

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з дисципліни
“Водопостачання та каналізація”
для студентів напряму підготовки
“Будівництво” всіх форм навчання**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з дисципліни
“Водопостачання та каналізація”
для студентів напряму підготовки
“Будівництво” всіх форм навчання**

Вінниця
ВНТУ
2010

Рекомендовано до друку Методичною радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 1 від 21.09.2010 р.)

Рецензенти:

В. О. Пішенін, кандидат технічних наук, доцент

О. В. Березюк, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Водопостачання та каналізація” для студентів напряму підготовки “Будівництво” всіх форм навчання. /Уклад. І. В. Коц, В. В. Джеджула, К. В. Бауман – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 52 с.

У методичних вказівках наведені лабораторні роботи з дисципліни «Водопостачання і каналізація», що читається для студентів напряму підготовки «Будівництво» всіх форм навчання. Кожна лабораторна робота містить мету; коротко викладені загальні відомості – теоретичний матеріал, який необхідно засвоїти перед виконанням роботи; опис обладнання, необхідного для виконання даної лабораторної роботи та хід роботи. Для самоконтролю в кінці лабораторних робіт наведені контрольні запитання.

Зміст

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. Визначення втрат напору по довжині. .	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. Визначення коефіцієнта фільтрації грунту.	9
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. Умови плавучості та остійності тіл в рідині	16
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. Послідовне та паралельне з'єднання трубопроводів	20
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5. Побудова характеристик трубопроводів.	26
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6. Вимірювання густини і коефіцієнтів поверхневого натягу.	31
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7.Визначення коефіцієнта витрати водоміра Вентурі.	35
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8.Дослідження витоку рідини через малі отвори в тонкій стінці та насадки при постійному напорі в атмосферу.	38
Література.	44
Додатки.	45

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 Визначення втрат напору по довжині

Мета роботи

1. Засвоїти основні поняття:
 - втрати напору по довжині;
 - формула Дарсі-Вейсбаха;
 - коефіцієнт гідравлічного тертя;
 - еквівалентна шорсткість;
 - порядок розрахунку втрат напору.
2. Визначити експериментальним шляхом величину втрат напору по довжині при заданих витратах.
3. Обчислити величину втрат напору по довжині за формулою Дарсі-Вейсбаха за тих же умов.
4. Порівняти експериментальні та розрахункові результати.

Загальні відомості

Рух рідини, як і рух будь-яких тіл, виникає під дією наданої їй енергії. У реальних умовах будь-який рух супроводжується появою сил, які чинять йому опір (сили тертя, сили опору середовища). Тому частина наданої тілу енергії витрачається на подолання цих сил. Енергія рухомої рідини вимірюється напором. Частина напору, що витрачається на подолання сил опору, називається втратою напору та позначається h . Втрата напору при русі рідини у трубопроводі відбувається внаслідок в'язкості рідини та шорсткості стінок. Відомо, що чим більша в'язкість рідини і шорсткість стінки, тим більші будуть втрати напору на подолання сил в'язкості та сил тертя. Цей вид втрат напору прямо пропорційний довжині трубопроводу та розподілений рівномірно по всій довжині. Тому ці втрати напору називають втратами напору по довжині. При розв'язуванні інженерних задач часто виникає необхідність розрахувати величину очікуваної втрати напору по довжині в проєктованому трубопроводі.

Втрати напору по довжині визначаються за так званою формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$h = \lambda \frac{l V^2}{d \cdot 2g}, \quad (1.1)$$

- де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі);
 l – довжина ділянки трубопроводу, на якій визначається втрата напору;
 d – внутрішній діаметр трубопроводу;
 V – середня швидкість потоку рідини у трубопроводі;

g – прискорення вільного падіння.

Як правило, у гідравлічних розрахунках для знаходження втрат напору по довжині всі величини, які входять до формули Дарсі-Вейсбаха (крім коефіцієнта гідравлічного тертя), відомі. Тому задача зводиться до знаходження його числового значення. В гідравліці відомі різні формули для знаходження коефіцієнта гідравлічного тертя.

При наявності ламінарної течії в круглих трубах коефіцієнт гідравлічного тертя визначається за формулою:

$$\lambda = 64/Re, \quad (1.2)$$

де Re – число Рейнольдса.

Для напірних шорстких технічних труб при турбулентному потоці порівняно точні результати дає формула Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\kappa_e}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (1.3)$$

де κ_e – еквівалентна шорсткість (див. додаток А).

Еквівалентна шорсткість характеризує середню висоту виступів шершавості внутрішньої поверхні трубопроводу, їх форму та розподіл по поверхні. Числове значення коефіцієнта залежить від матеріалу та стану труб і наводиться в довідниках.

Друга величина, яка входить до формули Альтшуля, характеризує режим течії та залежить від числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\vartheta}, \quad (1.4)$$

де ϑ – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, який залежить від роду рідини та її температури і надається у довідниках (див. додаток Б).

З двох складових у дужках у формулі Альтшуля (1.3) величина $\frac{\kappa_e}{d}$ є сталою для даного трубопроводу. Друга складова $\frac{68}{Re}$ залежить від швидкості: чим швидкість більша, тим складова менша та навпаки, тобто існує обернено пропорційна залежність. Якщо складові відрізняються на два порядки та більше, то меншою складовою можна знехтувати.

Отже, для розрахунку втрат напору по довжині за формулою Дарсі-Вейсбаха необхідно:

- а) визначити число Рейнольдса;

- б) визначити за довідником значення κ_e ;
- в) визначити коефіцієнт гідравлічного тертя λ .

Обладнання

Дослідне визначення втрат напору по довжині виконується на експериментальному обладнанні, схема якого наведена на рис. 1.1.

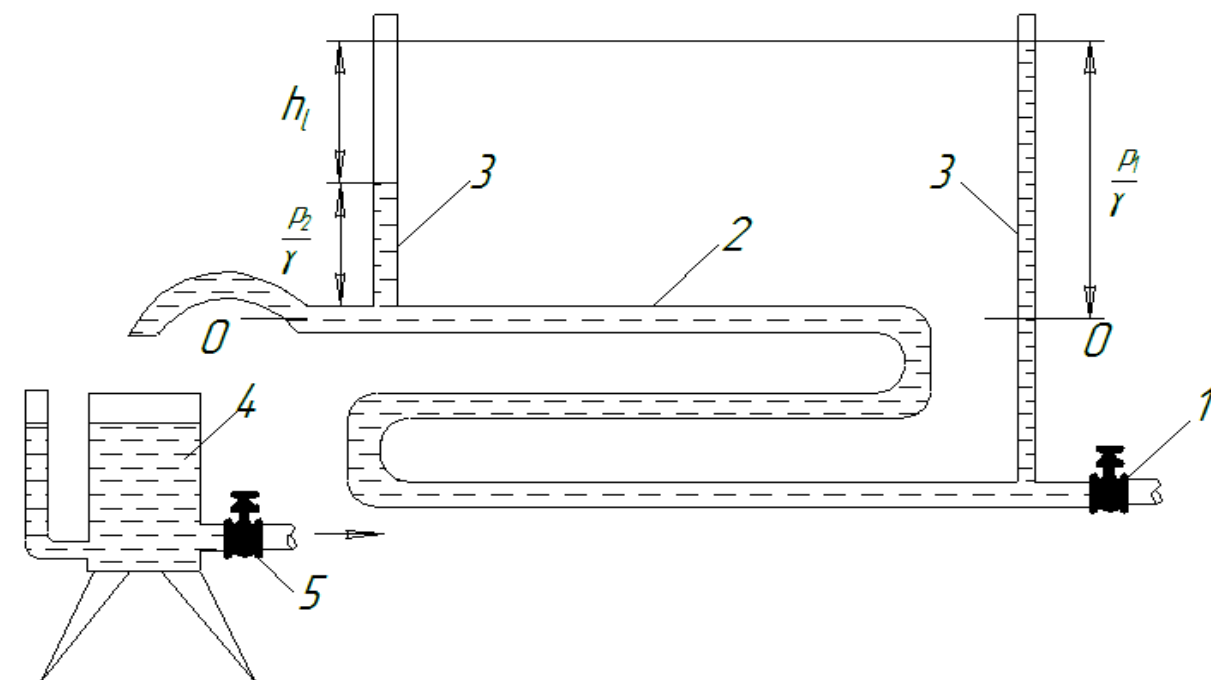


Рисунок 1.1 – Лабораторне обладнання для дослідного визначення коефіцієнта Шезі

Установка являє собою прямолінійну горизонтальну ділянку трубопроводу сталого діаметра 1, по якому подається рідина. Установка обладнана такими приладами: 2, 3 – п'єзометри, за якими визначається втрата напору по довжині трубопроводу, 4 – мірний бак з водомірним склом, за показами якого та за допомогою секундоміра визначається об'єм води W , яка надходить за час t у бак, а потім витрата води Q , 5 – регулюючий вентиль, за допомогою якого в трубопроводі встановлюються різні витрати, 6 – випускний вентиль.

Хід виконання роботи

1. При постійній витраті води в трубопроводі виміряти та занести до таблиці 1.1 такі дані (кількість дослідів задається викладачем):
 - покази п'єзометрів з точністю до 1 мм;
 - висоту підняття рівня води у мірному баці h_b ;
 - час t підняття рівня води на висоту h_b ;
 - сталі характеристики установки, які наведені на плакаті.

2. За виміряними даними обчислити такі параметри та занести до таблиці 1.1:

- площа поперечного перерізу трубопроводу $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$,

де d – діаметр трубопроводу;

- виміряні втрати напору по довжині $h = \frac{P_1}{\rho \cdot g} - \frac{P_2}{\rho \cdot g}$;

- об'єм води у мірному баці $W = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h_e$,

де D – діаметр бака;

h_e – висота підняття води у баці;

- витрату води в установці $Q = \frac{W}{t}$;

- середню швидкість потоку з точністю до 1 см/с $V = \frac{Q}{w}$;

- число Рейнольдса з точністю до 1000 за формулою (1.4);

- коефіцієнт гідравлічного тертя з точністю до 0,001 за формулою Альтшуля (1.3);

- втрати напору по довжині з точністю до 1 см за формулою (1.1);

- коефіцієнт розходження між виміряними та обчисленими втратами напору з точністю до 0,1%.

Таблиця 1.1 – Таблиця результатів

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Досліди	
			1	2
1	2	3	4	5
Діаметр труби	d	м		
Площа перерізу	ω	м ²		
Довжина ділянки	l	м		
Еквівалентна шорсткість	κ_e	мм		
Покази 1-го п'езометра	$p_1 / \rho g$	мм		
Покази 2-го п'езометра	$p_2 / \rho g$	мм		
Виміряні втрати напору	h	м		
Діаметр мірного бака	D	см		
Висота рівня води у баці	h_e	см		
Об'єм води у баці	W	см ³		

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
Час наповнення бака	t	с		
Витрата води	Q	м ³ /с		
Число Рейнольдса	Re	-		
Середня швидкість	V	м/с		
Коефіцієнт гідравлічного тертя	λ	-		
Обчислені втрати напору	h_p	м		
Коефіцієнт розходження	δ	%		

Контрольні запитання

1. Як у гідравліці називається енергія рухомого потоку рідини?
2. Що спричиняє виникнення втрат напору по довжині при русі рідини у трубопроводі?
3. Як розподіляються втрати напору по довжині трубопроводу та чому?
4. Записати формулу Дарсі-Вейсбаха для визначення втрат напору по довжині.
5. Записати формулу визначення числа Рейнольдса.
6. Записати формулу Альтшуля для розрахунку коефіцієнта λ .
7. Від чого залежить коефіцієнт гідравлічного тертя?
8. В яких одиницях вимірюється кінематична в'язкість рідини?
9. Чим характеризується еквівалентна шершавість?
10. Перерахуйте порядок визначення втрат напору по довжині.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту

Мета роботи

1. Засвоїти такі основні поняття:
 - що називається фільтрацією;
 - види фільтраційних потоків;
 - види ґрунтових вод;
 - закон Дарсі;
 - коефіцієнт фільтрації;
 - формула визначення витрати фільтраційного потоку.
2. Розрахувати коефіцієнт фільтрації дослідного ґрунту експериментальним шляхом та визначити тип ґрунту.

Загальні відомості

Рух ґрунтових вод є окремим випадком руху рідини у пористому середовищі, який називається фільтрацією. Ґрунтові води – важливе джерело водопостачання. Рівень ґрунтових вод впливає на остійність гідротехнічних споруд, тому для регулювання рівня і припливу ґрунтових вод улаштовують різні дренажні споруди.

Розрізняють природні та штучні фільтраційні потоки. Природний фільтраційний потік чи потік ґрунтових вод, утворюється внаслідок інфільтрації в ґрунт частини атмосферних опадів. Штучний фільтраційний потік утворюється при вирішенні деяких технічних задач, наприклад, при відкачуванні води з будівельних котлованів, при осушенні земляного полотна, при очищенні води на водопровідних фільтрах, при фільтруванні води через земляні греблі і т. ін.

