

БУДІВЕЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра будівельної механіки та гідравліки

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
з дисципліни
«ГІДРАВЛІКА»

Харків – 2016

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри будівельної механіки та гідравліки 6 квітня 2016 р., протокол № 6.

Методичні вказівки призначено для студентів напряму 6.070108 «Залізничні споруди та колійне господарство», 6.060101 «Будівництво», 6.050503 «Машинобудування» та 6.070105 «Рухомий склад залізниць» будівельного факультету та механічного факультетів всіх форм навчання, які вивчають курс «Гідравліка». У цих вказівках наведено схеми лабораторних установок, методики проведення та обробки даних дослідження, а також запитання для самоконтролю.

Укладачі:

доц. І.М. Єгорова,
асист. М.В. Павлюченков

Рецензент

доц. М.О. Ковальов

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
з дисципліни

«ГІДРАВЛІКА»

Відповідальний за випуск Павлюченков М.В.

Редактор Еткало О.О.

Підписано до друку 20.04.16 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 4,50. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Кафедра будівельної механіки та гідравлики

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
з дисципліни
«ГІДРАВЛІКА»

для студентів напрямку 6.070108 «Залізничні споруди та колійне господарство», 6.060101 «Будівництво», 6.050503 «Машинобудування» та 6.070105 «Рухомий склад залізниць»

Харків – 2016

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри будівельної механіки та гідравліки 6 квітня 2016 р., протокол № 6.

Методичні вказівки призначено для студентів будівельного факультету та студентів механічного факультету всіх форм навчання, які вивчають курс «Гідравліка». У цих вказівках наведено схеми лабораторних установок, методики проведення та обробки даних дослідження, а також запитання для самоконтролю.

Укладачі:

доц. І.М. Єгорова,
асист. М.В. Павлюченко

Рецензент
доц. М.О. Ковальов

Лабораторна робота 1

ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

Мета роботи

- 1 Ознайомлення з конструкцією манометрів.
- 2 Вимірювання надлишкового тиску за допомогою водяного п'єзометра, ртутного U-подібного манометра і пружинного манометра.

1.1 Загальні положення

Для вимірювання тиску всередині рідини застосовують різні манометричні прилади. Тип і конструкція їх залежать від величини вимірюваних тисків і тієї точності, яка повинна бути забезпечена в результаті вимірювань.

Усі прилади, що служать для вимірювання тисків, можуть бути розділені на три групи: 1) п'єзометри; 2) манометри; 3) вакуумметри.

П'єзометр

П'єзометр являє собою вертикальну скляну трубку діаметром не менше 0,5 см. При менших діаметрах трубок утворюватиметься помітний меніск, що потребує внесення поправок до відліків.

Нижній кінець трубки п'єзометра з'єднується за допомогою спеціального патрубку з місцем, де необхідно вимірювати тиск p . Верхній кінець трубки відкритий і сполучається з атмосферою (рисунок 1.1). Трубка поміщається на дошці з нанесеною на ній вимірювальною шкалою. Нуль шкали приладу може призначатися на довільній висоті і його положення повинно визначатися зручністю вимірювань.

Величина тиску p в будь-якій точці рідини при цьому визначається *основним рівнянням гідростатики*

$$p = p_0 + \rho g h, \quad (1.1)$$

де ρ – густина рідини;

g – прискорення сили тяжіння;

h – висота рівня рідини над тією точкою, у якій визначається

тиск p .

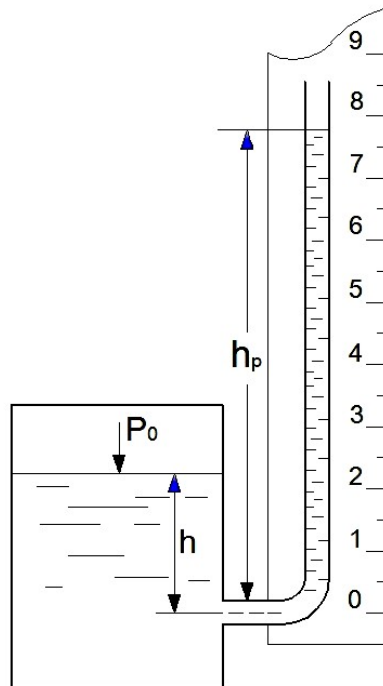


Рисунок 1.1

Цей тиск, як видно з рівняння, складається з двох величин: тиску на зовнішній поверхні рідини P_0 і тиску, обумовленого вагою верхніх шарів рідини ρgh , який можна називати **ваговим тиском**.

Величина P_0 є однаковою для всіх точок об'єму рідини, тому, урахувуючи другу властивість гідростатичного тиску, можна сказати, що **тиск, прикладений до зовнішньої поверхні рідини, передається всім точкам цієї рідини і по всіх напрямках однаково (закон Паскаля)**.

Якщо тиск на поверхні рідини $P_0 = P_{\text{атм}}$, тоді ваговий тиск ρgh можна називати надлишковим тиском

$$p_{\text{надл.}} = \rho g h \quad (1.2)$$

Абсолютний тиск, як відомо, це тиск, який вимірюється від «абсолютного» нуля. Таким чином, абсолютний тиск дорівнює атмосферному плюс надлишковий, тобто

$$p_{\text{абс}} = p_a + p_{\text{надл.}} \quad (1.3)$$

Якщо п'єзометр підключений (рисунок 1.2) до місця вимірювання тиску, рідина в ньому піднімається на п'єзометричну висоту h_p , вимірюючи яку за шкалою визначимо надлишковий гідростатичний тиск $p_{\text{надл.}}$. Для цього висоту стовпа рідини h_p , виміряну в метрах, помножимо на значення $\rho_{\text{в}} g$ ($10^3 \cdot 9,81$). Тоді надлишковий гідростатичний тиск буде виражено в ньютонях на квадратний метр (Н/м^2), тобто в паскалях (Па):

$$p_{\text{надл.}} = \rho g h_p \quad (1.4)$$

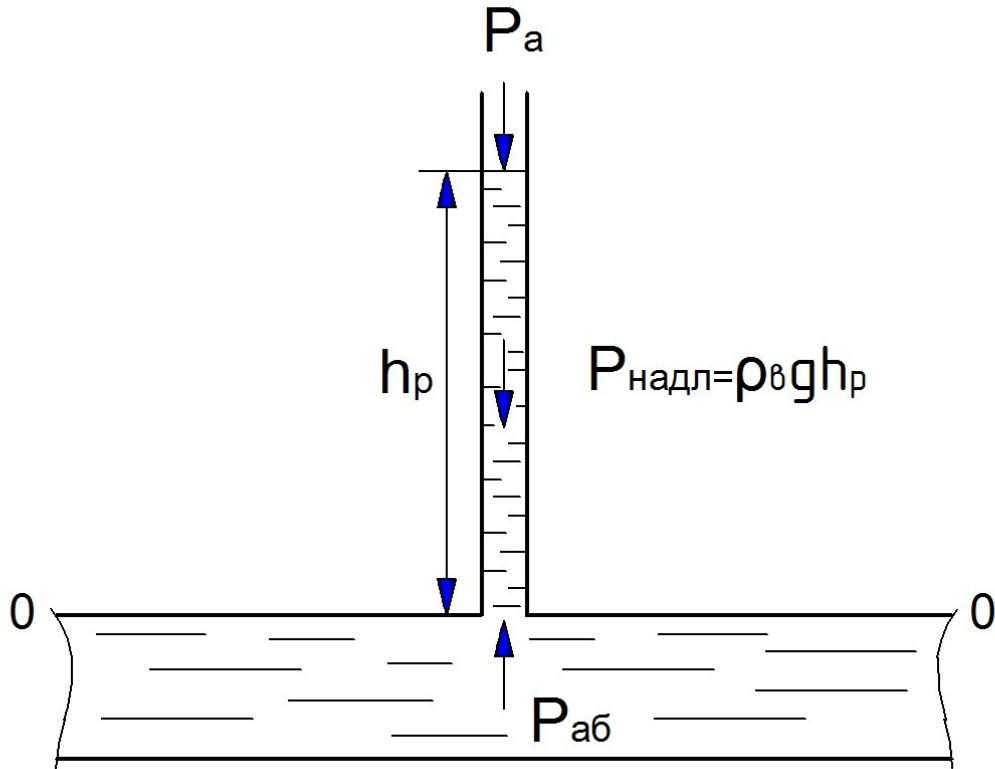


Рисунок 1.2

Якщо ж гідростатичний тиск необхідно виразити висотою стовпа рідини, то внаслідок рівності $h_p = \frac{p}{\rho g}$ гідростатичний тиск і буде дорівнювати п'єзометричній висоті в метрах або сантиметрах водяного стовпа.

