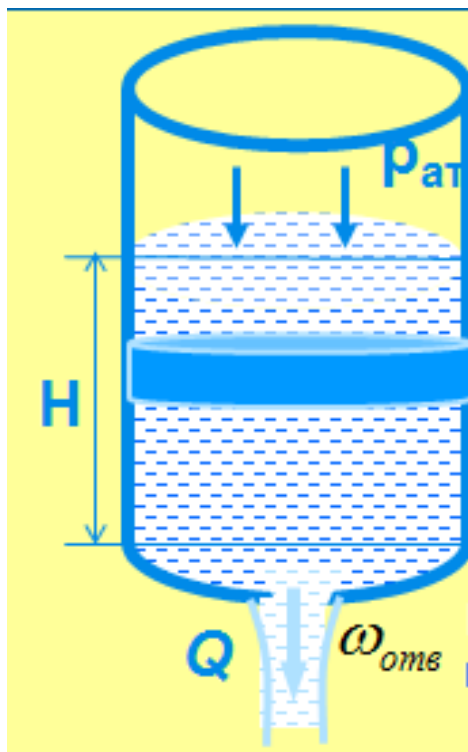
$$\mu = \varphi \cdot \varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1+\xi_{ex}}} \cdot \varepsilon$$

$\mu < 1$ – коефіцієнт витрати, враховує вплив сил

тертя і сил інерції.

Спорожнення резервуарів Витікання при змінному напорі

Задача: визначити час спорожнення резервуара від рідини



$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}$$

$$T = \frac{\omega \cdot H}{Q} = \frac{2\omega \cdot H}{\mu \cdot \omega_{отв} \sqrt{2gH}}$$

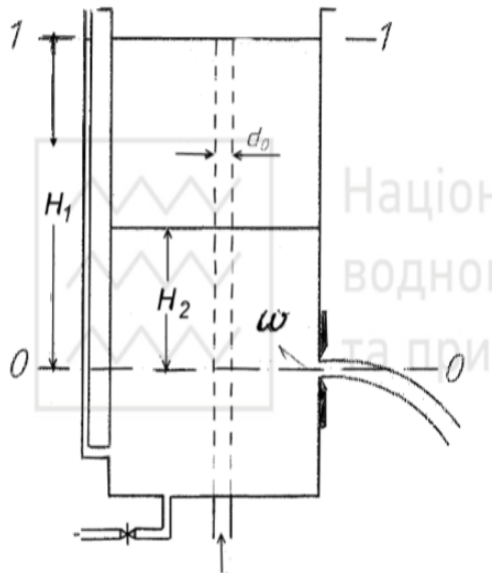
Спрощена формула: $T = \frac{2W}{Q}$

1.1. Загальні відомості

Витікання рідини в атмосферу (при наявності або відсутності припливу) є одним з видів неусталеного руху рідини. В даному випадку рівень рідини в резервуарі (напір) змінюється з часом, а при зміні напорі змінюється з часом і витрата, і швидкість витікання.

Основною практичною задачею вивчення витікання рідини при змінному напорі є визначення часу спорожнення або наповнення різних резервуарів, цистерн, водосховищ, судноплавних шлюзів і т. п. Час зміни рівняння рідини в призматичному резервуарі від напорі H_1 до напорі H_2 при наявності припливу Q_0 (йому відповідає напір H_0) може бути визначений за теоретичною формулою

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} + \sqrt{H_0} \cdot \ln \frac{\sqrt{H_0} - \sqrt{H_1}}{\sqrt{H_0} - \sqrt{H_2}} \right), \quad (1)$$



Де ω – площа отвору;
 Ω – площа горизонтального перерізу резервуара;
 μ – коефіцієнт витрати отвору;
 H_1 – напір на початок витікання;
 H_2 – напір на кінець витікання;
 H_0 – сталий напір при усталеному русі з витратою Q_0 , яка дорівнює припливу.

Схема до визначення часу витікання рідини в атмосферу при змінному напорі

Якщо приплив відсутній ($Q_0 = 0$), що і розглядається в даній роботі, то $H_0 = 0$ і час зміни напору від H_1 до H_2 визначається формулою

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} \right). \quad (2)$$

Якщо в формулі (2) припустити, що $H_2 = 0$, то одержимо формулу для визначення часу повного спорожнення резервуара в такому вигляді

$$t = \frac{2\Omega \sqrt{H_1}}{\mu\omega\sqrt{2g}}. \quad (3)$$

1.4. Склад лабораторної роботи

Визначення дослідним шляхом часу часткового і повного спорожнення резервуара через малий отвір в тонкій стінці і співставлення його з теоретичним часом витікання, який визначається залежностями (2) і (3).