Ґрунтові води підрозділяються на рухомі та нерухомі. Нерухомі ґрунтові води утворюються внаслідок скупчення води в підземних котлованах. Рухомі ґрунтові води чи потоки ґрунтових вод, утворюються внаслідок постійної інфільтрації атмосферних опадів при наявності осідання рельєфу підстилаючих та водоносних пластів.

Розрізняють напірні та безнапірні ґрунтові потоки. Ґрунтовий потік буде напірним, якщо водонепроникний шар знаходиться між двома водонепроникними шарами, та безнапірним, якщо водонепроникний шар підстилається лише водонепроникними породами.

Залежно від витрати фільтраційного потоку поверхня його може займати різне положення аналогічно положенню вільної поверхні у відкритих руслах.

Поверхню фільтраційного потоку називають депресійною поверхнею, а криву вільної поверхні – кривою депресії.

Як і у відкритих руслах, рух води у пористому середовищі може бути усталеним та неусталеним, рівномірним та нерівномірним. Безнапірний

рух ґрунтових вод є здебільшого нерівномірним, оскільки гідравлічний нахил частіше не дорівнює нахилу водотривкого шару. У цьому випадку рівномірний рух неможливий.

Фільтрація може бути ламінарною та турбулентною. Ламінарний рух, як і в трубах, характеризується втратами напору, що прямо пропорційний швидкості фільтрації у першому ступені. Такий рух відбувається у дрібнозернистих ґрунтах (піски, глина, суглинки і т. д.).

У крупнозернистих пісках і матеріалах (гравій, галька, щебінь, каміння) встановлюється турбулентна фільтрація, за якою втрати напору пропорційні швидкості у ступені вищому, ніж перший.

При фільтрації вода проходить через пори між частинками ґрунту. Позначимо площу пор у перерізі фільтраційного потоку ω_{π} , а всю площу перерізу – ω . Відношення площі пор до всієї площі перерізу називають коефіцієнтом поверхневої пористості ґрунту:

$$p = \omega_{\pi} / \omega. \quad (2.1)$$

Для однорідного ґрунту коефіцієнт поверхневої пористості практично дорівнює коефіцієнту об'ємної пористості, що є відношенням об'єму пор ґрунту до всього об'єму, який займає ґрунт. З урахуванням цього далі величину p називатимемо коефіцієнтом пористості. Коефіцієнт пористості, як правило, буває в межах $p = 0,3 \dots 0,5$. Швидкість руху води в порах ґрунту:

$$V_{\pi} = Q / \omega_{\pi}. \quad (2.2)$$

У практичних розрахунках зручніше мати справу з умовною швидкістю, яку називають швидкістю фільтрації. Вона дорівнює витраті до всієї площі фільтраційного потоку:

$$V = Q / \omega. \quad (2.3)$$

Порівнявши залежності (2.2) і (2.3), з урахуванням (2.1) отримаємо:

$$V = p \cdot V_{\pi}. \quad (2.4)$$

Оскільки $p < 1$, то швидкість фільтрації завжди менша від швидкості руху води в порах ґрунту.

Закон фільтрації був встановлений Дарсі у 1856р. на основі результатів проведених ним експериментів з пісчаним ґрунтом при зміні п'єзометричних нахилів від 1,5 до 18. Пізніше цей закон отримав і теоретичне підтвердження. Закон Дарсі може бути поданий формулою:

$$v = k_{\phi} \cdot J, \quad (2.5)$$

де v – швидкість фільтрації;
 k_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації, що характеризує фільтраційну здатність ґрунту, зазвичай визначають дослідним шляхом, залежить від виду ґрунту та температури води;
 J – гідравлічний градієнт ґрунтового потоку (п'єзометричний нахил).

Із залежності (2.5) видно, що коефіцієнт фільтрації являє собою швидкість фільтрації при одиничному нахилі.

Витрата фільтраційного потоку може бути подана такою залежністю:

$$Q = k_{\phi} \cdot \omega \cdot J. \quad (2.6)$$

Формули Дарсі – це основний закон ламінарної фільтрації. Границі застосування рівняння Дарсі недостатньо вивчені. В літературі наведені різні рекомендації щодо критерію переходу від ламінарної фільтрації до турбулентної. Одним із таких критеріїв є те, що при

$$Re = \frac{V \cdot d}{\varrho} < 1 \dots 7 \quad (2.7)$$

встановлюється ламінарна фільтрація, а при $Re > 1 \dots 7$ – турбулентна (d – середній діаметр частинок ґрунту).

М. М. Павловський запропонував критерії існування ламінарної фільтрації у вигляді:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\varrho(0,75p + 0,23)} < 7 \dots 9. \quad (2.8)$$

За іншими рекомендаціями для однорідного пористого середовища із зернами у вигляді куль діаметром d ламінарна фільтрація відбувається при

$$Re = \frac{V \cdot d}{\varrho \cdot p^{1/3}} < 5. \quad (2.9)$$

Розглядаючи залежність (2.7) – (2.9) з урахуванням того, що коефіцієнт пористості $p = 0,3 \dots 0,5$, кінематична в'язкість води $\varrho \approx 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$ (при $t = 20^\circ\text{C}$), а розміри частинок дрібнозернистих ґрунтів, як правило, 1...2 мм та менше, можна встановити, що при ламінарній фільтрації швидкості фільтрації дуже незначні і на практиці, як правило, становлять кілька міліметрів за секунду і менше. У зв'язку з цим у фільтраційних розрахунках нехтують значеннями швидкісного напору $\alpha \cdot V^2 / 2g$ і вважають, що повний напір дорівнює п'єзометричному напору ($H_0 = H$), а гідравлічний уклон – п'єзометричному уклону ($J_r = J$).

Існують такі методи визначення коефіцієнта фільтрації: польовий, лабораторний, метод використання емпіричних формул.

Польовий метод звичайно використовують геологи і гідрологи під час дослідних робіт. Сутність його полягає в штучному утворенні кривої депресії шляхом відкачування води із спеціального колодязя або накачування води в цей колодязь, вимірюванні параметрів цієї кривої та визначенні значення коефіцієнта фільтрації за спеціальними формулами. При цьому ґрунт перебуває у природному стані і визначення коефіцієнта фільтрації є достатньо точний.

Обладнання

Лабораторний метод передбачає визначення коефіцієнта фільтрації за допомогою пристрою Дарсі (рис.2.1).

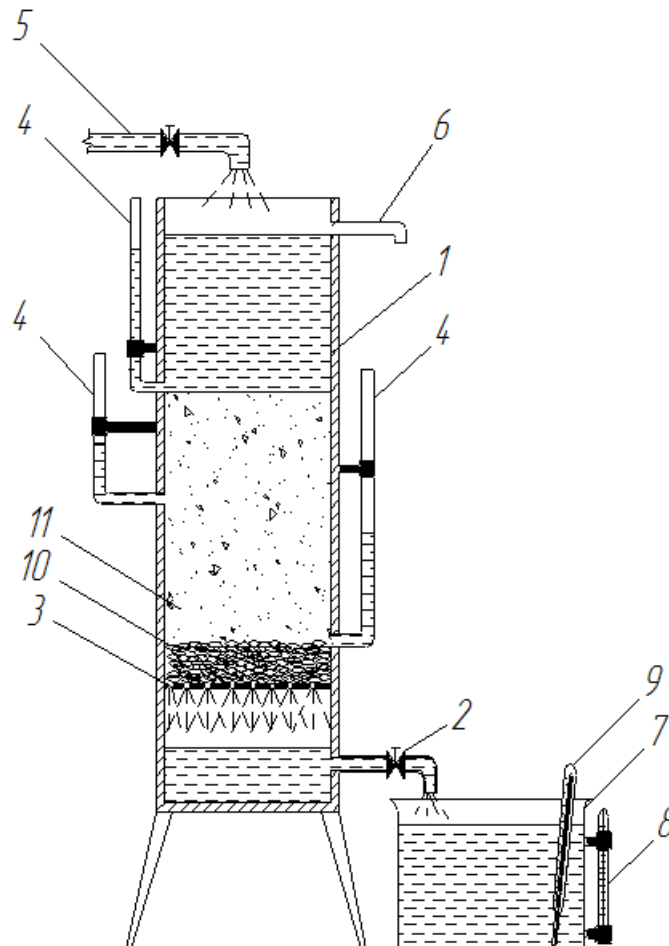


Рисунок 2.1 – Лабораторне обладнання для дослідного визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту: 1 – корпус пристрою; 2 – регулювальний вентиль; 3 – сітка; 4 – п'єзометр; 5 – напірний водопровід; 6 – зливна трубка; 7 – мірна ємність; 8 – мірна шкала; 9 – термометр; 10 – підтримуючий шар із гравію; 11 – досліджуваний ґрунт.

Пристроєм є циліндр із дірчастим дном і виведеними з його бокової поверхні п'езометрами. Циліндр заповнюють ґрунтом, витягнутим із шурфу з додержанням умов зберігання його структури. Усталений рух води через пристрій забезпечують підтриманням постійної відмітки поверхні води в пристрої завдяки відведенню надлишку води у зливну трубку.

Хід виконання роботи

1. Записати до таблиці 2.1 сталі характеристики установки: діаметр установки, відстані між I, II та II, III п'езометрами.

2. При сталій витраті зняти покази п'езометрів. Витрату фільтраційного потоку вимірюють об'ємним методом після проходження води через пристрій.

3. За вимірними даними обчислити такі параметри та занести до таблиці 2.1:

- втрати напору визначають як різницю показів п'езометрів;

- коефіцієнт фільтрації визначають за формулою: $k_{\phi} = \frac{Q}{\omega \cdot J}$,

де $\omega = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ – площа перерізу циліндра (D – його діаметр);

J – гідравлічний уклон, що визначається за формулою $J = \frac{h}{l}$.

4. Отриманий коефіцієнт фільтрації порівняти з довідниковими даними (додаток В) та зробити висновки.

Таблиця 2.1 – Таблиця результатів

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Досліди	
			1	2
1	2	3	4	5
Покази I п'езометра	$\frac{P_1}{\gamma}$	см		
Покази II п'езометра	$\frac{P_2}{\gamma}$	см		
Покази III п'езометра	$\frac{P_3}{\gamma}$	см		
Об'єм мірної ємності	W	см ³		

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5
Час наповнення мірної ємності	t	с		
Витрата води	Q	см ³ /с		
Діаметр корпусу приладу	D	см		
Площа поперечного перерізу корпусу приладу	ω	см ²		
Втрата напору в першому шарі ґрунту	h_1	см		
Втрата напору в другому шарі ґрунту	h_2	см		
Відстань між I та II п'єзометром	l_{1-2}	см		
Відстань між II та III п'єзометром	l_{2-3}	см		
Гідравлічний уклон в першому шарі ґрунту	J_1	-		
Гідравлічний уклон в другому шарі ґрунту	J_2	-		
Коефіцієнт фільтрації в першому шарі ґрунту	$k_{\phi 1}$	см/с		
Коефіцієнт фільтрації в другому шарі ґрунту	$k_{\phi 2}$	см/с		
Коефіцієнт фільтрації досліджуваного ґрунту	k_{ϕ}	см/с		

Контрольні запитання

1. Що називається фільтрацією?
2. Які бувають види фільтраційних потоків?
3. Штучний фільтраційний потік це
4. Які бувають ґрунтові води?
5. Нерухомі ґрунтові води це
6. Напірні ґрунтові води це
7. Безнапірні ґрунтові води це ...
8. Закон фільтрації.
9. Коефіцієнт фільтрації це ...
10. Формула розрахунку витрати фільтраційного потоку.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Умови плавучості та остійності тіл в рідині

Мета роботи

1. Засвоїти такі основні поняття:

- закон Архімеда;
- остійність;
- осадка;
- водотоннажність;
- метацентричний радіус;
- ватерлінія.

2. Визначити теоретично і перевірити практично дослідним шляхом умови плавучості різних тіл: водотоннажність, осадку, остійність.

Загальні відомості

Плавучістю називають здатність тіла плавати при певній вазі G .

На тіло, що занурене повністю або частково в рідину, діє дві сили: сила ваги тіла G , яка спрямована вниз і прикладена у центр ваги тіла та вертикально спрямована вгору сила P_a , яка дорівнює вазі рідини витісненої об'ємом зануреної частини тіла. Ця сила, що називається Архімедовою, направлена вгору і прикладена в центрі ваги маси рідини в об'ємі зануреної частини тіла. Вагу рідини, яку витісняє тіло називають водотоннажністю W , а центр ваги маси рідини в об'ємі зануреної частини тіла – центром водотоннажності (точка D) (рис. 3.1).