Отже, п'єзометр дає можливість вимірювати тиск у натуральну величину, що є великою перевагою цього методу вимірювань. Використовують п'єзометри для вимірювання малих тисків (0,3 ÷ 0,4 атм), так як при вимірюванні великих тисків трубки п'єзометра отримують надмірну висоту (більше 3 ÷ 4 м вод. ст.). Цей метод вимірювання тиску стає малопрактичним і доводиться вдаватися до використання інших приладів, зокрема до використання так званих ртутних манометрів, у трубці яких вода замінюється ртуттю.

Якщо вимірюється тиск дуже малий, близько 100 Па (0,001 кгс/см²), застосовуються мікроманометри (рисунок 1.3), у яких скляна трубка нахилена під кутом до горизонту на такий кут, щоб сантиметр похилої трубки відповідав 1, 2 або 5 мм

висоти h_p . Такі кути відповідно рівні $\alpha = 5^\circ 50'$; $\alpha = 11^\circ 30'$ та $\alpha = 30^\circ$.

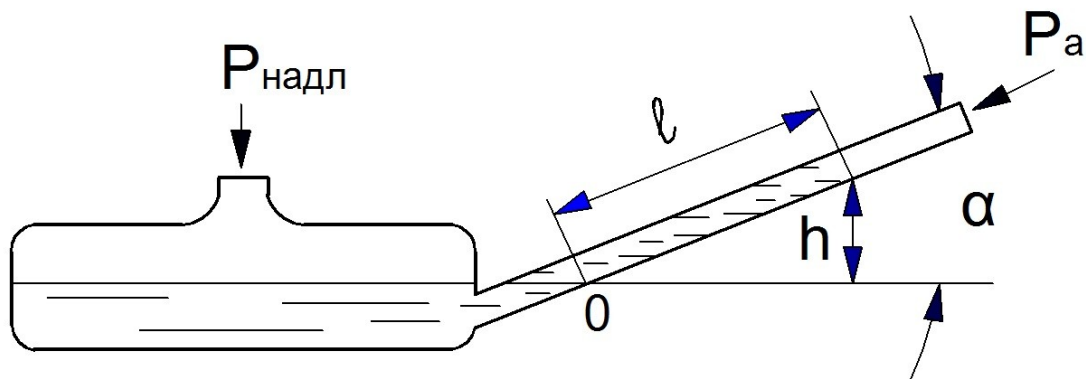


Рисунок 1.3

Користуючись таким приладом, можна обчислити висоту підняття рідини h_p за показанням скляної похилої трубки: $h_p = l \cdot \sin \alpha$, а потім за формулою (1.3) обчислити абсолютний або за (1.4) – надлишковий тиск. Мікроманометри зазвичай заповнюються водою або спиртом.

П'езометри і мікроманометри застосовуються зазвичай у лабораторіях, коли потрібна велика точність вимірювань.

Манометри

Манометри бувають двох систем: рідинні і механічні. Дуже поширеними рідинними манометрами є U-подібні ртутні манометри, які при всій своїй простоті забезпечують високу точність вимірювань. Такі манометри являють собою U-подібну скляну трубку, заповнену ртуттю, прикріплену до дошки зі шкалою. Один кінець трубки з'єднується з областю, у якій необхідно виміряти тиск, наприклад М (рисунок 1.4), а другий є відкритим і сполучається з атмосферою.

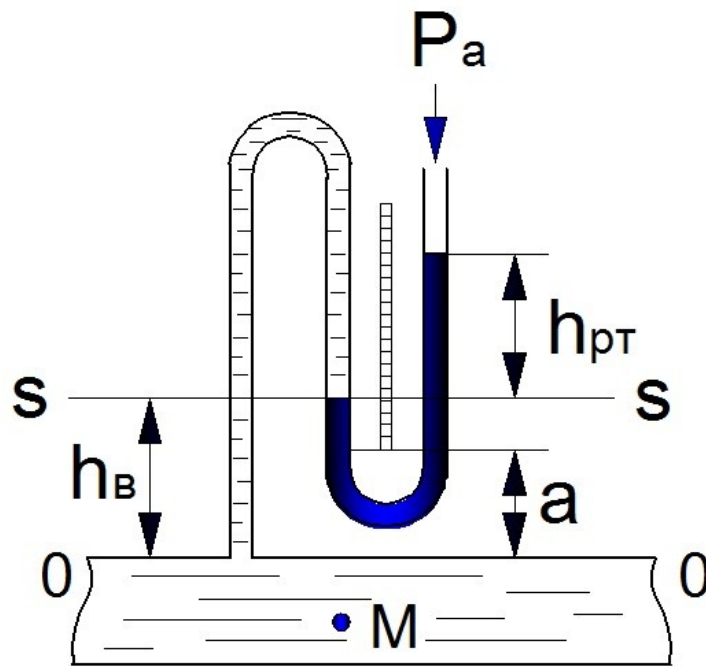


Рисунок 1.4

До підключення манометра до області вимірювання тиску ртуть буде перебувати в обох колінах на одному рівні. Після того, як манометр буде з'єднаний з областю тиску, ртуть у лівому коліні почне знижуватися, а в правому – підвищуватися до тих пір, поки вся система не урівноважиться, тобто коли буде досягнута рівність тисків у перерізі S-S

$$p_{S-S}^{абс} = p_{ат} + \rho_{рт} g h_{рт}, \quad (1.5)$$

де $p_{S-S}^{абс}$ – абсолютний гідростатичний тиск в перетині S-S;

$h_{рт}$ – різниця рівнів ртуті в лівому і правому колінах трубки;

$\rho_{рт}$ – густина ртуті.

Для того, щоб визначити абсолютний гідростатичний тиск безпосередньо в точці М, де приєднаний манометр, потрібно внести поправку на підвищення рівня ртуті в трубці в порівнянні з точкою вимірювання тиску. Ця поправка дорівнює висоті **a**

(рисунок 1.4), що являє собою вертикальні відстані між точкою установлення манометра і рівнем ртуті в лівому коліні. Отже,

$$p_{абсМ} = p_a + \rho_{рт} g h_{рт} + \rho_v g a, \quad (1.6)$$

де ρ_v – густина води;

a – вертикальна відстань між точкою М установлення манометра і рівнем ртуті в лівому коліні.

У цій дослідній установці $a=35 \text{ см} + h_{рт}$ в лівому коліні, де 35 см – постійна величина поправки для цього приладу.

Якщо за допомогою U-подібного манометра необхідно виміряти різницю тисків у магістралі, то його приєднують за допомогою розділових бачків.

При цьому тиск до манометра передається через повітряні порожнини розділових бачків. Різниця п'єзометричних висот у перерізах 1-1 і 2-2 магістралі 1 визначатиметься виразом

$$\left(Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) \left(Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) = \Delta h + h \frac{\rho_M}{\rho_v},$$

де ρ_M і ρ_v – відповідно густина рідини, залитої в манометр, і робочої рідини в магістралі.

Як робочі рідини U-подібних манометрів використовується не тільки ртуть, але й спирт, тетраброметан та ін.

Механічні манометри

Механічні манометри використовуються для вимірювання великих надлишкових тисків.

Залежно від елемента, що сприймає тиск (датчика), механічні манометри бувають двох типів: пружинні і мембранні.