1.2. Дослідна установка

Установка представлена резервуаром призматичної форми (рис.1), обладнаним п'єзометром, переливною трубою, зовнішній діаметр якої d_0 , в боковій стінці резервуара встановлений круглий малий отвір діаметром d . Вода в резервуар подається по трубі, на якій встановлений вентиль.

1.4. Виконання роботи і обробка дослідів

1. При закритому отворі заповнюють резервуар водою до рівня, при якому починається злив води через переливну трубу. Перекривають вентиль подачі води і по п'єзометру фіксується напір H_1 . Відкривають отвір і одночасно включають секундомір. Через деякий відрізок часу записують рівень води в п'єзометрі (напір H_2) і фіксують час зниження напору від H_1 до H_2 не зупиняючи секундоміра. Коли рівень води знизиться до $H_2 = 0$, виключають секундомір і фіксують час повного спорожнення резервуара.

2. Вимірюють розміри резервуара в плані a і b , зовнішній діаметр переливної труби d_0 і діаметр отвору d .

3. Обчислюють площу отвору $\omega = \pi d^2 / 4$, площу перерізу переливної труби $\omega_0 = \pi d_0^2 / 4$ і площу резервуара в плані за виключенням площі перерізу переливної труби, тобто

$$\Omega = a \cdot b - \frac{\pi d_0^2}{4} . \quad (4)$$

4. За формулами (2) і (3) обчислюють теоретичний час зміни напору від H_1 до H_2 і час повного спорожнення резервуара.

5. Співставляють дослідний час витікання з теоретичним.

Результати дослідження

N	V	H	ω	T
1				
2				
3				

Висновки: _____

Виконав _____

Перевірив _____

Оцінка _____

Контрольні запитання

1. Який рух рідини називається неусталеним?
2. В якому випадку резервуар спорожниться швидше: при витіканні через насадок, чи через отвір?
3. В якому випадку для спорожнення одного і того ж об'єму рідини буде потрібно менше часу: при змінному, чи при сталому напорі?
4. Запишіть формули для визначення теоретичного часу витікання рідини.

Значення опорів S_H і провідності p насадків (для Q , л/с)

Діаметр насадка, мм	S_H	p	Діаметр насадка, мм	S_H	p
10	8.26	0.348	28	0.134	2.73
11	5.64	0.421	1	0.117	2.93
12	3.98	0.501	2	0.102	3.13
13	2.89	0.588	3	0.088	3.37
14	2.40	0.682	4	0.079	3.56
15	1.63	0.783	5	0.070	3.80
16	1.26	0.891	6	0.062	4.02
17	0.99	1.01	7	0.055	4.26
18	0.787	1.13	8	0.049	4.51
19	0.634	1.26	38	0.040	5.02
20	0.516	1.39	40	0.032	5.57
21	0.425	1.53	42	0.026	6.14
22	0.353	1.68	44	0.022	6.74
23	0.295	1.84	46	0.018	7.35
24	0.249	2.00	48	0.016	8.02
25	0.212	2.17	50	0.0132	8.70
26	0.181	2.35	65	0.0053	13.74
27	0.156	2.54			

Значення коефіцієнтів витікання з отворів і насадок

Тип отвору або насадки	ζ	ε	φ	μ
Круглий отвір в тонкій стінці	0.06	0.64	0.97	0.62
Зовнішній циліндричний насадок	0.5	1	0.82	0.82
Внутрішній циліндричний насадок	1.0	1	0.71	0.71
Конічний збіжний насадок, $\theta = 13^\circ$	0.09	0.98	0.96	0.94
Коноїдальний насадок	0.06	1	0.98	0.98

Коефіцієнти динамічної μ та кінематичної ν в'язкості деяких рідин

Рідина	$t^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^3, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$
Вода	0	1,792	1,792
	10	1,306	1,306
	20	1,004	1,006
	30	0,802	0,805
	40	0,654	0,659
Бензин	15	0,650	0,930
Спирт етиловий	20	1,190	1,540
Ртуть	15	1,540	0,110
Керосин	15	2,170	2,700
Масло трансформаторне	20	27,500	31,000