В залежності від взаємодії цих сил можливі три випадки: 1) $G > P_a$ – тіло тоне; 2) $G < P_a$ – тіло спливає до тих пір, доки сила тяжіння витісненої рідини, тобто P_a , не буде дорівнювати силі тяжіння тіла G ; 3) $G = P_a$ – тіло плаває у зануреному стані на будь-якій глибині.

Для рівноваги плаваючого тіла окрім рівності сил G та P_a необхідна ще рівність нулю сумарного моменту. Для виконання останньої умови центр ваги тіла та центр водотоннажності повинні знаходитись на одній вертикалі.

При впливі на плаваюче тіло зовнішніх сил, наприклад вітру, крутого повороту та інше, воно буде відхилятися від положення рівноваги (давати крен) (рис. 3.1 (а)). Остійність – здатність тіла повертатися в початковий стан рівноваги при невеликих відхиленнях від заданого положення після припинення дії сил, які зумовлюють крен.

Розглянемо умови остійності. При крені тіла його центр ваги не змінить свого положення, а центр водотоннажності (точка D) переміститься в положення точки D' (рис. 3.1 (а)).

Лінія дії виштовхувальної сили P , що проходить крізь точку D' , перетинає вісь плавання в точці M , яку називають метацентром. Відстань

між метацентром і центром водотоннажності (точка D) називають метацентричним радіусом ρ .

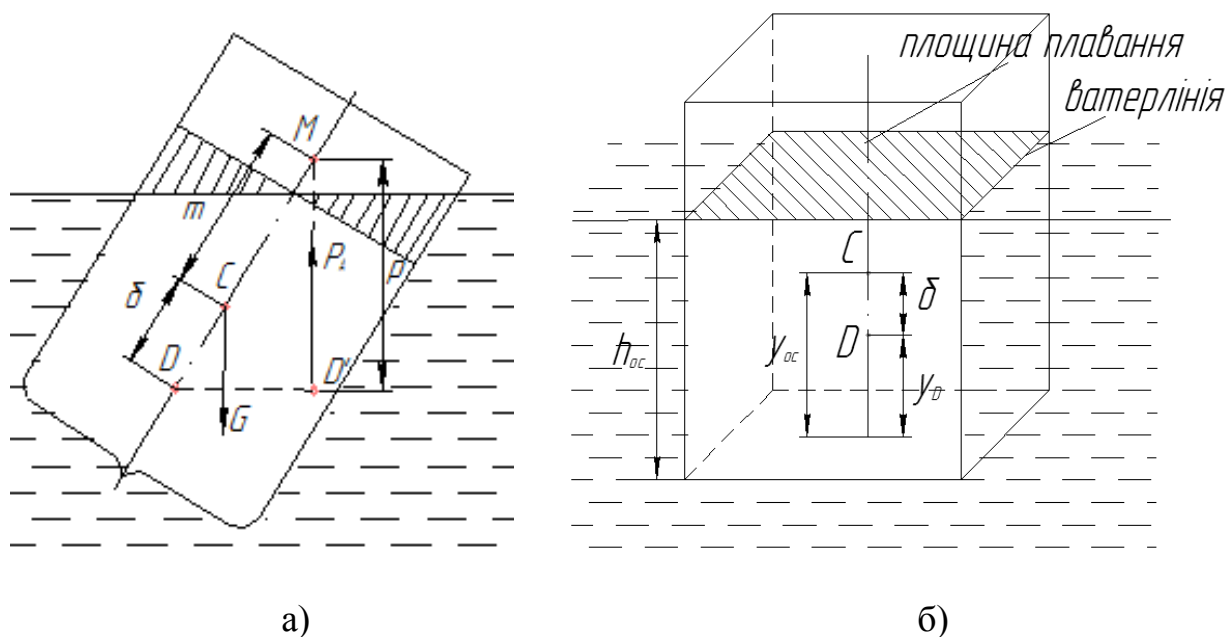


Рисунок 3.1 – Остійне плавання зразка

Якщо метацентр M розміщений вище центра ваги C , то плавання тіла на вільній поверхні рідини буде остійним, у іншому випадку плавання буде неостійним.

Відстань між центром ваги (точка C) та центром водотоннажності (точка D) називається ексцентриситетом δ .

При остійному плаванні метацентричний радіус $\rho > \delta$, а при неостійному – $\rho < \delta$.

Різницю між цими величинами називають метацентричною висотою m : $m = \rho - \delta$.

На практиці для покращення остійності часто штучно знижують положення центра ваги. Так, в яхтах використовують важкий кіль, а весь важкий вантаж на судах розміщують в трюмах та на нижніх палубах.

Площину, обмежену ватерлінією – лінією перетину поверхні рідини з плаваючим тілом, називають площиною ватерлінії або площиною плавання.

Осадка – глибина h_{oc} – занурення найнижчої точки плаваючого тіла під рівень води.

Обладнання

Для проведення роботи необхідно мати декілька зразків тіл, що мають просту геометричну форму (куб, паралелепіпед, циліндр) із різною питомою вагою, меншою, ніж питома вага рідини, терези для зважування зразків та резервуар з рідиною.

Хід виконання роботи

1. Отримавши у викладача досліджувані зразки, виміряти та записати до таблиці 3.1: матеріал, з якого виготовлений зразок, його розміри, вагу.

2. Розраховуємо об'єм водотоннажності.

Вага витісненої води повинна бути рівною вазі кубика, тобто $W \cdot \gamma_{\epsilon} = G$, де γ_{ϵ} – питома вага рідини. Звідси отримаємо об'єм водотоннажності $W = \frac{G}{\gamma_{\epsilon}}$.

3. Уявімо у якому положенні буде плавати зразок та теоретично розрахуємо величину осадки зразка у рідині $W = h_{oc} \cdot \omega$ звідси $h_{oc} = \frac{W}{\omega}$, де ω – площа сторони зразка, що занурена у рідину.

4. Відстань до центра ваги розраховується в залежності від форми зразків (додаток Г). Для кубика: $y_c = \frac{a}{2}$.

5. Відстань до центра водотоннажності: $y_o = \frac{h_{oc}}{2}$.

6. За отриманими відстанями розраховуємо відстань від центра ваги до центра водотоннажності: $\delta = y_c - y_o$.

7. Момент інерції визначається в залежності від площини плавання зразка (додаток Г). Наприклад, площиною плавання кубика при плаванні його у вертикальному положенні буде квадрат, момент інерції якого відносно осі плавання (повздовжньої або поперечної) буде $I = \frac{a^4}{12}$.

8. Метацентричний радіус визначається за формулою: $\rho = \frac{I_x}{W}$.

9. Метацентрична висота: $m = \rho - \delta$.

10. Перевіряємо умову остійності зразка за результатами розрахунків. Якщо $\rho > \delta$, тобто $m > 0$, то кубик остійний і повинен плавати у вертикальному положенні.

11. Опустимо кубик у воду і перевіримо його остійність експериментально. Накренимо кубик і подивимось, чи повернувся він у вертикальне положення. Виміряємо його осадку. Порівняємо дослідні дані з даними, що отримані теоретично.

12. Всі розрахунки звести в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Таблиця результатів

Показники	Позначення	Одиниці вимірювання	Зразки		
			1	2	3
1	2	3	4	5	6
Матеріал зразка		-			
Розміри зразка:					
– довжина	l	см			
– ширина	b	см			
– висота	h	см			
Вага зразка	G	Н			
Питома вага рідини	γ_v	Н/м ³			
Об'єм водотоннажності	W	м ³			
Осадка	h_{oc}	см			
Відстань до центра тяжіння	y_c	см			
Відстань до центра водотоннажності	y_o	см			
Відстань між центром ваги та центром водотоннажності	δ	см			
Момент інерції площини плавання	I_x	см ⁴			
Метацентричний радіус	ρ	см			
Метацентрична висота	t	см			
Умови остійності:					
– за даними розрахунків		-			
– із досліду		-			

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Архімеда.
2. Що називається площиною плавання?
3. Що називається водотоннажністю?
4. Що таке метацентричний радіус?
5. Що називається остійністю?
6. Що називається осадкою?
7. При яких умовах тіло буде остійним?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Послідовне та паралельне з'єднання трубопроводів

Мета роботи

1. Засвоїти такі основні поняття:
 - класифікація трубопроводів;
 - прості та складні трубопроводи;
 - паралельне та послідовне з'єднання трубопроводів;
 - питомий опір трубопроводів.
2. Визначити витрати води та втрати напору в паралельно з'єднаних трубопроводах.

Загальні відомості

За призначенням трубопроводи прийнято розрізняти за видом транспортованої по них продукції: газопроводи, нафтопроводи, водопроводи, повітропроводи, продуктопроводи та інші.

За видом руху по них рідини трубопроводи можна поділити на дві категорії: напірні та безнапірні (самотічні) трубопроводи.

Водопровідні, нафтові, газові, парові та інші мережі можна поділити на магістральні трубопроводи, що подають рідину від джерела до споживача на великі відстані, та розгалужені мережі труб, що забезпечують розподілення рідини безпосередньо споживачам.

Трубопроводи, що складаються з однієї лінії труб та пропускають одну й ту саму витрату рідини, називаються простими, а трубопроводи, що складаються з основної магістральної труби та ряду з'єднань та розгалужень, називаються складними.

Складні трубопроводи у свою чергу поділяються на такі основні види: з послідовним та паралельним з'єднанням, тупикові, з шляховою витратою та кільцеві.

Трубопровід, що складається з труб різного діаметра, що встановлені в одну лінію одна за одною є складним трубопроводом із послідовним з'єднанням ділянок трубопроводу (рис.4.1).

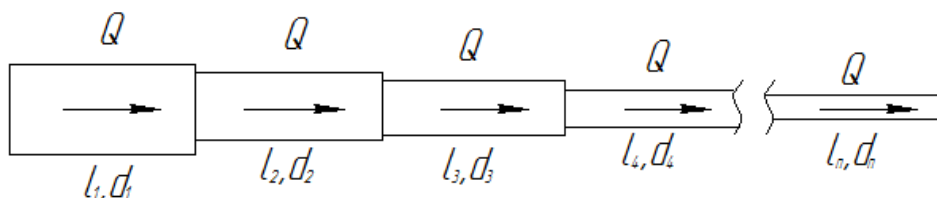


Рисунок 4.1 – Складний трубопровід із послідовним з'єднанням трубопроводів

При поданні рідини по такому трубопроводу витрата в усіх послідовно з'єднаних трубах одна й та сама, а повні втрати напору для

всього трубопроводу дорівнюють сумі втрат напору в усіх послідовно з'єднаних трубах:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n = Q; \quad (4.1)$$

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + \dots + H_n, \quad (4.2)$$

де $H_1, H_2, H_3, \dots, H_n$ – втрати напору на 1, 2, 3, ..., n-ій ділянці.

Отже, втрати напору можна визначити за формулою

$$H = Q^2 (A_1 l_1 + A_2 l_2 + A_3 l_3 + \dots + A_n l_n), \quad (4.3)$$

де l – довжина ділянки;

A – питомий опір трубопроводу.

$$A = \frac{16\lambda}{2g\pi^2 d^5}, \quad (4.4)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя;

d – діаметр трубопроводу.

Для ділянки квадратичного закону опору, де коефіцієнт λ не залежить від числа Re , питомий опір трубопроводу залежить лише від шорсткості стінок труби та її діаметра, тому для даної шорсткості стінок труби та для кожного діаметра d , передбаченого стандартом, складені таблиці значень A , що наведені в гідравлічних довідниках.

В додатку Е наведені значення питомого опору сталевих трубопроводів, що були в експлуатації, при швидкості потоку рідини $v \geq 1,2$ м/с.

Для перехідної зони (при швидкості руху води в трубі $v < 1,2$ м/с) питомий опір трубопроводу A_0 визначається за формулою

$$A_0 = AK_n, \quad (4.5)$$

де K_n – поправковий коефіцієнт, що враховує залежність коефіцієнта гідравлічного тертя λ від числа Рейнольдса (додаток Е).

При паралельному з'єднанні ділянок трубопроводу рідина, що проходить з певною витратою до точки їх розгалуження т. А, буде розподілятися по відгалуженням та далі знову зливатися в точці їх об'єднання т. В (рис. 4.2).