У пружинному манометрі основна деталь – порожниста латунна трубка **а** (рисунок 1.5), зігнута по колу. Переріз трубки має форму овала або еліпса. Верхній вільний кінець трубки запаяний і з'єднаний зі стрілкою, яка переміщується по шкалі, а нижній – приєднаний до місця вимірювання тиску. Коли манометр з'єднується з областю тиску, то під його дією трубка починає розкручуватися, у зв'язку з чим її вільний кінець переміщається і тягне за собою стрілку. За показаннями стрілки визначається тиск у місці підключення манометра.

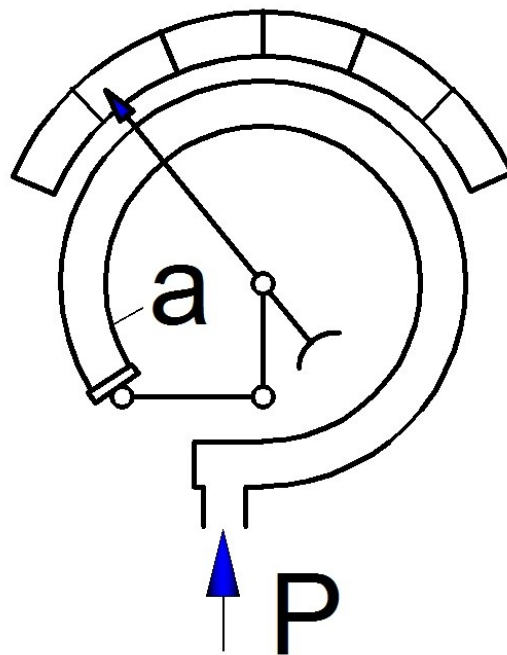


Рисунок 1.5

У мембранному манометрі (рисунок 1.6) основна деталь – мембрана хвилеподібного перерізу **в**, поєднана зі стрілкою, здатною переміщатися по шкалі. Вимірюваний тиск підводиться під низ мембрани і викликає її деформацію. У результаті цього стрілка переміщується по шкалі, відлік по якій і дає величину обумовленого тиску.

У залежності від призначення і конструкції шкали можуть бути в абсолютних значеннях тиску або в умовних поділках (з тарувальним графіком). Градування шкал манометрів виконується на заводах, де вони виготовлені. Пружинні манометри слід періодично перевіряти, тому що з плином часу пружини (трубки) деформуються, змінюючи свою первісну форму.

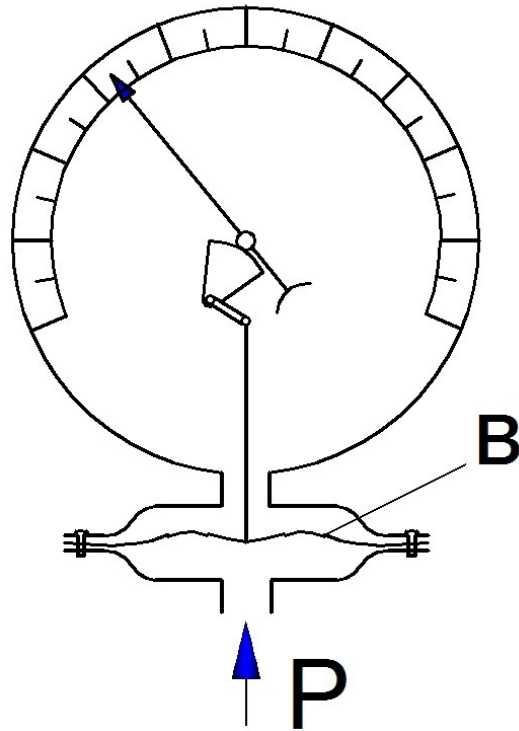


Рисунок 1.6

В даний час більшість використовуваних манометрів дозволяє вимірювати надлишковий тиск $p_{\text{надл.}}$ в технічних атмосферах (кгс/см²). Перехід до надлишкового тиску в паскалях $p_{\text{надл.}}$ (Па) здійснюється за формулою

$$p_{\text{надл.}}(\text{кгс/см}^2) = 9,81 \cdot 10^4 p_{\text{надл.}}$$

Вакуумметри

В інженерній практиці дуже часто доводиться зустрічатися з областями, де наявне розрідження або вакуум, тобто де тиск буває меншим від атмосферного. Вакуумом називається різниця між атмосферним і абсолютним тисками

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{ат}} - p_{\text{абс}}, \quad (1.7)$$

що характеризує відмінність тиску від навколишнього атмосферного. Можна навести багато випадків утворення вакууму. Так, наприклад, у всмоктувальній трубці поршневого насоса виникнення вакууму відбувається в результаті руху поршня, а у відцентровому насосі – у результаті обертання робочого колеса і т.п.

Для вимірювання вакууму застосовують вакуумметри. Принцип дії механічних і рідинних вакуумметрів і описаних вище манометрів однаковий, а тому їх конструкція повністю повторює конструкцію манометрів.

Крім того, існують прилади, що називаються мановакуумметрами, за допомогою яких можна вимірювати як позитивний тиск (надлишковий), так і розрідження (вакуум).

1.2 Опис лабораторної установки

Установка (рисунок 1.7) складається з циліндричної ємності 1, до якої приєднаний п'єзометр 2, ртутний U-подібний манометр 3 і пружинний манометр 4.

Для зменшення величини тиску в системі служить кран 7. Тиск усередині ємності 1 створюється завдяки тиску на вільній поверхні рідини в резервуарі 5 за допомогою ртутного поршневого повітряного насоса 6.

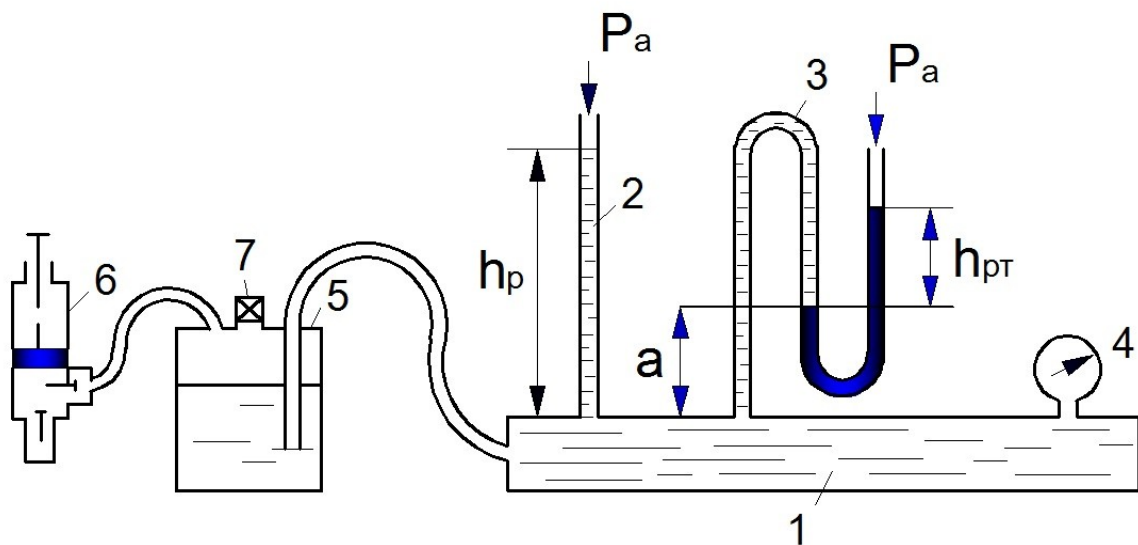


Рисунок 1.7

1.3 Порядок проведення дослідів

1.3.1 Створити тиск у системі насосом 6 при знятому затискачі в закритому крані 7.

1.3.2 Перекрити затискачем гумовий шланг.

1.3.3 Записати в журнал спостережень відліки з точністю ∓ 1 мм за п'єзометром, U-подібним ртутним і пружинним манометрами.