Значення абсолютної шорсткості Δ для труб

Матеріал і вид труб	Стан труб	Δ, мм
Сталеві безшовні	- нові і чисті	0.015
	- старанно укладені	0.022
Сталеві зварні	- нові і чисті	0.06
	- помірно іржаві	0.5
	- старі іржаві	1.0
	- з великими відкладеннями	3.0
Оцинковані: сталеві, чавунні	- нові і чисті	0.15
	- після кількох років експлуатації	0.5
	- нові асфальтовані	0.8
	- нові без покриття	0.3
	- ті, що були у використанні	1.0
	- дуже старі	3.0
Азбестоцементні	- нові	0.075
Бетонні	- нові з попередньо напруж. бетону	0.03
	- нові відцентрові	0.2
	- ті, що були у використанні	0.5
	- з необробленого бетону	2.0

Значення опорів пожежних рукавів

d, мм	Рукава прогумовані		Рукава непрогумовані	
	S _p	A _p	S _p	A _p
51	0,13	0,0065	0,24	0,012
66	0,034	0,0017	0,077	0,00385
77	0,015	0,00075	0,030	0,0015
89	0,007	0,00035	-	-
110	0,0022	0,00011	-	-
150	0,0004	0,00002	-	-

**Значення напора (H) і витрати рідини (Q) в залежності
від радіуса компактного струменя**

Радіус дії компактної частини струменя, м	Діаметри насадків, d мм									
	13		16		19		22		25	
	Н, м	Q, л/с	Н, м	Q, л/с	Н, м	Q, л/с	Н, м	Q, л/с	Н, м	Q, л/с
6	8.1	1.7	7.8	2.5	7.7	3.5	7.6	4.6	7.5	5.9
7	9.6	1.8	9.2	2.7	9.0	3.8	8.9	5.0	8.7	6.4
8	11.2	2.0	10.7	2.9	10.4	4.1	10.2	5.4	10.1	6.9
9	13.0	2.1	12.4	3.1	12.0	4.3	11.7	5.8	11.6	7.4
10	14.9	2.3	14.1	3.3	13.6	4.6	13.2	6.1	12.9	7.8
11	16.9	2.4	15.8	3.5	15.2	4.9	14.7	6.5	14.4	8.3
12	19.1	2.6	17.7	3.8	16.9	5.2	16.3	6.8	15.9	8.7
13	21.4	2.7	19.7	4.0	18.7	5.4	18.0	7.2	17.5	9.1
14	23.9	2.9	21.8	4.2	20.6	5.7	19.8	7.5	19.2	9.6
15	26.7	3.0	24.0	4.4	22.6	6.0	21.6	7.8	20.9	10.0
16	29.7	3.2	26.5	4.6	24.7	6.2	23.6	8.2	22.7	10.4
17	33.2	3.4	29.2	4.8	27.1	6.5	25.7	8.5	24.7	10.8
18	37.1	3.6	32.2	5.1	29.6	6.8	28.0	8.9	26.8	11.3
19	41.7	3.8	35.6	5.3	32.5	7.1	30.5	9.3	29.1	11.7
20	46.8	4.0	39.4	5.6	35.6	7.5	33.2	9.7	31.5	12.2
21	53.3	4.3	43.7	5.9	39.1	7.8	36.3	10.1	34.3	12.3
22	60.9	4.6	48.7	6.2	43.1	8.2	39.6	10.6	37.3	13.3
23	70.3	4.9	54.6	6.6	47.6	8.7	43.4	11.1	40.6	13.9
24	82.2	5.3	61.5	7.0	52.7	9.1	47.7	11.7	44.3	14.5
25	98.2	5.8	70.2	7.5	58.9	9.6	52.7	12.2	48.6	15.2
26	-	-	80.6	8.0	66.2	10.2	58.5	12.9	53.5	15.9
27	-	-	94.2	8.6	75.1	10.9	65.3	13.7	59.1	16.8
28	-	-	-	-	86.2	11.6	75.5	14.5	65.8	17.7

Список літератури

1. Лаврівський З. В., Мандрус В. І. Технічна механіка рідин та газів. – Львів: «Сполом», 2004.
2. Левицький Б. Ф., Лещій Н. П. Гідравліка. – Львів: Світ, 1994.
3. Тищенко Є. О., Ленартович Є. С., Мигаленко К. І., Мигаленко О. І. Збірник задач (Технічна механіка рідини і газу. Спеціальне водопостачання). - Ч.: 2017.