Втрати напору на кожній ділянці трубопроводу однакові, оскільки їх кінці з'єднуються в одних і тих же точках А та В, в яких можливий лише

один напір; окрім того, сума витрат окремих ділянок дорівнює загальній магістральній витраті:

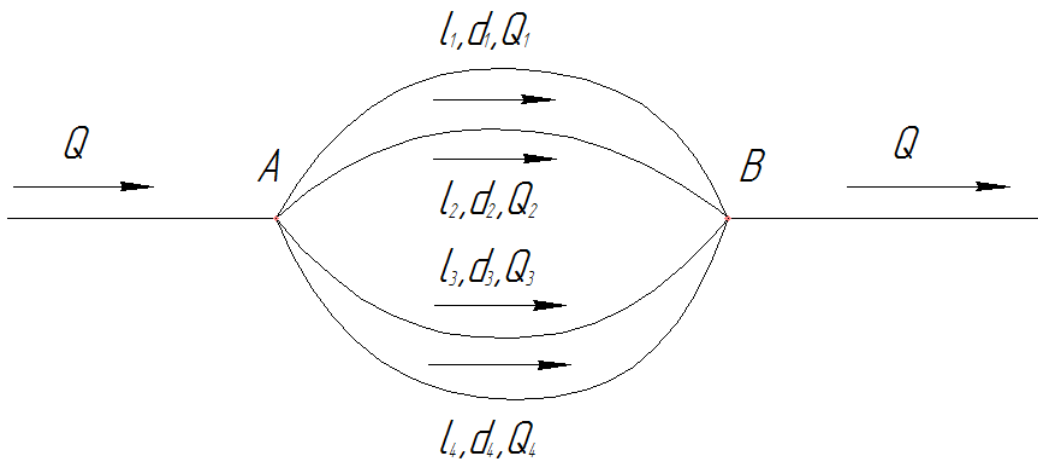


Рисунок 4.2 – Складний трубопровід із паралельним з'єднанням трубопроводів

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n; \quad (4.6)$$

$$H_1 = H_2 = H_3 = \dots = H_n. \quad (4.7)$$

Отже, втрати напору на кожній ділянці трубопроводу:

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= A_1 l_1 Q_1^2 \\ H_2 &= A_2 l_2 Q_2^2 \\ H_3 &= A_3 l_3 Q_3^2 \\ \dots &\dots \\ H_n &= A_n l_n Q_n^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь та враховуючи рівність (4.7), можна виразити всі витрати через один з них (наприклад, через витрату Q_1), тобто:

$$\left. \begin{aligned} Q_2 &= Q_1 \sqrt{\frac{A_1 l_1}{A_2 l_2}} \\ Q_3 &= Q_1 \sqrt{\frac{A_1 l_1}{A_3 l_3}} \\ \dots &\dots \\ Q_n &= Q_1 \sqrt{\frac{A_1 l_1}{A_n l_n}} \end{aligned} \right\}.$$

Підставляючи ці значення витрати в рівняння (4.6), отримуємо:

$$Q = Q_1 \sqrt{\frac{A_1 l_1}{A_2 l_2}} + Q_1 \sqrt{\frac{A_1 l_1}{A_3 l_3}} + \dots + Q_1 \sqrt{\frac{A_1 l_1}{A_n l_n}}. \quad (4.8)$$

Звідки знаходимо витрату, що протікає через першу гілку:

$$Q_1 = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{A_1 l_1}{A_2 l_2}} + \sqrt{\frac{A_1 l_1}{A_3 l_3}} + \dots + \sqrt{\frac{A_1 l_1}{A_n l_n}}}. \quad (4.9)$$

Обладнання

Лабораторна установка для дослідження паралельного з'єднання трубопроводів складається з вентиля регулювального 1, через який подається вода у трубопровід 2. 4, 5 – паралельно встановлені ділянки трубопроводу (рис.4.3). Для визначення витрат через ділянки трубопроводів встановлені лічильники 3, 6 та 7. Також для визначення загальної магістральної витрати встановлений мірний бак 8, рівнемір 9 та кран зливний 10.

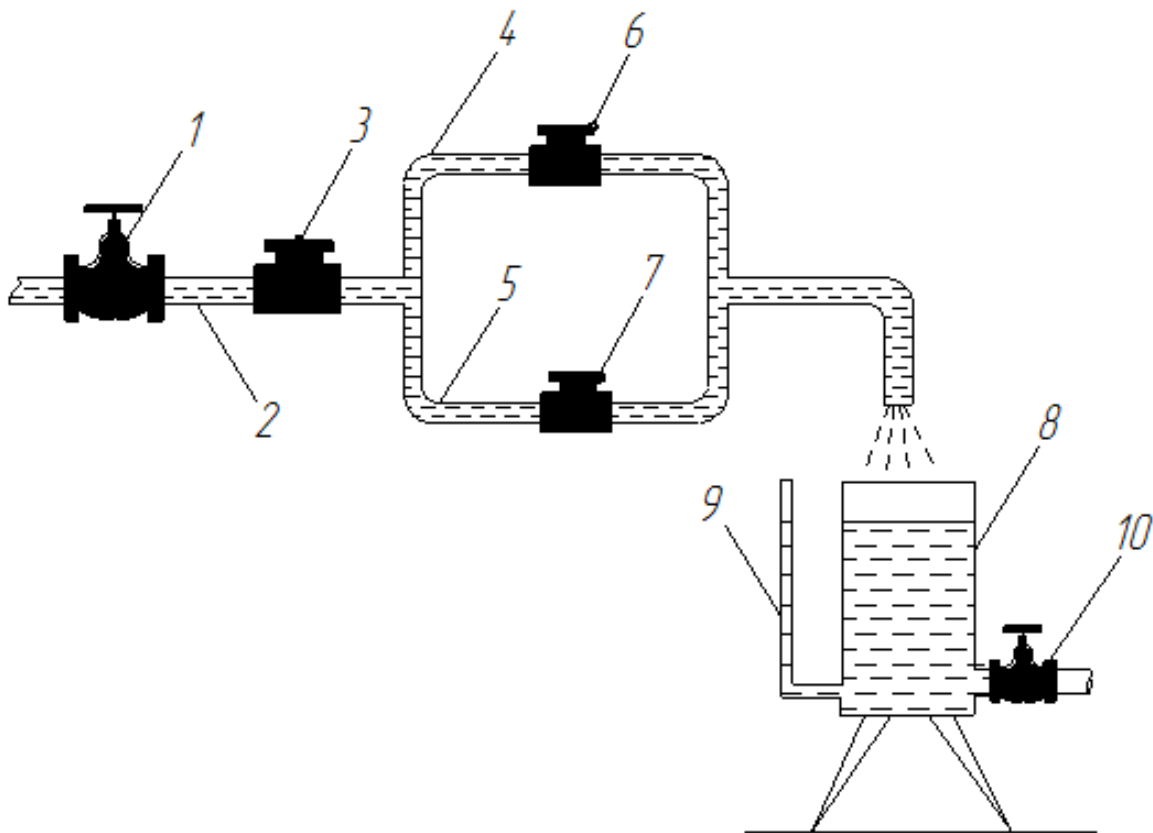


Рисунок 4.3 – Лабораторне обладнання для дослідження паралельного з'єднання трубопроводів

Хід виконання роботи

1. Занести до таблиці 4.1 сталі характеристики установки, які наведені на плакаті (діаметри I, II, III ділянки трубопроводу, мірного баку; довжини I, II, III ділянки трубопроводу).

2. Відкрити регулювальний вентиль 1 та за допомогою мірного бака, рівнеміра та секундоміра визначити загальну магістральну витрату Q .

3. За додатками Д та Е підібрати питомі опори трубопроводів.

4. За формулою (4.9) розрахувати витрату води в II ділянці трубопроводу.

5. За формулою (4.6) розрахувати витрату води в III ділянці трубопроводу.

6. При відомих витратах та площах поперечного перерізу розрахувати втрати напору в трубопроводах.

7. Виміряні та розраховані данні занести до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Таблиця результатів

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Досліди	
			1	2
1	2	3	4	5
Діаметр I ділянки трубопроводу	d	м		
Діаметр II ділянки трубопроводу	d_1	м		
Діаметр III ділянки трубопроводу	d_2	м		
Діаметр мірного бака	D	м		
Довжина I ділянки трубопроводу	l	м		
Довжина II ділянки трубопроводу	l_1	м		
Довжина III ділянки трубопроводу	l_2	м		
Висота рівня води у баці	$h_в$	м		
Об'єм води у баці	W	м ³		
Час наповнення бака	t	с		
Загальна магістральна витрата води	Q	м ³ /с		
Питомий опір II ділянки трубопроводу	A_1	с ² /м ⁶		
Питомий опір III ділянки трубопроводу	A_2	с ² /м ⁶		
Витрата води в II ділянці трубопроводу	Q_1	м ³ /с		

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
Витрата води в III ділянці трубопроводу	Q_2	м ³ /с		
Швидкість руху рідини в II трубопроводі	v_1	м/с		
Швидкість руху рідини в III трубопроводі	v_2	м/с		
Втрати напору на II ділянці трубопроводу	H_1	м		
Втрати напору на III ділянці трубопроводу	H_2	м		

Контрольні запитання

1. Класифікація трубопроводів.
2. За видом руху рідини трубопроводи поділяють на....
3. В якому випадку трубопровід буде складним, а в якому простим?
4. Види складних трубопроводів.
5. Чому дорівнюють втрати напору в складному трубопроводі?
6. Що таке питомий опір трубопроводу?
7. Розмірність питомого опору.
8. Чи залежить питомий опір від швидкості руху рідини?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Побудова характеристик трубопроводів

Мета роботи

1. Засвоїти такі основні поняття:
 - характеристика трубопроводів;
 - принцип побудови характеристик для простих трубопроводів;
 - принцип побудови характеристик для складних трубопроводів;
2. Побудувати характеристику для складного трубопроводу.

Загальні відомості

При гідравлічному розрахунку простих та складних трубопроводів широко використовують графічні методи, які значно полегшують та спрощують розв'язування деяких складних задач. Ці методи основані на побудові характеристик трубопроводів. Характеристикою трубопроводу називають графік залежності сумарних втрат напору в трубопроводі від витрати.

Для довгого простого трубопроводу втрати напору дорівнюють існуючому напору H , який для квадратичної області опору визначається за формулою:

$$H = AlQ^2 = SQ^2, \quad (5.1)$$

де l – довжина ділянки; A – питомий опір трубопроводу; Q – витрата рідини; S – опір трубопроводу.

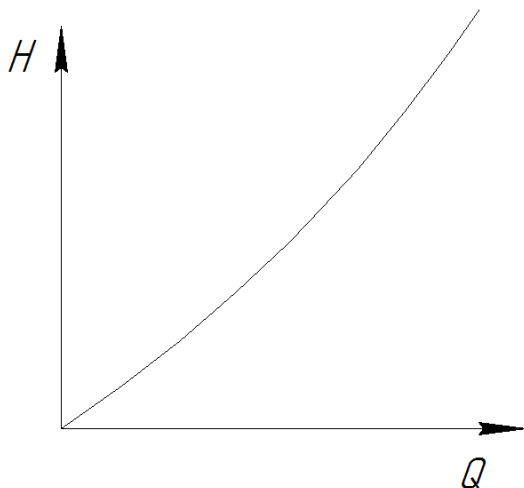


Рис.5.1 – Характеристика трубопроводу

Таким чином, існуючий напір для даного трубопроводу є функцією лише витрати рідини. Задаючись рядом значень Q та розраховуючи відповідні їм значення напору H , залежність (5.1) можна зобразити графічно (рис. 5.1). Отримана крива є характеристикою трубопроводу.

У випадку послідовного з'єднання ділянок трубопроводу спочатку будують характеристики окремих ділянок, наприклад, 1 та 2 (рис. 5.2). Для того аби побудувати характеристику всього трубопроводу,

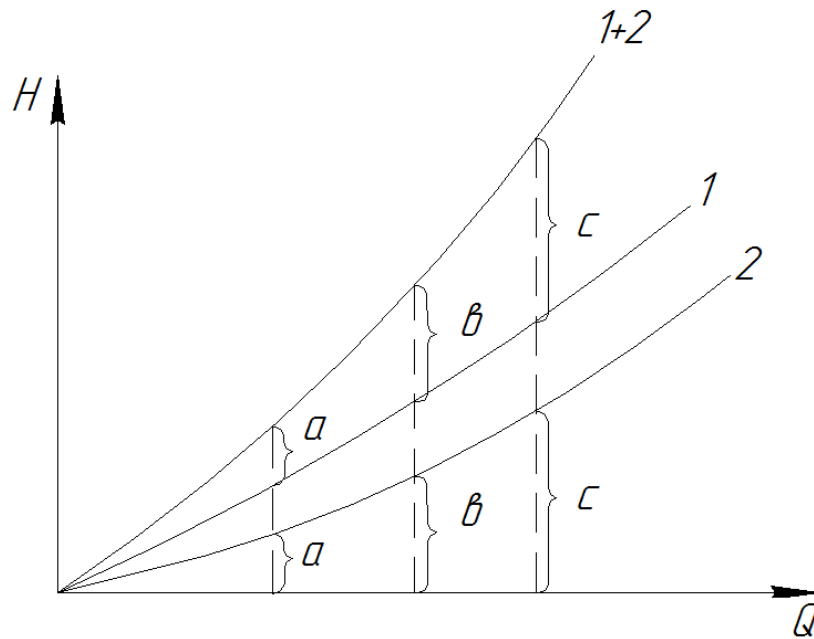


Рис. 5.2 – Побудова характеристики трубопроводу із послідовним з'єднанням ділянок

необхідно відповідно до виразу (4.7) скласти втрати напору при однакових витратах, тобто скласти ординати кривих 1 та 2 при рівних абсцисах.