1.3.4 Змінити тиск у системі: для підвищення тиску – насосом 6 при знятому затискачі створити додатковий тиск; для зниження тиску зняти затискач і відкрити кран 7 (стравити тиск повітря в напірному резервуарі 5). Знову провести відповідні вимірювання і занести дані в журнал.

Створюючи тиск насосом, необхідно стежити за тим, щоб рівень води в п'єзометрі 2 не виходив за межі шкали, а у U-подібному ртутному манометрі не відбувався перелив води через ртуть у праве коліно.

Після закінчення дослідів відкрити кран 7 і затискач поставити в положення «відкрито».

1.4 Обробка результатів дослідів, оформлення звіту з роботи

1.4.1 Маючи дані спостережень висоти стовпа води h_p в п'єзометрі, за формулою для водяного п'єзометра обчислити надлишковий тиск

$$p_{\text{надл.}} = \rho_{\text{в}} g h_p,$$

де густину води прийняти $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Для обчислення значень абсолютного тиску необхідно знати показання барометра, що фіксує атмосферний тиск.

1.4.2 За показаннями ртутного U-подібного манометра за формулою для ртутного манометра обчислити надлишковий тиск

$$p_{\text{надл.}} = \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} + \rho_{\text{в}} g a,$$

де густину ртуті прийняти $\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$.

1.4.3 За тарувальною кривою вирахувати дійсний надлишковий тиск у системі за показами стрілки манометра. Обчислені значення тисків для всіх типів манометрів повинні бути виражені в паскалях.

Результати обчислення занести в протокол випробувань (таблиця 1.1) і оформити звіт з роботи.

Таблиця 1.1 – Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Номер досліду	
			1	2
1 Показання водяного п'езометра	h_p	м		
2 Тиск за п'езометром	$p_{надл.}$	Н/м ²		
3 Показання ртутного манометра	$h_{рт}/a$	м		
4 Тиск за ртутним манометром	$p_{надл.}$	Н/м ²		
5 Показання механічного манометра	n	умов. поділ.		
6 Тиск за механічним манометром	$p_{надл..}$	Н/м ²		

Питання для самоконтролю

1 Що називається тиском (абсолютним, надлишковим, вакуумом)?

2 Якими приладами вимірюється тиск? Принцип їх дії.

3 Чому буде дорівнювати тиск 1 кг/см², виражений у ньютонах на квадратний метр; метрах водяного стовпа, кілограмах на квадратний метр, міліметрах ртутного стовпа?

4 Які властивості має гідростатичний тиск?

5 Як записується основне рівняння гідростатики?

Лабораторна робота 2 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРЕСА

Мета роботи

1. Вивчення будови гідравлічного преса.
2. Визначення коефіцієнта корисної дії гідравлічного преса.

2.1 Загальні положення

Закон Паскаля має дуже широке застосування в техніці і використовується при конструюванні різних гідравлічних установок, дія яких основана на передачі тиску рідиною.

За цим законом працюють гідравлічні преси, гідравлічні підйомники, гідравлічні гальма і т.п.

Гідравлічний прес застосовується для створення дуже великих зусиль, необхідних у ряді виробничих процесів і будівельних робіт, зокрема для пресування або штампування металу, при випробуванні на міцність різних матеріалів. За тим же принципом побудовані гідравлічні домкрати, гідравлічні приводи навісного обладнання бульдозерів, автотранспорту, різних кранів, екскаваторів та ін.

У загальному випадку гідравлічний прес складається з двох циліндрів, з'єднаних між собою трубопроводом (рисунок 2.1).

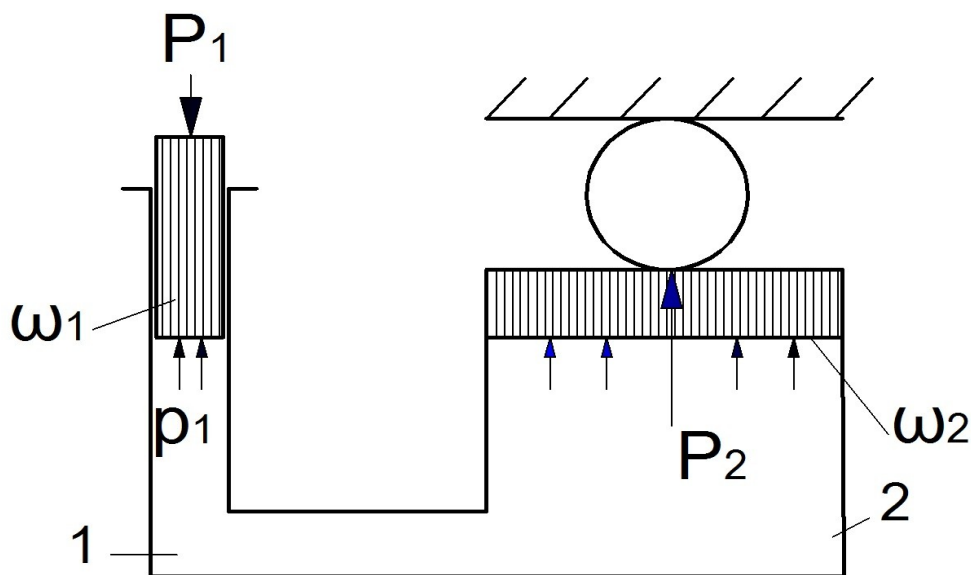


Рисунок 2.1

У кожному з циліндрів є поршень. У великому циліндрі встановлений поршень площею ω_2 , а в меншому – поршень площею ω_1 . Якщо циліндри преса заповнити рідиною і до поршня 1 прикласти силу P_1 , то вона створить тиск на рідину

$$p_1 = \frac{P_1}{\omega_1}.$$

За законом Паскаля цей тиск передається у всі точки рідини, а також на великий поршень ω_2 . Тиск p_1 створить силу P_2

$$P_2 = p_1 \cdot \omega_2.$$

Таким чином, стискна сила, одержувана в гідравлічному пресі,

$$P_2 = p_1 \omega_2 = P_1 \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (2.1)$$

Ця сила P_2 в стільки разів більша від сили P_1 , прикладеної до малого поршня, у скільки площа ω_2 більша від площі ω_1 .

2.2 Опис лабораторної установки

Принцип дії гідравлічного преса, схема якого показана на рисунку 2.2, оснований на законі Паскаля.

Для створення зусилля P_1 використовується система важеля

1. Зусилля P_1 за вирахуванням сил тертя, що діють на малий поршень, створює тиск рідини p , заміряється манометром
2. Цей тиск створює силу P_{2p} , що діє з боку рідини на великий поршень,

$$P_{2p} = p \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.2)$$

Сила P_2 , що стискає пружину, буде меншою від P_{2p} на величину сил тертя в ущільненнях великого поршня.