При паралельному з'єднанні також перш за все слід побудувати характеристики окремих паралельних ділянок. Нехай криві 1 та 2 (рис. 5.3) є такі характеристики двох паралельних ділянок. Оскільки при паралельному з'єднанні загальна витрата визначається як сума витрат в окремих ділянках, а втрати напору в цих ділянках однакові, то для побудови характеристики всього трубопроводу необхідно скласти абсциси характеристик паралельно з'єднаних ділянок при однакових ординатах.

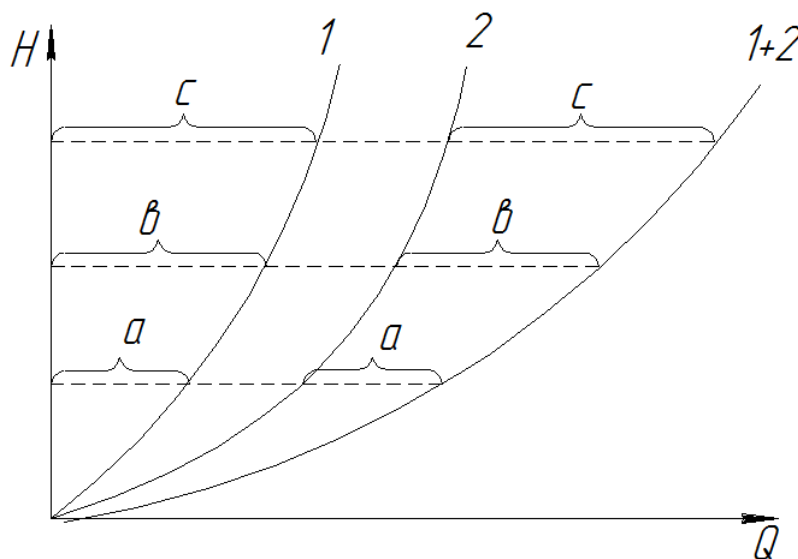


Рис. 5.3 – Побудова характеристики трубопроводу із паралельним з'єднанням ділянок

В загальному випадку, коли трубопровід складається із ряду ділянок, що з'єднані між собою як послідовно, так і паралельно, сумарна характеристика всього трубопроводу знаходиться послідовним додаванням попередньо побудованих характеристик всіх окремих ділянок. При цьому спочатку по горизонталі додаються характеристики паралельних ділянок, а потім вже їх сумарні характеристики додаються по вертикалі для врахування послідовно з'єднаних груп паралельних ділянок.

Викладений метод побудови характеристик справедливий також і для ламінарного режиму. Однак при ламінарному режимі між втратами напору та витратою існує лінійна залежність

$$H = SQ. \quad (5.2)$$

Тому характеристика трубопроводу у цьому випадку являє собою пряму лінію.

Обладнання

Для виконання лабораторної роботи студентам на вибір викладач пропонує установки, що мають складне з'єднання трубопроводів: лабораторне обладнання для дослідження паралельного з'єднання трубопроводів, обладнання для визначення коефіцієнтів місцевих опорів або дослідження рівняння Бернуллі. До складу лабораторних установок входять мірні ємності, що призначені для визначення витрат рідини.

Хід виконання роботи

1. Занести до таблиці 5.1 постійні характеристики установки (діаметри та довжини ділянок трубопроводу, діаметр мірного баку).
2. Відкрити регулювальний вентиль та за допомогою мірного бака, рівнеміра та секундоміра визначити загальну магістральну витрату Q .
3. За додатками Д та Е підібрати питомі опори трубопроводів.
4. За формулою (5.1) розрахувати втрати напору на ділянках трубопроводу.
5. За формулою Вейсбаха визначити втрати напору на місцевих опорах:

$$h = \xi \frac{V^2}{2g},$$

де ξ – коефіцієнт місцевого опору;

V – середня швидкість потоку рідини після місцевого опору.

6. Загальні втрати напору: $H = h_f + h_m$.

7. Оскільки для побудови графіка необхідно щонайменше 3 точки, вимірювання необхідно повторити ще двічі при різному ступені відкриття регулювального вентиля.

8. Виміряні та розраховані данні занести до таблиці 5.1.

9. За отриманими витратою та втратою напору побудувати характеристики для кожної з ділянок складного трубопроводу.

10. Враховуючи тип з'єднання трубопроводів побудувати загальну характеристику складного трубопроводу.

Таблиця 5.1 – Таблиця результатів

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Досліди		
			1	2	3
Діаметр I ділянки трубопроводу	d	м			
Діаметр II ділянки трубопроводу	d_1	м			
Діаметр III ділянки трубопроводу	d_2	м			
Діаметр мірного бака	D	м			
Довжина I ділянки трубопроводу	l	м			
Довжина II ділянки трубопроводу	l_1	м			
Довжина III ділянки трубопроводу	l_2	м			
Висота рівня води у баці	$h_в$	м			
Об'єм води у баці	W	м ³			
Час наповнення бака	t	с			
Загальна магістральна витрата води	Q	м ³ /с			
Питомий опір I ділянки трубопроводу	A_1	с ² /м ⁶			
Питомий опір II ділянки трубопроводу	A_2	с ² /м ⁶			
Питомий опір III ділянки трубопроводу	A_3	с ² /м ⁶			
Втрати напору по довжині на I ділянці трубопроводу	h_{l1}	м			
Втрати напору по довжині на II ділянці трубопроводу	h_{l2}	м			
Втрати напору по довжині на III ділянці трубопроводу	h_{l3}	м			
Втрати напору на місцевих опорах на I ділянці	$h_{м1}$	м			
Втрати напору на місцевих опорах на II ділянці	$h_{м2}$	м			

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5	
Втрати напору на місцевих опорах на III ділянці	h_{m3}	м			
Загальні втрати напору на I ділянці	H_1	м			
Загальні втрати напору на II ділянці	H_2	м			
Загальні втрати напору на III ділянці	H_3	м			

Контрольні запитання

1. Що називається характеристикою трубопроводу?
2. Чому дорівнюють втрати напору в довгому простому трубопроводі?
3. Як будується характеристика трубопроводу, що складається із паралельно з'єднаних ділянок?
4. Як будується характеристика трубопроводу, що складається із послідовно з'єднаних ділянок?
5. Як побудувати характеристику складного трубопроводу?
6. Що являє собою характеристика простого трубопроводу у випадку ламінарного режиму руху рідини?
7. З якою метою будують характеристики трубопроводів?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Вимірювання густини і коефіцієнтів поверхневого натягу

Мета роботи:

1. Засвоїти такі основні поняття :
 - густина рідини;
 - поверхневий натяг рідини;
2. Методом гідростатичного тиску при різних температурах рідини визначити густину та коефіцієнт поверхневого натягу рідини.
4. Побудувати графіки залежності густини та коефіцієнта поверхневого натягу від температури рідини.

Загальні відомості

Основною механічною характеристикою рідини є густина ρ , кг/м³. Густиною називається маса рідини, що знаходиться в одиниці об'єму, чи просто відношення маси рідини до її об'єму:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (6.1)$$

Поверхневий натяг рідини обумовлюється силами взаємного притягання молекул поверхневого шару, що намагаються зменшити вільну поверхню рідини.

Внаслідок поверхневого натягу на рідину, яка має криволінійну поверхню, діє додаткове зусилля, що збільшує або зменшує тиск в рідині на величину (формула Лапласа)

$$p_{пов} = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad (6.2)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;
 r_1 та r_2 – головні радіуси кривизни елемента поверхні, що розглядається.

Тиск при випуклій поверхні рідини збільшується, а при вгнутій – зменшується.

Залежність поверхневого натягу від температури має вигляд:

$$\sigma = \sigma_0 - \beta \Delta t, \quad (6.3)$$

де σ_0 - коефіцієнт поверхневого натягу при дотику з повітрям при температурі 0°C; для води $\sigma_0 = 0,076$ Н/м; $\beta = 0,00015$ Н/(м·°С).

Вплив поверхневого натягу доводиться враховувати при роботі з рідинними приладами для вимірювання тиску, при витіканні рідини з малих отворів, при фільтрації та при утворенні краплин у вільних струминах.

Особливо сильно поверхневий натяг проявляється в трубках досить малого діаметра (рис. 6.1), для яких формула (6.2) приймає вигляд

$$p_{\text{пов}} = 2\sigma / r \quad (6.4)$$

або

$$h_{\text{пов}} = \frac{2\sigma}{\rho g r}, \quad (6.5)$$

де r – радіус трубки;

$h_{\text{пов}}$ – висота капілярного підняття.

Надлишковий тиск повітря в трубці 2 (рис 6.1) дорівнює сумі гідростатичного тиску стовпчика досліджуваної рідини і тиску всередині бульбашки, що виходить з трубки, який зумовлений силами поверхневого натягу рідини, тобто

$$\rho_e g h = \rho_p g H + 2\sigma / r, \quad (6.6)$$

де ρ_p – густина рідини у посудині 1 (рис.6.1);

r – радіус бульбашки, який можна прийняти рівним радіусу трубки.

Другий доданок в (5.6) не залежить від глибини занурення трубки 2. Тому, що б виключити невідому σ в (6.6), необхідно виконати вимірювання при зануренні трубки на різні глибини (H_1 та H_2), яким будуть відповідати і два значення тиску (показання манометра 4 h_1 та h_2). Тоді шукана густина рідини у посудині 1 визначається за формулою:

$$\rho_p = \rho_e (h_1 - h_2) / (H_1 - H_2). \quad (6.7)$$

Після того, як визначена густина ρ_p , можна скористатися даними одного з вимірювань (наприклад, першого) для визначення з (6.6) значення коефіцієнта поверхневого натягу

$$\sigma = 0,5 \cdot r \cdot g (\rho_e \cdot h_1 - \rho_p \cdot H_1). \quad (6.8)$$

Обладнання

Дослідна установка (рис. 6.1) складається з посудини 1 з досліджуваною рідиною. Температура рідини вимірюється термометром 6. У посудині 1 розташована трубка 2 діаметром d . З лінії повітря через триходовий кран 3 в трубку 2 надходить повітря, тиск якого вимірюється рідинним манометром 4. У манометр 4 залита рідина з відомою густиною ρ_0 . Для зміни температури досліджуваної рідини у посудині є електронагрівник 7.

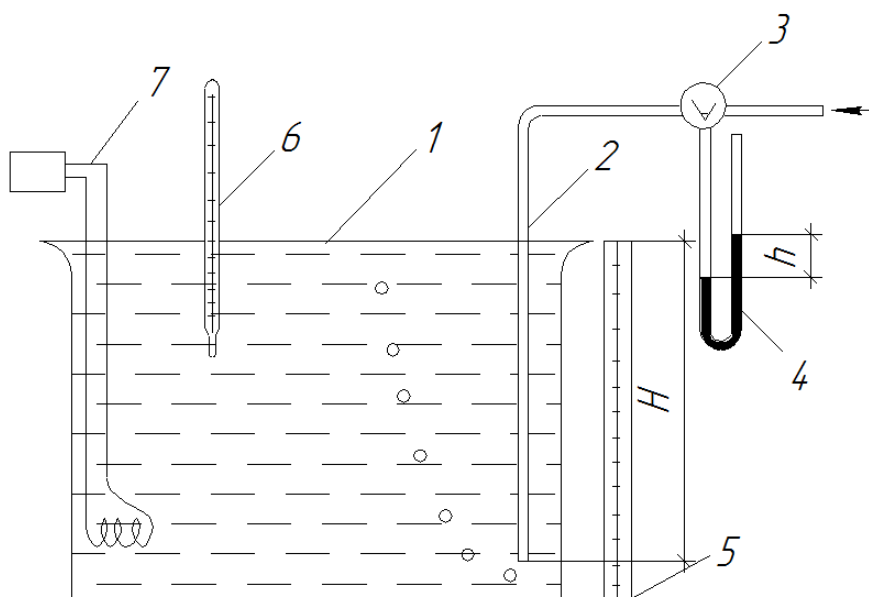


Рисунок 6.1 – Лабораторне обладнання для вимірювання густини і коефіцієнтів поверхневого натягу

Хід виконання роботи

1. Занурити трубку 2 на певну глибину H_1 та зафіксувати її положення.

2. Повільно відкрити триходовий кран 3 так, щоб з трубки 2 виходили окремі бульбашки.

3. Показання термометра t , манометра h_1 та глибину занурення трубки 2 H_1 занести до таблиці 6.1.

4. Змінити положення трубки 2 у посудині та повторити вимірювання.

5. Увімкнути електронагрівник 7 та підвищити температуру рідини на $5 \dots 10$ °С.

6. Провести повторні вимірювання при іншій температурі (нагрівник при цьому вимкнути).

7. За формулою (6.7) розрахувати густину досліджуваної рідини.

8. При відомій густині рідини за формулою (6.8) розрахувати коефіцієнт поверхневого натягу рідини.

9. За даними розрахунків побудувати графіки залежностей $\rho_p = f(t)$, $\sigma = f_1(t)$, описати їх аналітично та зробити висновки.

Таблиця 6.1 – Таблиця результатів

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Досліди			
			1	2	3	4
Температура рідини	t	°С				
Глибина занурення трубки	H_1	м				
	H_2	м				
Показання манометра	h_1	м				
	h_2	м				
Густина рідини	ρ	кг/м ³				
Коефіцієнт поверхневого натягу	σ	Н/м				

Контрольні запитання

1. Які фізичні властивості рідини вам відомі?
2. Що називають густиною і як вона залежить від температури?
3. У чому проявляється одна із аномальних властивостей води?
4. Що розуміють під силами поверхневого натягу (лапласовими)?
5. Який фізичний зміст коефіцієнта поверхневого натягу?
6. Що називають основним рівнянням гідростатики і який вигляд воно має?
7. Що розуміють під надлишковим тиском?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7
Визначення коефіцієнта витрати водоміра Вентурі

Мета роботи

1. Засвоїти такі основні поняття :
 - водомір Вентурі;
 - принцип роботи водоміра Вентурі.
4. Експериментально визначити коефіцієнт витрати водоміра Вентурі.

Загальні відомості

За допомогою водоміра Вентурі визначають витрату рідини в напірному трубопроводі. Конструктивно він являє собою круглу трубу змінного перерізу з плавним переходом діаметрів. В основу роботи приладу покладена залежність перепаду тиску між широким та вузьким перерізами при проходженні через них витрати рідини. Ця залежність може бути встановлена на основі рівняння Бернуллі, що записане для перерізів 1-1 та 2-2. Перший переріз розміщується перед входом у звужувальний пристрій, де спостерігається повільна зміна руху; другий переріз проходить у місці найбільшого стиснення потоку.

Рівняння Бернуллі для даних перерізів має вигляд

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_w, \quad (7.1)$$

де Z_1 та Z_2 – перевищення центрів тяжіння перерізів I – I та II – II над площиною порівняння 0 – 0;

V_1 та V_2 – середні швидкості руху рідини в першому та другому перерізах;

α_1, α_2 – корективи кінетичної енергії рідини в першому та другому перерізі (коефіцієнти Коріоліса);

p_1 та p_2 – гідростатичний тиск в перерізах I – I та II – II;

h_w – втрати напору при русі рідини від першого до другого перерізів;

γ - питома вага рідини.

Визначення коефіцієнта витрати теоретичним шляхом ускладнено у зв'язку із складністю визначення величин α_1, α_2, h_w . Тому використовують експериментальний метод, застосовуючи розрахункову формулу для визначення витрати води через водомір:

$$Q = \mu K \sqrt{\Delta h}, \quad (7.2)$$

де μ – коефіцієнт витрати водоміра;
 Δh – різниця п'єзометричних напорів;
 K – стала водоміра.

Формулу (7.2) можна отримати з рівняння Д. Бернуллі (7.1), прийнявши $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, $h_w \approx 0$.

Оскільки

$$\left(Z_1 + \frac{p_1}{\gamma}\right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{\gamma}\right) = \Delta h. \quad (7.3)$$

Різниця показань п'єзометрів буде рівна

$$\Delta h = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g}. \quad (7.4)$$

Середні швидкості V_1 та V_2 пов'язані між собою рівнянням нерозривності $Q_1 = Q_2$, тобто $V_1\omega_1 = V_2\omega_2$, звідки

$$V_2 = V_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right) = V_1 \left(\frac{D}{d}\right)^2.$$

З врахуванням останнього, рівняння (7.4) приймає вигляд $\Delta h = \left(\frac{V_1^2}{2g}\right) \left[\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1\right]$, звідки $V_1 = \sqrt{2g\Delta h} / \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}$, а витрата

$$Q_T = V_1\omega_1 = \frac{\omega_1 \sqrt{2g}}{\sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}} \sqrt{\Delta h} = K \sqrt{\Delta h}, \quad (7.5)$$

де

$$K = \frac{\omega_1 \sqrt{2g}}{\sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}} = \frac{\pi D^2 \sqrt{2g}}{\sqrt[4]{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}} \quad (7.6)$$

стала водоміра Вентурі з формулою, що має розмірність $L^{2.5}/T$.

Оскільки втрати напору відмінні від нуля, дійсна витрата Q буде менша теоретичної Q_T . Це враховується введенням у формулу (7.5) коефіцієнта витрати водоміра μ , який є меншим за одиницю, і тоді отримуємо формулу (7.2). З формули (7.2) можна отримати

$$\mu = \frac{Q}{Q_T} = \frac{Q}{K \sqrt{\Delta h}}, \quad (7.7)$$

звідки отримуємо фізичний зміст коефіцієнта витрати водоміра: він враховує вплив гідравлічних опорів на зниження пропускної здатності водоміра. Чим менші гідравлічні опори, тим коефіцієнт μ ближчий до одиниці.

Обладнання

Дослідна установка (рис.7.1) складається з напірного трубопроводу із влаштованим водоміром Вентурі 2, в контрольних перерізах якого встановлені п'єзометри 3. Для зміни витрати рідини у трубопроводі встановлено регулювальний вентиль 1. Вимірювання витрати рідини здійснюється за допомогою мірного бака 4 з рівнеміром 6 та секундоміра. Після закінчення досліду відкривають запірний вентиль 6 та опорожняють мірний бак 4.

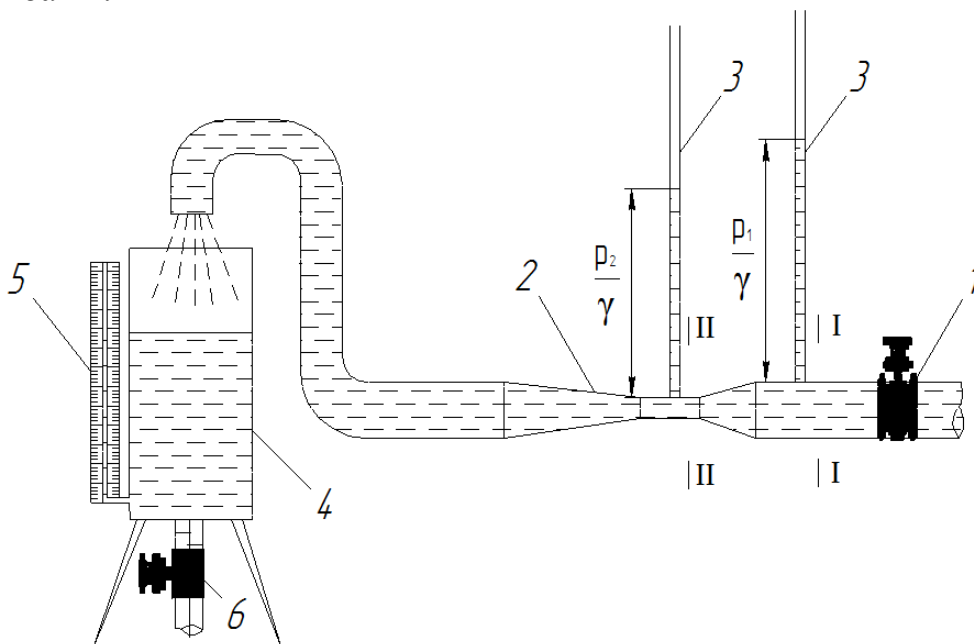


Рисунок 7.1 – Дослідна установка для визначення коефіцієнта витрати водоміра Вентурі: 1 – регулювальний вентиль; 2 – водомір Вентурі; 3 – п'єзометр; 4 – мірний бак; 5 – рівнемір; 6 – запірний вентиль.

Хід виконання роботи

1. Занести до таблиці 7.1 діаметр трубопроводу в перерізах I-I та II-II та за формулою (7.6) розрахувати сталу водоміра Вентурі.

2. Відкрити регулювальний вентиль 1 та закрити випускний вентиль 7. В мірний бак починає поступати вода.

3. За допомогою секундоміра зафіксувати час підняття рівня води в мірному баці T на певну відстань h .

4. При відомих висоті підняття рівня води в мірному баці h та діаметрі мірного бака d_m розрахувати об'єм води та знаючи час наповнення мірного бака T розрахувати витрату води Q .

5. Зняти показання п'езометрів в перерізах I-I та II-II та розрахувати втрати напору між цими перерізами.
6. За формулою (7.7) розрахувати коефіцієнт витрати μ .
7. Всі дані занести до таблиці 7.1.
8. Повторити дослід змінюючи витрату за допомогою регулювального вентиля 1.
9. Сформулювати та записати висновки.

Таблиця 7.1 – Таблиця результатів

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Досліди			
			1	2	3	4
Діаметр трубопроводу в перерізі I-I	D	m				
Діаметр трубопроводу в перерізі II-II	d	m				
Стала водоміра	K	$m^{2,5}/c$				
Діаметр мірного бака	d_m	m				
Висота рівня води в мірному баці	h	m				
Об'єм води	W	$л$				
Час	T	c				
Витрата води	Q	$л/с$				
Показання п'езометра в перерізі I-I	$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$	$см$				
Показання п'езометра в перерізі II-II	$Z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$	$см$				
Різниця показань п'езометрів	Δh	$см$				
Коефіцієнт витрати	μ	-				

Контрольні запитання

1. Конструктивне виконання водоміра Вентурі.
2. Принцип роботи водоміра Вентурі.
3. Який фізичний зміст коефіцієнта витрати?
4. Формула визначення сталої водоміра.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

Дослідження витоку рідини через малі отвори в тонкій стінці та насадки при постійному напорі в атмосфері

Мета роботи

1. Засвоїти такі основні поняття :

- витік рідин через малі отвори в тонкій стінці при сталому напорі;

- витік рідин через насадки при сталому напорі.

4. Експериментально визначити коефіцієнти витрати, стиснення, опору та швидкості для отворів та насадок різної форми та типу. Порівняти отримані значення із довідниковими даними.

Загальні відомості

Малим вважається отвір, висота якого не перевищує $0,1 H$. H – перевищення вільної поверхні рідини над центром тяжіння отвору.

Стінку вважають тонкою, якщо її товщина $\delta < (1,5...3,0) d$. При виконанні цієї умови величина δ не впливає на характер витоку рідини через отвір, оскільки струмінь рідини дотикається лише до гострої кромки отвору.

Оскільки частинки рідини рухаються до отвору по криволінійним траєкторіям сил інерції струмінь, що витікає через отвір, стискається. Завдяки дії сил інерції, струмінь продовжує стискатися і після виходу з отвору. Найбільше стиснення струменя, як показують досліди,

спостерігається в перерізі $c - c$ (рис. 8.1) на відстані приблизно $(0,5...1,0) d$ від вхідної кромки отвору. Цей переріз називають стисненим. Ступінь стиснення струменя в цьому перерізі оцінюють **коефіцієнтом стиснення** ε .

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad (8.1)$$

де ω_c та ω – відповідно площа стисненого живого перерізу струменя та площа отвору.

Середню швидкість струменя V_c у стисненому перерізі $c - c$ при $p_0 = p_{atm}$ розраховують за формулою, що отримана з рівняння Д. Бернуллі для перерізів $I - I$ і $c - c$ (рис.8.1):

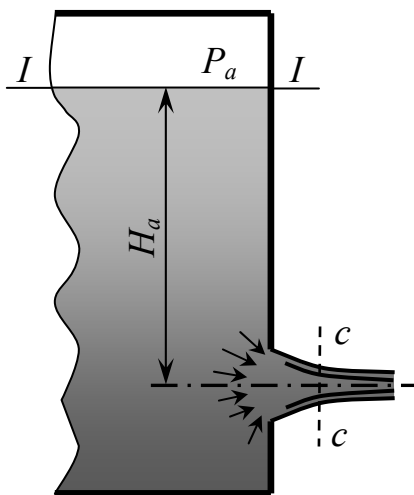


Рисунок 8.1 – Розрахункова схема витоку рідини через отвір в тонкій стінці при постійному напорі

$$V_c = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (8.2)$$

де φ – коефіцієнт швидкості отвору.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}}. \quad (8.3)$$

На основі використання рівняння траєкторії струменя, що витікає через отвори, отримано ще один вираз для коефіцієнта φ :

$$\varphi = \frac{x_i}{2\sqrt{y_i H}}. \quad (8.4)$$

В формулах (8.3) та (8.4) α – коефіцієнт Коріоліса, ζ – **коефіцієнт опору отвору**, x_i та y_i – координати довільно взятої точки траєкторії струменя.