Корисна робота поршня при його переміщенні на $\Delta \ell$

$$A_{\text{п}} = P_2 \Delta \ell$$

Задіяна на це переміщення поршня робота

$$A_3 = P_{2p} \Delta \ell$$

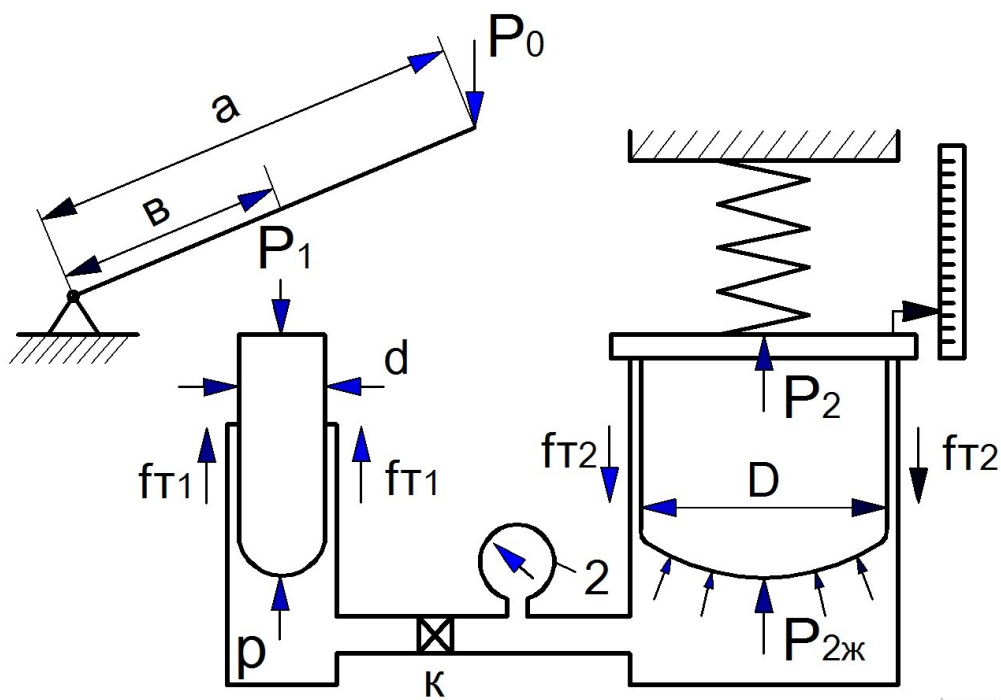


Рисунок 9

Як відомо, коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_3} = \frac{P_2 \Delta \ell}{P_{2p} \Delta \ell} = \frac{P_2}{P_{2ж}},$$

звідки

$$\eta = \frac{P_2}{\frac{\pi D^2}{4} p}$$

Ураховуючи, що діаметр плунжера $D = 5,8$ см,

$$\eta = 0,038 \frac{P_2}{p} \quad (2.3)$$

Величину стискального зусилля P_2 можна отримати з графіка $\ell = f(F_2)$, де ℓ – довжина стиснутої пружини, мм. Такий графік отриманий на підставі попереднього тарування пружини, а величина переданого тиску p – за манометром.

2.3 Порядок проведення досліду

2.3.1 Установити пружину.

2.3.2 Створити тиск у циліндрі за допомогою важеля.

2.3.3 Взяти відлік по стрілці манометра, а по лінійці визначити довжину стиснутої пружини. Відліки виконувати з точністю: по лінійці $\pm 0,5$ мм; за шкалою манометра $\pm 0,5$ поділок.

2.3.4 Користуючись тарувальним графіком, визначити стискальне зусилля P_2 по довжині стиснутої пружини ℓ і тиск p за умовними поділками шкали манометра.

Не рекомендується створювати тиск більше 120 умовних поділок за шкалою манометра. При утворенні тиску кран К повинен бути закритим. Після закінчення дослідів кран К відкрити.

2.4 Обробка результатів досліду, оформлення звіту з роботи

Отримані з досліду величини p і P_2 підставити в залежність (2.3), за якою обчислити коефіцієнт корисної дії гідравлічного преса. При цьому необхідно мати на увазі, що величина 0,038 розмірна – її розмірність зворотна величині площі.

Результати відліків занести в протокол випробувань (таблиця 2.1) і оформити звіт з роботи.

Таблиця 2.1 – Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Номер дослідження	
			1	2
1 Відлік за манометром		умов. поділ.		
2 Тиск за манометром	$p_{\text{надл.}}$	Н/м ²		
3 Довжина пружини	l	мм		
4 Стискальне зусилля	P_2	Н		
5 Коефіцієнт корисної дії	η	%		

Питання для самоконтролю

- 1 Сформулюйте закон Паскаля.
- 2 Про який тиск іде мова в законі Паскаля?
- 3 Як урахується тертя в ущільненнях великого і малого поршнів?
- 4 Що називається коефіцієнтом корисної дії?
- 5 Де застосовується гідравлічний прес на практиці?

Лабораторна робота 3

ІЛЮСТРАЦІЯ РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ, ПОБУДОВА ЛІНІЇ ПОВНОГО І П'ЄЗОМЕТРИЧНОГО НАПОРУ

Мета роботи

Побудова п'єзометричної лінії і лінії повного напору.

3.1 Загальні положення

Основними рівняннями, що дають змогу визначити параметри рідини в напірних потоках, є рівняння витрати і рівняння Бернуллі.

Рівняння витрати, записане для двох перерізів (1 і 2) потоку нестисливої рідини, являє собою рівність об'ємних витрат Q і має вигляд

$$v_{1\text{сер}} \cdot \omega_1 = v_{2\text{сер}} \cdot \omega_2, \quad (3.1)$$

де $v_{1\text{сер}}$ і $v_{2\text{сер}}$ – середні швидкості в перерізах 1 і 2;

ω_1 і ω_2 – площі цих перерізів.

Звідси випливає, що швидкості належать обернено пропорційно площам перерізів, або для круглих перерізів, обернено пропорційно квадратам діаметрів

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Для стисливої рідини рівняння (3.1) несправедливе і має бути замінене рівнянням вагової $Q_G = \rho g Q$ або масової $Q_m = \rho Q$ витрат.

Рівняння Бернуллі також запишемо для двох будь-яких перерізів струминки або потоку (наприклад, 1 і 2).

Для нев'язкої нестисливої рідини воно має вигляд

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}.$$

Кожен з членів рівняння Бернуллі, з одного боку, являє собою деяку висоту (напір), а з другого – є тим чи іншим видом питомої механічної енергії рідини, тобто енергії, віднесеної до одиниці ваги рідини. Так,

Z – геометрична висота центра ваги перерізу, яка відраховується вертикально вгору від довільно обраної площини відліку, чи геометричний напір, або питома потенціальна енергія положення рідини;

$\frac{p}{\rho g}$ – п'єзометрична висота (напір), або питома потенціальна енергія тиску;

$\frac{v^2}{2g}$ – швидкісна висота (напір), або питома кінетична енергія рідини;

$$Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H$$

– повний напір, або повна питома енергія

рідини, тобто повний запас механічної енергії, який має одиниця ваги рідини (наприклад, $\frac{1H}{g}$, що рухається зі швидкістю v).

Таким чином, повна питома енергія рідини, згідно з рівнянням Бернуллі, є постійною уздовж струминки (поток), коли рідина нев'язка. Це рівняння виражає закон збереження механічної енергії в рухомій нев'язкій рідині. Воно показує, що окремі енергії можуть змінювати свою величину в процесі руху (причому потенціальна енергія, на відміну від твердого тіла, складається з двох доданків ($Z + \frac{p}{\rho g}$), співвідношення між якими може також мінятися), але сума всіх енергій уздовж струминки нев'язкої рідини повинна бути незмінною.

Для потоку в'язкої рідини рівняння Бернуллі має дещо інший вигляд у зв'язку з нерівномірністю розподілу швидкостей по перерізах і втратами енергії

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \sum h$$

де v_1 і v_2 – середні по перерізу швидкості;

α_1 і α_2 – коефіцієнти Кориоліса, що враховують нерівномірність розподілу швидкостей по перерізу;

Σh – сумарна втрата напору (питомої енергії) між розглянутими перерізами.

Тричлен $Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$ являє собою *середнє значення повної*

питомої енергії рідини (повного напору) в даному перерізі потоку. Отже, для потоку в'язкої (реальної) рідини рівняння Бернуллі є *рівнянням балансу питомої енергії рідини* з урахуванням втрат енергії, обумовлених в'язкістю рідини.

Повний напір у перерізі потоку може бути визначений за допомогою так званої трубки повного напору, або трубки Піто, яка являє собою трубку, вигнуту під прямим кутом і встановлену назустріч потоку. Якщо в тому ж перерізі, де розташовано приймальний отвір трубки Піто, встановити п'єзометр, то різниця показань двох трубок буде дорівнювати швидкісному напору в цьому перерізі $\frac{v^2}{2g}$ (рисунок 3.1). Пояснюється це тим, що

швидкість частинок рідини, що потрапляють в отвір трубки, зменшується до нуля, а тиск, отже, збільшується на величину швидкісного напору. Вимірявши висоту підняття рідини в трубках повного напору і в п'єзометрах, легко визначити швидкість потоку

$$\left(\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}\right) - \frac{p_1}{\rho g} = h = \frac{v^2}{2g}, \text{ звідки } v = \sqrt{2gh}.$$

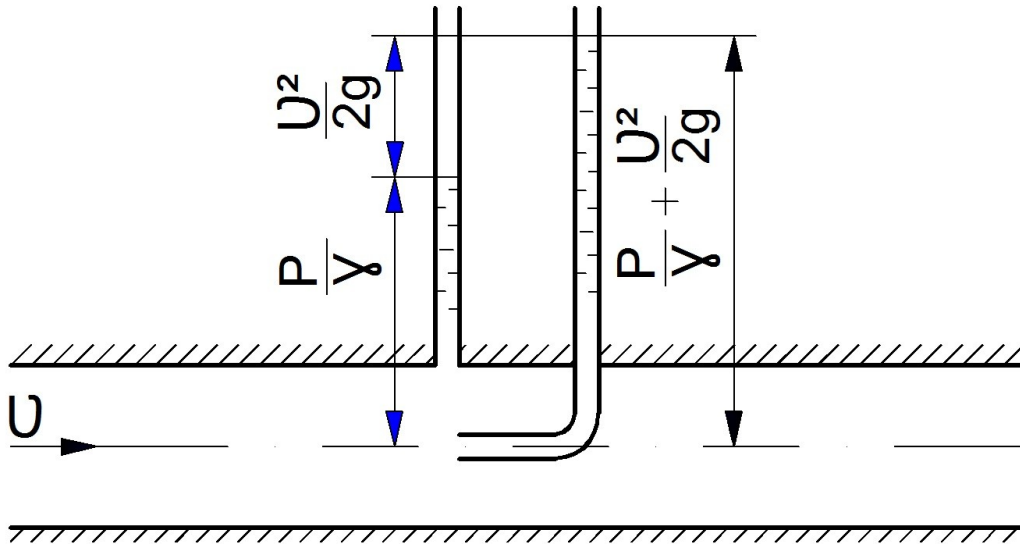


Рисунок 3.1

Так як усі члени рівняння Бернуллі являють собою висоти (напори), то це рівняння можна проілюструвати графіком, на якому показати зміну цих висот уздовж потоку (рисунок 3.2).

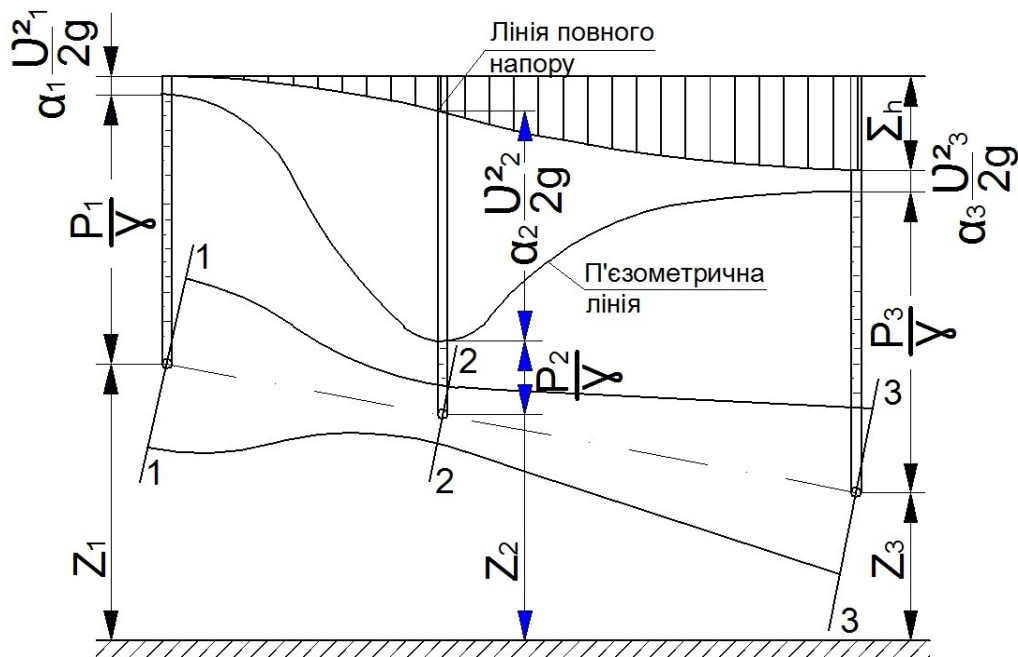


Рисунок 3.2

3.2 Опис дослідної установки

Дослідна установка, схема якої подана на рисунку 3.3, являє собою прозору трубку 1 змінного перерізу, вода в яку надходить через кран 2, а витікає в зливний бак 3. За допомогою кранів 2 і 4 можна регулювати витрату води.

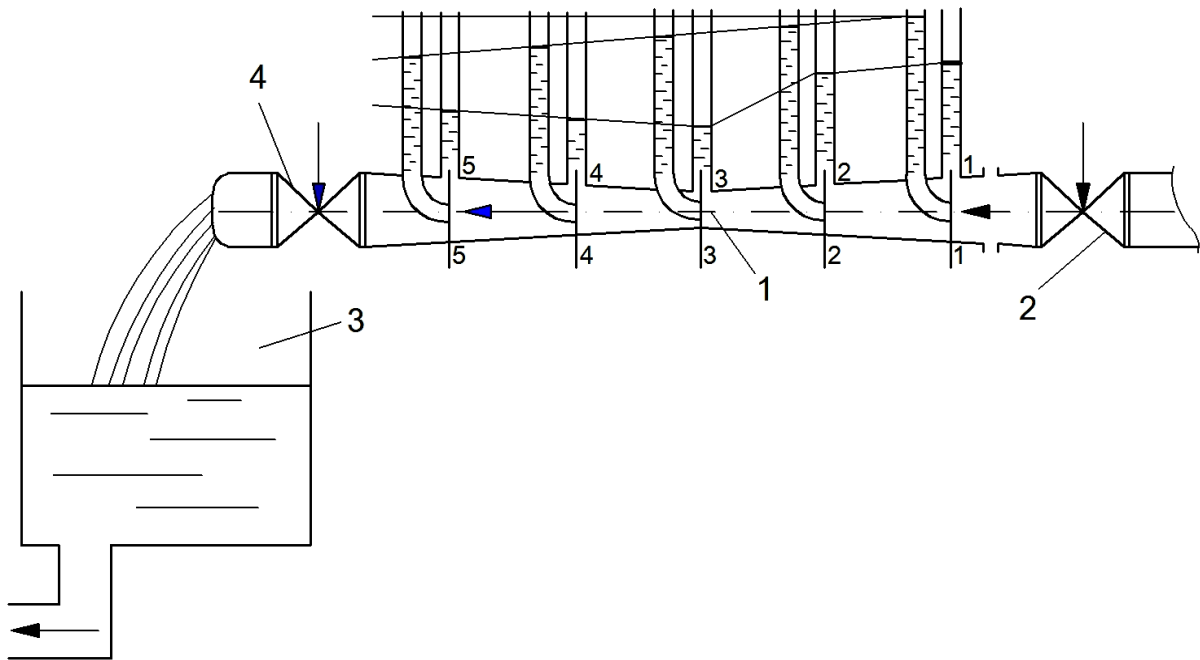


Рисунок 3.3

У кожному з шести контрольних перерізів прозорої труби певних діаметрів встановлено по парі трубок; одна з них, встановлена нормально до потоку, є п'єзометром, а друга, вигнута під прямим кутом і встановлена отвором назустріч потоку, являє собою трубку повного напору (трубку Піто). Усі ці трубки з'єднані з п'єзометрами і змонтовані на загальному щиті із загальною шкалою.

Трубки повного напору показують повний напір

$$H = Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$$
 у шести перерізах, тобто в місцях встановлення

цих трубок, а п'єзометри – гідростатичний напір $Z + \frac{p}{\rho g}$ у цих же

перерізах. Таким чином, рівні води в п'єзометрах визначають п'єзометричну лінію, а в трубках Піто – лінію повного напору.