Оскільки напір втрачається, головним чином, поблизу отвору, де швидкості достатньо великі, при витoku з отвору до уваги приймають лише **місцеві втрати напору**.

Витрата рідини Q через отвір розраховується за формулою:

$$Q = V_c \omega_c = \varphi \sqrt{2gH} \varepsilon \omega = \varphi \varepsilon \omega \sqrt{2gH}, \quad (8.5)$$

де

$$\varphi \varepsilon = \mu, \quad (8.6)$$

де μ – коефіцієнт витрати отвору, що враховує вплив гідравлічного опору та стиснення струменя на витрату рідини. З врахуванням виразу для μ формула (8.5) приймає вигляд:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}. \quad (8.7)$$

Величини коефіцієнтів ε , ζ , φ , μ для отворів визначають дослідним шляхом. Встановлено, що вони залежать від форми отвору та числа Рейнольдса. В додатку Ж наведені криві залежностей коефіцієнтів ε , φ і μ при витoku рідини через малі отвори в тонкій стінці від Re_T , що розрахований за теоретичною швидкістю витoku:

$$Re_T = V_T d_0 / \nu = \sqrt{2gH} d_0 / \nu. \quad (8.8)$$

Цей графік (див. додаток Ж) складений А. Д. Альтшулем на основі дослідів різних авторів.

Однак при великих числах Рейнольдса ($Re \geq 10^5$) вказані коефіцієнти від Re не залежать і для круглих та квадратних отворів при досконалому стисненні струменя дорівнюють: $\varepsilon = 0,62 \dots 0,64$, $\zeta = 0,06$, $\varphi = 0,97 \dots 0,98$, $\mu = 0,60 \dots 0,62$.

Насадкою називають патрубок довжиною $2,5d \leq L_H \leq 5d$, що приєднаний до малого отвору в тонкій стінці з метою зміни гідравлічних характеристик витoku (швидкості, витрати рідини, траєкторії струменя).

Насадки бувають циліндричні (зовнішні та внутрішні), конічні та коноїдальні, тобто окреслені по формі струменя, що витікає з отвору.

Використання насадки будь-якого типу викликає збільшення витрати рідини Q завдяки вакууму, що виникає всередині насадки в ділянці стисненого перерізу, що також обумовлює підвищення напору витoku.

Середню швидкість витoku рідини через насадки V та витрату Q визначають за формулами, що отримані з рівняння Д. Бернуллі:

$$V = \varphi_H \sqrt{2gH}, \quad (8.9)$$

де $\varphi_H = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_H}}$ - коефіцієнт швидкості насадки,

ζ_H - коефіцієнт опору насадки.

Для вихідного перерізу коефіцієнт стиснення струменя $\varepsilon = 1$ (насадка в цій ділянці працює повним перерізом), тому коефіцієнт витрати насадки $\mu_H = \varphi_H$.

Коефіцієнт μ_H витрати циліндричної насадки при витoku рідини в газове середовище залежить від відносної довжини насадки l/d та числа Рейнольдса Re . В додатку И наведені дослідні криві залежності μ_H від Re для різних l/d .

Витрата рідини, що витікає через насадки, розраховується за формулою, яка аналогічна формулі (8.7),

$$Q = \mu_H \omega \sqrt{2gH}. \quad (8.10)$$

Обладнання

Дослідна установка (рис. 8.2) складається з циліндричного резервуара 3, в боковій стінці якого зроблено отвір, що закривається півсферичним затвором 7. В цей отвір може бути вставлена та закріплена спеціальними гвинтами пластинка із отворами різної форми або насадками. Вода подається в резервуар з водопровідної мережі по трубі 1; витрата її регулюється краном 2. Всередині резервуара 3 встановлена зливна трубка 5, висота розміщення якої може змінюватися. Злив призначений для створення постійного напору. Положення рівня води в резервуарі визначається за п'єзометром 4, що забезпечений шкалою, нуль якої відповідає відмітці центра отвору.

Для вимірювання координат точок струменя слугує прикріплена до резервуара горизонтальна металева лінійка 6 із пересувним повзунком. Повзунок несе на собі круглий градуйований на міліметри стержень, що

закінчується голкою та має можливість переміщатися на повзунку вгору та вниз.

Затвор 7 ричагом жорстко з'єднаний з валом, на кінці якого укріплена рукоятка, що слугує для закриття та відкриття затвора. При закритому затворі можна змінювати насадки та отвори під час виконання роботи без спорожнення резервуара.

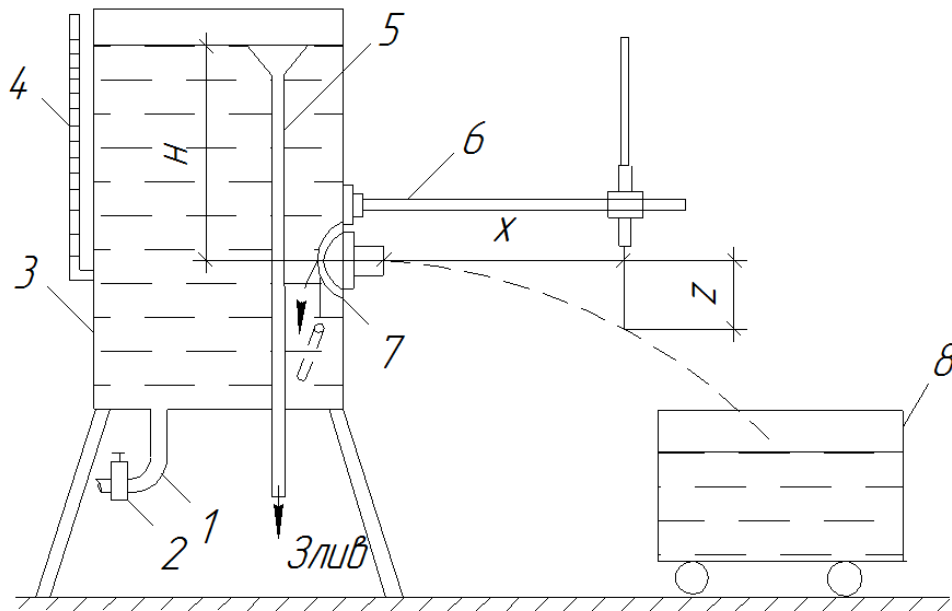


Рисунок 8.2 – Дослідна установка для дослідження витоків рідини через малі отвори в тонкій стінці та насадки при постійному напорі в атмосфері

Хід виконання роботи

1. Встановити воронку зливної труби в резервуарі на висоті потрібного напору.

2. При закритому затворі встановити та закріпити пластинку з отворами або насадками потрібного типу, діаметри яких попередньо вимірюють.

3. Відкрити кран 2 і в резервуар набрати води до початку зливу.

4. Відкрити затвор 7 та краном 2 відрегулювати подання води в резервуар так, щоб протягом дослідження працював злив.

5. П'єзометром 4 виміряти напір води в резервуарі H над центром отвору, а лінійкою 6 та голкою – координати струменя x та z в будь-якій точці по її довжині.

6. Під струмінь води підставити мірний резервуар 8 та одночасно увімкнути секундомір. Отвір резервуара 3 перекрити затвором 7 та одночасно зупинити секундомір. Визначити об'єм води в мірному резервуарі.

7. Повторити дослід 2 – 3 рази для кожного отвору та кожної насадки при різних напорах.

8. Коефіцієнт витрати отвору та насадки розраховується за формулою:

$$\mu = Q / \omega \sqrt{2gH}. \quad (8.11)$$

9. Коефіцієнт швидкості насадки дорівнює коефіцієнту витрати, що відповідає даному насадку: $\varphi = \mu$.

Коефіцієнт швидкості отвору розраховується за формулою (8.4).

10. Коефіцієнт опору отворів та насадок розраховується за формулою:

$$\zeta = 1/\varphi^2 - 1. \quad (8.12)$$

11. Коефіцієнт стиснення отворів та насадок визначається за формулою:

$$\varepsilon = \mu/\varphi. \quad (8.13)$$

12. Результати вимірювання та розрахунків занести до таблиці 8.1.

13. Порівняти отримані дослідні та довідкові значення коефіцієнтів. Сформулювати та записати висновки.

Таблиця 8.1 – Таблиця результатів

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Досліди			
			1	2	3	4
1	2	3	4	5	6	7
Форма отвору або тип насадки	-	-				
Діаметри отвору та насадок на виході	d	m				
Площі отворів та насадок на виході	ω	m^2				
Об'єм води в мірному резервуарі	W	m^3				
Час наповнення резервуара	t	c				
Витрата води	Q	m^3/c				
Напір	H	m				
Координати довільної точки «К» траєкторії струменя	X_k	m				
	Y_k	m				
Коефіцієнт витрати	μ_{cnp}	-				
Коефіцієнт швидкості	φ	-				

Продовження таблиці 8.1.

1	2	3	4	5	6	7
Коефіцієнт опору	ζ	-				
Коефіцієнт стиснення	ε	-				
Довідкові значення коефіцієнтів витрати, швидкості, опору та стиснення для отворів і насадок	$\mu_{спр}$	-				
	φ	-				
	ζ	-				
	ε	-				

Контрольні запитання

1. Що розуміють під малим отвором в тонкій стінці при витоку рідини через отвір?
2. Стиснений переріз, причини стиснення струменя, чим оцінюють величину стиснення струменя?
3. Що називають насадкою, типи насадок, їх призначення?
4. Коефіцієнт швидкості. Що він враховує, як визначається?
5. Коефіцієнт витрати. Що він враховує, як визначається?
6. Коефіцієнт опору (отвору, насадки). Як він визначається за дослідними даними?
7. Поясніть, чому при витоку через насадку витрата рідини більша, ніж при витоку через малий круглий отвір в тонкій стінці.
8. Напишіть та поясніть формули для визначення швидкості та витрати при витоку рідини через отвори та насадки в атмосферу при постійному напорі.
9. Зобразіть та поясніть схеми витоку рідини з малого отвору в тонкій стінці та через зовнішню циліндричну насадку в атмосферу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лісіцин Є. Ф. Лабораторний практикум з прикладної механіки рідин та газів: Навчальний посібник / Лісіцин Є. Ф., Слободян Н. М. – Вінниця: ВДТУ, 2000. – 61 с.
2. Альтшуль А. Д. Примеры расчетов по гидравлике: Учебное пособие для вузов / Альтшуль А. Д., Калицун В. И., Майрановский Ф. Г., Пальгунов П. П. – М.: Стройиздат, 1977. – 255 с.
3. Калицун В. И. Основы гидравлики и аэродинамики: Учебник для техникумов / Калицун В. И., Дроздов Е. В. – М.: Стройиздат, 1980. – 247 с.
4. Калицун В. И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: Учебник для вузов / Калицун В. И., Кедров В. С., Ласков Ю. М., Сазонов П. В. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1980. – 359 с.
5. Пуляевский А. М. Общая гидравлика. Лабораторный практикум по общей гидравлике для студентов технических специальностей дневного и заочного обучения / А. М. Пуляевский. – Хабаровск: Изд-во Хабаровского государственного университета, 2003. – 32 с.

Додаток А

Таблиця А.1 – Значення еквівалентної шорсткості труб k_e

Матеріал та вид трубопроводу	Стан трубопроводу	k_e , мм
1	2	3
Тягнені труби з скла та кольорових металів	Нові, технічно гладенькі	$\frac{0 - 0,002}{0,001}$
Безшовні сталеві труби	Нові та чисті, старанно викладені	$\frac{0,01 - 0,02}{0,014}$
	Після декількох років експлуатації	$\frac{0,15 - 0,3}{0,2}$
Сталеві зварні труби	Легкоклепані	0,5 – 3
	Сильноклепані	До 9
Оцинковані залізні труби	Нові та чисті	$\frac{0,1 - 0,2}{0,15}$
	Після декількох років експлуатації	$\frac{0,4 - 0,7}{0,5}$
Чавунні труби	Нові асфальтовані	$\frac{0 - 0,16}{0,12}$
	Нові без покриття	$\frac{0,2 - 0,5}{0,3}$
	Бувші у використання	$\frac{0,5 - 1,5}{1}$
	Дуже старі	До 3
Дерев'яні труби	З дерев'яних клепок, ретельно обструганих	$\frac{0,1 - 0,3}{0,15}$
	З звичайних дерев'яних клепок	$\frac{0,3 - 1}{0,5}$
	З неструганих дошок	$\frac{1-2,5}{2}$
Фанерні труби	Нові	$\frac{0,02 - 0,05}{0,03}$
Азбестоцементні труби	Нові	$\frac{0,05 - 0,1}{0,085}$

Продовження таблиці А.1

1	2	3
Бетонні труби	Нові з попередньо напруженого бетону	<u>0 - 0,05</u> 0,03
	Нові центробіжні	<u>0,15 - 0,3</u> 0,2
	Бувші у використанні	<u>0,3 - 0,8</u> 0,5
	З необробленого бетону	1 - 3

Примітка: Під рискою вказано середнє значення k_e .