3.3 Порядок проведення дослідів

3.3.1 За допомогою крана 2 встановлюємо рекомендовану витрату рідини в трубі змінного перерізу.

3.3.2 Фіксуємо і вносимо в протокол показання п'єзометрів і трубок повного напору в усіх шести перерізах труби при заданій витраті.

3.3.3 Після закінчення дослідів закриваємо кран 2.

3.4 Обробка результатів дослідів, оформлення звіту з роботи

За результатами вимірювань рівнів рідини в трубках повного напору виконується побудова ліній повного напору (повної питомої енергії рідини) і п'єзометричної лінії.

$$H = Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad \text{і} \quad \text{п'єзометрах} \quad Z + \frac{p}{\rho g}$$

Лінія повного напору знижується у бік руху рідини, що обумовлено наявністю втрат напору (втрат енергії).

П'єзометрична лінія знижується при звуженні труби і підвищується при її розширенні, оскільки в першому випадку збільшується швидкість і зменшується тиск, а в другому – зменшується швидкість і збільшується тиск.

Вертикальні відрізки між п'єзометричною лінією і лінією повного напору являють собою місцеві швидкісні напори

(питомі кінетичні енергії).

Результати відліків занести в протокол випробувань (таблиця 3.1) і оформити звіт з роботи.

Таблиця 3.1 – Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Номер досліджу	
			1	2
1 Показання трубок повного напору	$Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$	см		
2 Показання п'єзометрів	$Z + \frac{p}{\rho g}$	см		
3 Швидкісний напір	$\frac{v^2}{2g}$	см		
4 Середня швидкість у перерізі	v	см/с		

Питання для самоконтролю

1 У чому полягає геометричний і енергетичний зміст рівняння Бернуллі?

2 Чому кожний доданок рівняння Бернуллі називається питомою енергією?

3 Яка розмірність кожного доданка рівняння Бернуллі?

4 Що називається площею живого перерізу?

5 Фізичний зміст рівняння нерозривності потоку.

6 Що таке об'ємна, вагова і масова витрати?

7 Що таке повний гідродинамічний напір у перерізі?

8 На підставі аналізу рівняння Бернуллі виведіть взаємозв'язок між швидкістю і тиском.

9 Чим викликається нерівномірність розподілу швидкостей по перерізу потоку і як вона враховується в рівнянні Бернуллі?

10 Який фізичний зміст коефіцієнта α в рівнянні Бернуллі для потоку реальної рідини? Чим він визначається?

11 Чи можна встановити за графіком повного і п'єзометричного напорів напрямок руху потоку в трубопроводі та зміну площі перерізу?

Лабораторна робота 4 ТАРУВАННЯ ВИТРАТОМІРА

Мета роботи

- 1 Визначення постійної витратоміра c .
- 2 Побудова тарувальної кривої $Q = f(h)$.

4.1 Загальні положення

У гідравлічній лабораторії використовуються різні прилади для вимірювання витрати рідини. Найпростішим пристроєм для вимірювання витрати рідини є мірний бак. Якщо при усталеному русі протягом часу t , с, рідина заповнює мірний об'єм бака W , м³, то об'ємна витрата, м³/с, визначається за формулою

$$Q = \frac{W}{t}. \quad (4.1)$$

Для вимірювання об'єму W до мірного бака підключена скляна трубка зі шкалою, за якою можна встановити його заповнення.

Як звужуючий пристрій для вимірювання витрати в трубопроводах застосовуються: дросельний витратомір – труба Вентурі, діафрагми і сопла.

Дросельні витратоміри являють собою пристрої, що зменшують площу поперечного перерізу труби. У вузькому перерізі при цьому маємо максимальне значення швидкості і мінімальне значення тиску.

На рисунку 4.1 наведена схема дросельного витратоміра – труби Вентурі. Він складається з двох конічних труб 1, з'єднаних між собою малими основами. У широкій і вузькій частинах трубопроводу встановлені п'єзометри 2, що дають змогу визначити величини питомих потенціальних енергій у цих перерізах, а отже, і їх різницю h .

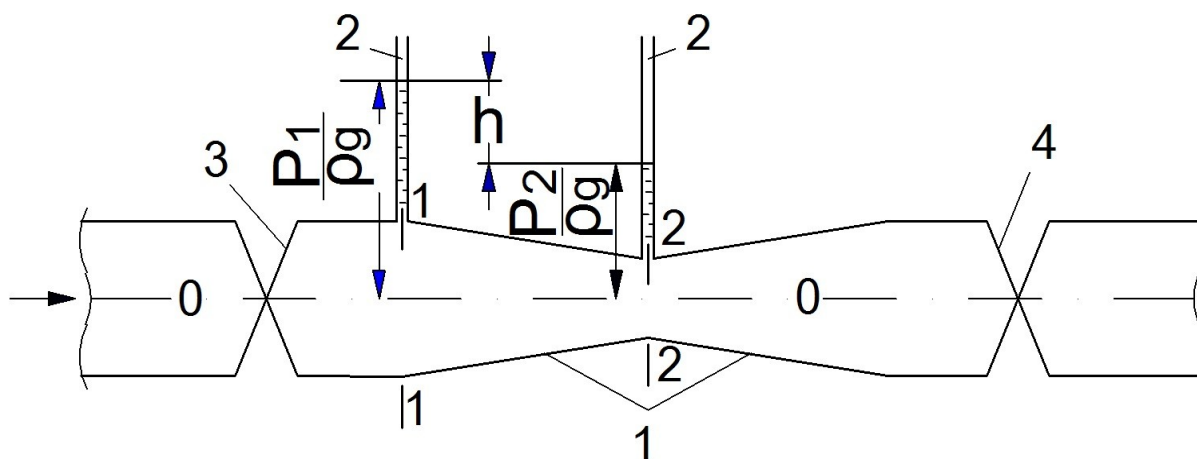


Рисунок 4.1

Для визначення витрати рідини, що протікає через витратомір, запишемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2, вважаючи розподіл швидкостей рівномірним

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \zeta \frac{v^2}{2g},$$

де ζ – коефіцієнт втрат напору між перерізами 1-1 і 2-2.

Ураховуючи, що верхні порожнини п'єзометрів поєднуються з атмосферою, матимемо

$$\left(Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) = h,$$

а

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi D^2}; \quad v_2 = \frac{4Q}{\pi d^2}.$$

Рівняння Бернуллі можна записати у вигляді

$$h + \frac{16Q^2}{2g\pi^2 D^4} = \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d^4} + \zeta \frac{16Q^2}{2g\pi^2 d^4}.$$

Розв'язуючи цю рівність відносно Q , отримуємо залежність витрати Q від різниці рівнів у п'єзометрах h

$$Q = \omega_2 \sqrt{\frac{2g}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + \zeta}} \sqrt{h}$$

або

$$Q = c\sqrt{h}, \quad (4.2)$$

де c – величина, яка називається постійної витратоміра і рівна

$$c = \omega_2 \sqrt{\frac{2g}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + \zeta}}$$

Слід зазначити, що c є постійною величиною тільки для автомобельної області, а в загальному випадку c залежить від числа Рейнольдса. Знаючи цю величину і спостерігаючи за показаннями п'єзометрів, можна легко визначити витрату в трубопроводі за формулою

$$Q = c\sqrt{h}$$

Постійну c знаходять з експерименту, тобто в результаті тарування витратоміра.

У практиці вимірювань у лабораторії зазвичай використовується тарувальний графік (рисунок 4.2). Зв'язок між h і Q виходить параболічним, а якщо по осі абсцис відкладати квадрат витрати, то графік цієї залежності буде являти собою пряму.