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Значення густини та кінематичної в'язкості води при різних температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\nu \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\nu \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$
0	999,87	1,79	30	995,67	0,81
4	1000	1,58	40	992,24	0,60
6	999,93	1,47	45	990,25	0,58
8	999,87	1,38	50	988,07	0,56
10	999,73	1,31	55	985,73	0,52
12	998,92	1,23	60	983,24	0,48
14	998,104	1,17	70	977,81	0,42
16	997,29	1,11	80	971,83	0,37
18	996,48	1,06	90	965,34	0,33
20	995,67	1,01	99	959,09	0,29

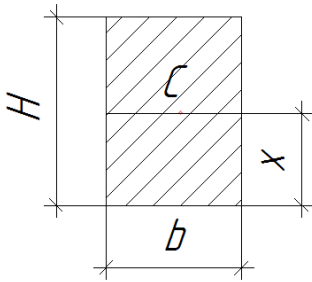
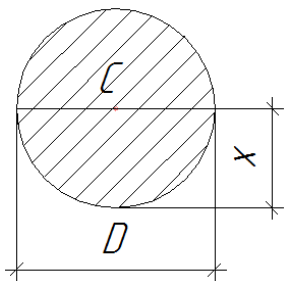
Додаток В

Таблиця В.1 – Орієнтовне значення коефіцієнта фільтрації деяких ґрунтів

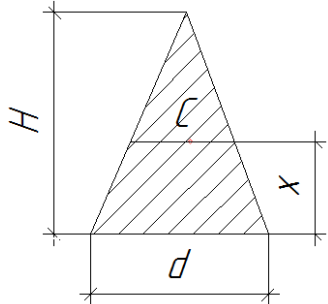
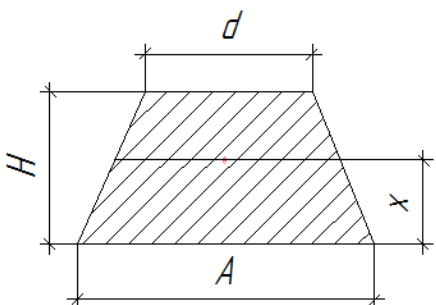
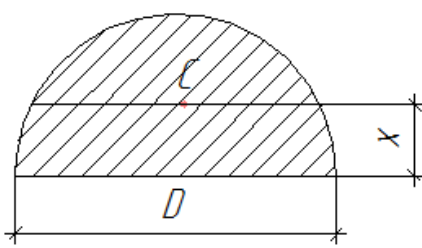
Ґрунт	к _с , см/с
Глина	$1 \cdot 10^{-7}$
Суглинок	$1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-5}$
Супісок	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3}$
Пісок:	
- дрібнозернистий	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$
- середньозернистий	$1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$
- крупнозернистий	$1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$
Галька і гравій	$1 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10$

Додаток Г

Таблиця Г.1 – Положення центра ваги плоских фігур та формули моментів інерції відносно осі, що проходить через центр ваги

Рисунок	Формули
1	2
	$x = \frac{H}{2}; J_0 = \frac{bH^3}{12}$
	$x = \frac{D}{2}; J_0 = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{D^4}{20,4}$

Продовження таблиці Г.1

1	2
	$x = \frac{H}{3}; J_0 = \frac{bH^3}{36}$
	$x = \frac{H}{3} \frac{2b+a}{a+b};$ $J_0 = \frac{H^3 (a^2 + 4ab + b^2)}{36(a+b)}$
	$x = 0,424 r = \frac{D}{4,71};$ $J_0 = \frac{D^4}{145,4}$

Додаток Д

Таблиця Д.1 – Значення A для сталевих трубопроводів, що були в експлуатації, при швидкості $v \geq 1,2 \text{ м/с}$

d, мм	A, с²/м⁶	d, мм	A, с²/м⁶
1	2	3	4
10	32950000	250	2,58
15	8809000	275	1,53
20	1643000	300	0,94
25	436700	350	0,41
32	93860	400	0,206
40	44530	450	0,109

Продовження таблиці Д.1

1	2	3	4
50	11080	500	0,062
70	2893	600	0,024
80	1168	700	0,0115
100	267	800	0,00566
125	106	900	0,00303
150	45	1000	0,00174
175	19	1200	0,00066
200	9,27	1400	0,00029
225	4,82		

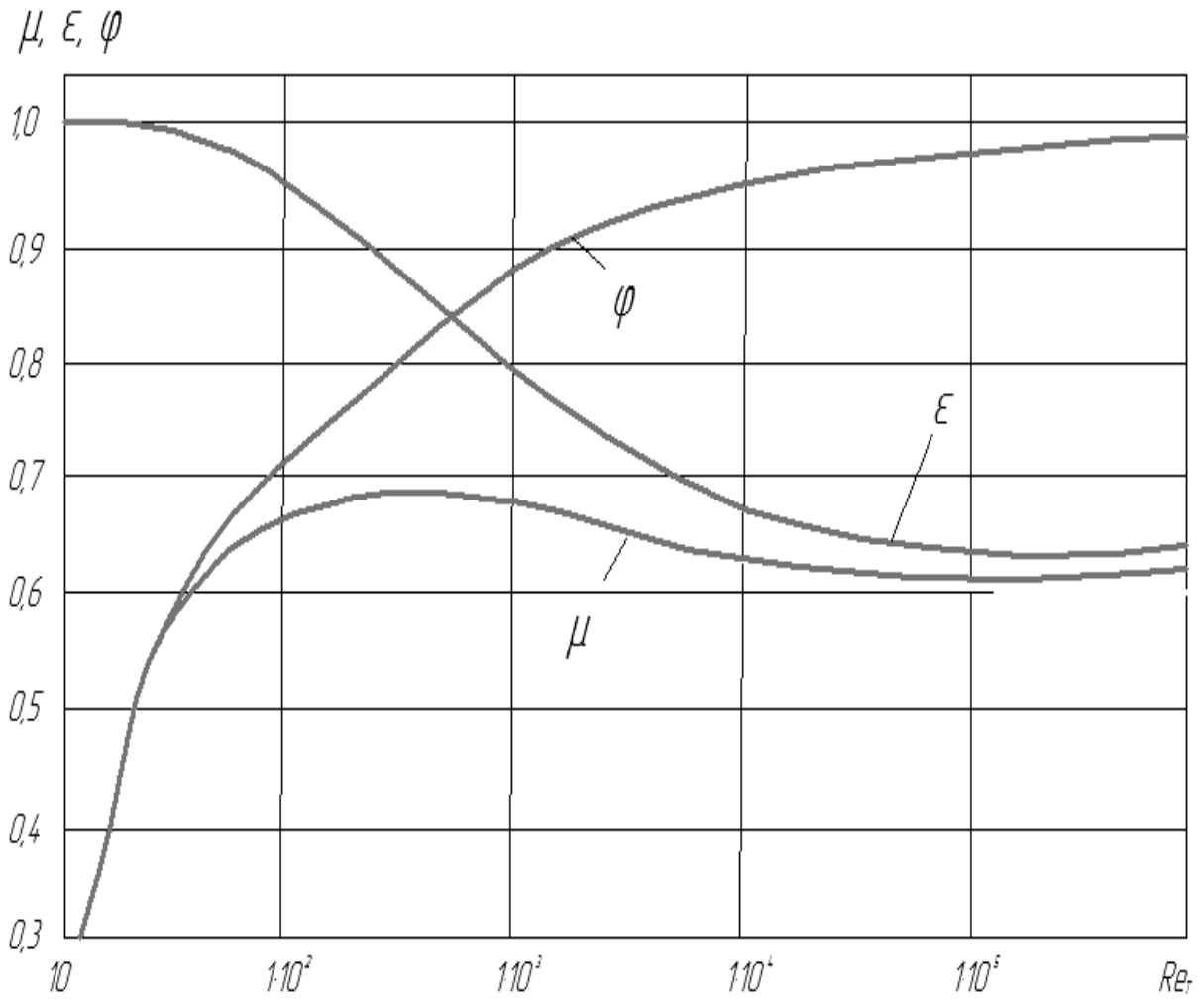
Додаток Е

Таблиця Е.1 – Значення коефіцієнта K_{II} для сталевих та чавунних труб в залежності від швидкості v

$v, \text{ м/с}$	K_{II}	$v, \text{ м/с}$	K_{II}
0,2	1,41	0,8	1,06
0,3	1,28	0,9	1,04
0,4	1,2	1	1,03
0,5	1,15	1,1	1,015
0,6	1,115	1,2	1
0,7	1,085		

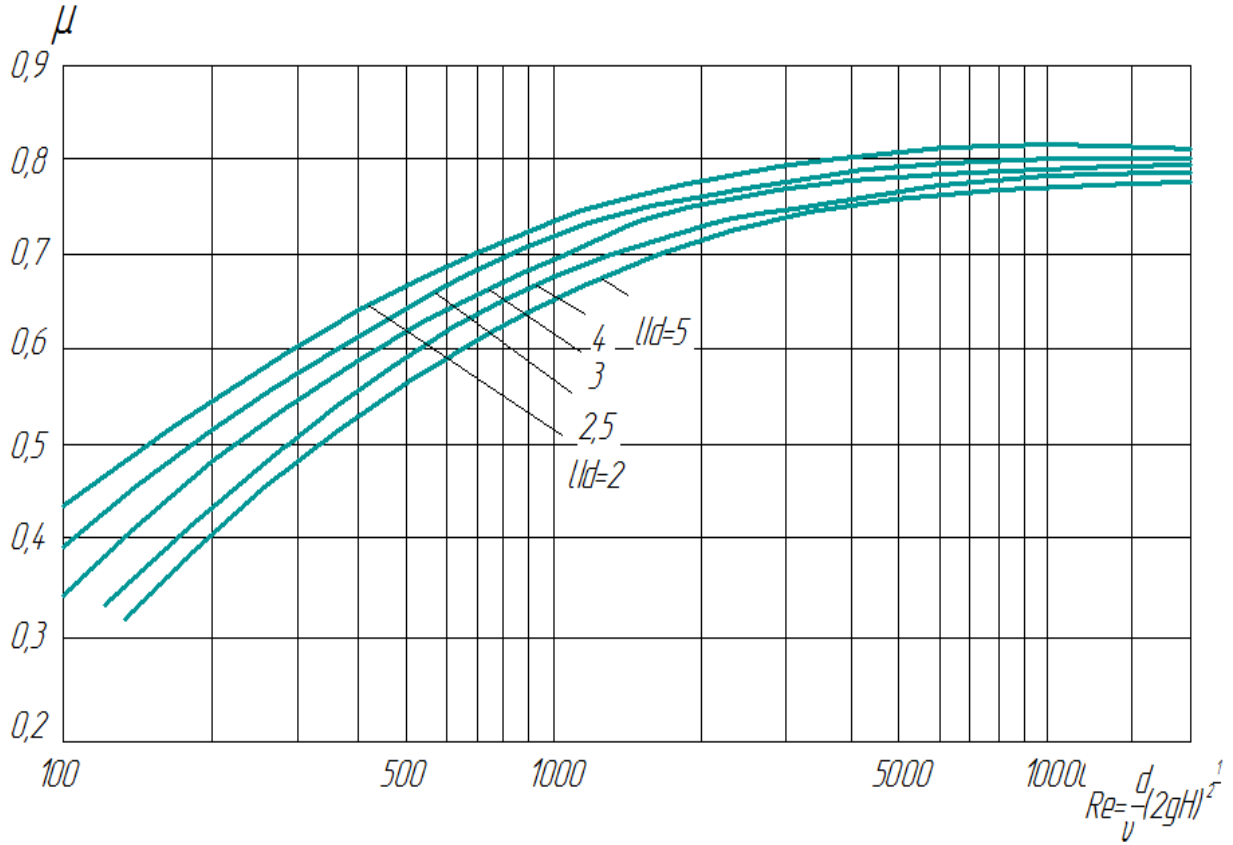
Додаток Ж

Таблиця Ж.1 – Залежність коефіцієнтів витoku через малі отвори в тонкій стінці від числа Рейнольдса



Додаток И

Таблиця И.1 – Залежність коефіцієнта витрати зовнішньої циліндричної насадки від числа Рейнольдса



Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних
робіт з дисципліни “Водопостачання та каналізація”
для студентів напряму підготовки “Будівництво”
всіх форм навчання

Редактор О. Скалоцька

Укладачі: Іван Васильович Коц

В'ячеслав Васильович Джеджула

Катерина Володимирівна Бауман

Оригінал-макет підготовлено К. Бауман

Підписано до друку
Формат 29,7×42¹/₄. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк.
Наклад прим. Зам. №

Вінницькій національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-59.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.