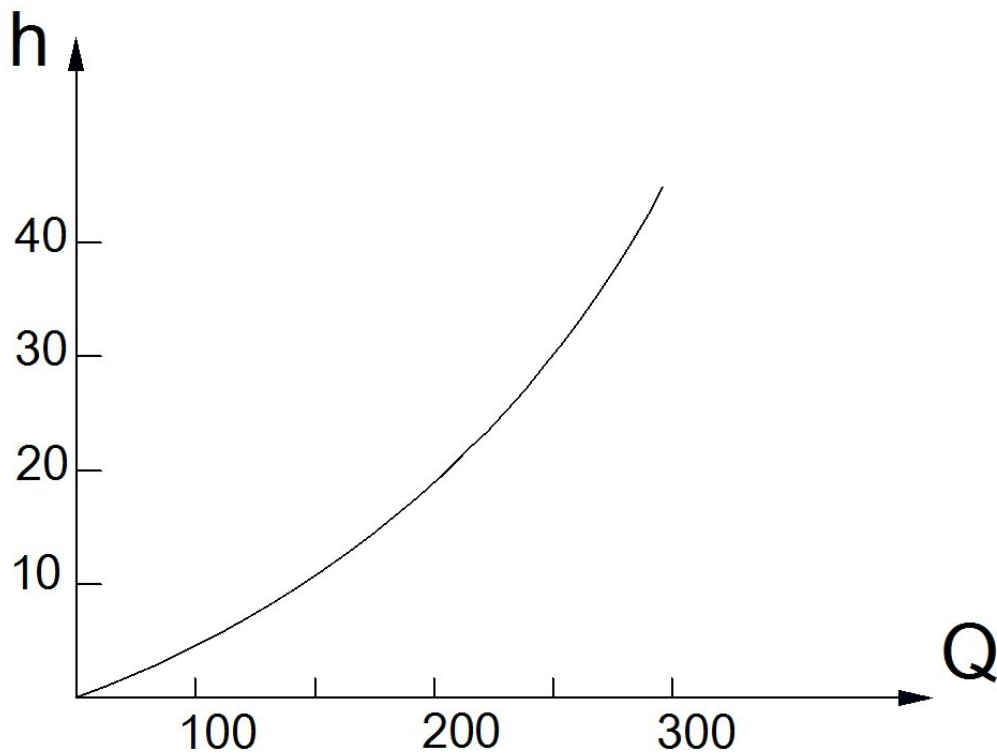


Рисунок 4.2

4.2 Опис дослідної установки

Досліди проводяться на установці для ілюстрації рівняння Бернуллі, схема якої описана в попередній роботі.

Для виконання цієї роботи необхідні секундомір і мірний резервуар.

4.3 Порядок проведення дослідів

4.3.1 Зняти показання по двох п'єзометрах – у початковому (широкому) і найвужчому перерізах трубопроводу і визначити різницю рівнів h

$$h = \left(Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right)$$

4.3.2 Визначити витрату Q , відповідну даному h об'ємним способом. Для чого за секундоміром знайти час наповнення t мірної ємності об'ємом W .

Для побудови графіка $Q = f(h)$ необхідно мати 4-5 значень Q і h .

Зміну витрати здійснити краном 2 (рисунок 3.3), а краном 4 встановити рівні в трубах на висоті, зручній для відліку.

4.4 Обробка результатів дослідів, оформлення звіту з роботи

Зробивши відліки по п'езометрах і замірявши час наповнення мірного резервуара, занести дані у відповідні графи протоколу випробувань.

За формулою (4.1) обчислити витрату Q , а за різницею відліків за п'езометрами – величину h . Підставивши отримані величини в залежність (4.2), визначити постійну витратоміра c , як середню арифметичну всіх дослідів

$$c = \frac{\sum c_i}{n},$$

де n – кількість дослідів.

Результати розрахунків занести в протокол випробувань (таблиця 4) і оформити звіт про роботу. Використовуючи дані дослідів Q і h нанести на графік експериментальні точки й отримати апроксимуючу криву $Q = c\sqrt{h}$.

Таблиця 4.1 – Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Номер дослідів	
			1	2
1 Показання 1-го п'єзометра	$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g}$	см		
2 Показання 2-го п'єзометра	$Z_2 + \frac{p_2}{\rho g}$	см		
3 Різниця відліків п'єзометрів	h	см		
4 Мірний об'єм	W	см ³		
5 Час наповнення мірного об'єму	t	с		
6 Об'ємна витрата	Q	см ³ /с		
7 Постійна витратоміра	c	см ^{5/2}		
8 Середнє арифметичне значення постійної c	$\frac{\sum c_i}{n}$	с		

Питання для самоконтролю

- 1 У чому полягає принцип роботи п'єзометричного водоміра?
- 2 Виведіть формулу для витратоміра Вентурі.
- 3 Від яких факторів залежить постійна витратоміра?
- 4 Де використовується крива зв'язку $h = f(Q)$?
- 5 Як вимірюється витрата об'ємним способом?

6 З якої причини у вузькій частині витратоміра Вентурі питома потенціальна енергія менша, ніж у широкій частини?

7 Чи враховуються втрати енергії при визначенні витрати п'єзOMETричним витратоміром? Якщо враховуються, то як?

Лабораторна робота 5

ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ ТЕЧІЇ РІДИНИ У ТРУБИ

Мета роботи

Мета роботи полягає в тому, щоб переглянути режими течії рідини в прозорій скляній трубці і визначити відповідні їм числа Рейнольдса.

5.1 Загальні положення

Можливі два режими течії рідини в трубах: ламінарний і турбулентний.

Ламінарний режим течії, або просто ламінарна течія – це шарувата течія без перемішування частинок рідини і без пульсації швидкостей і тисків. При ламінарній течії рідини в прямій трубці постійного перерізу всі лінії струму (траєкторії частинок) паралельні осі труби і, отже, прямолінійні. У загальному ж випадку ламінарної течії форма лінії струму визначається конфігурацією стінок, що обмежують потік.

Турбулентна течія – це течія, що супроводжується перемішуванням частинок рідини, пульсацією швидкостей і тисків. При турбулентній течії рух окремих частинок є безладним, а їх траєкторії мають різноманітний вигляд. Поряд з основним поздовжнім рухом частинок рідини спостерігається поперечне їх переміщення, що і викликає перемішування рідини.

Перехід від одного режиму течії до другого відбувається при певному співвідношенні між швидкістю течії v , діаметром труби d , кінематичною в'язкістю рідини ν і визначається безрозмірним числом, так званим критичним числом Рейнольдса

$$Re_{кр} = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (5.1)$$

де ν – критична швидкість, відповідна критичного числа Рейнольдса при даних d і ν .

Число значення критичного числа Рейнольдса для круглих труб не залежить від діаметра труби та в'язкості і приблизно дорівнює $R_{e_{кр}} = 2320$. Цей критерій, що характеризує зміну режиму течії, має універсальне значення для всіх рідин і газів.

Число Рейнольдса може бути підраховано не тільки при критичній, але й при фактичній швидкості v течії рідини в трубі, тоді

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

буде фактично числом Рейнольдса, яке існує в цьому випадку течії.

Умовою існування ламінарного режиму течії є нерівність

$$R_e < R_{e_{кр}}, \text{ тобто } R_e < 2320.$$

Це означає, що ламінарний режим течії наявний при малих (до 2320) числах R_e , що зазвичай буває при малих швидкостях, малих діаметрах або великій в'язкості.

При $R_e = 2320 \div 4000$ наявна перехідна область між ламінарним і турбулентним режимом, тобто не цілком розвинений турбулентний режим.

При $R_e > 4000$ режим течії зазвичай турбулентний.

Фізичний зміст числа Рейнольдса такий: це є величина, пропорційна відношенню сил інерції до сил тертя, викликаних в'язкістю. Маються на увазі сили, що діють у потоці рідини на ті чи інші її об'єми.

Число Рейнольдса має велике значення в гідравліці, оскільки є основним критерієм гідродинамічної подібності, тобто подібності потоків нестисливої рідини, яка складається з геометричної, кінематичної і динамічної подібності.

Для відкритих потоків (каналів, річок), а також труб, що працюють неповним перерізом (каналізаційні або дренажні труби), де за лінійний параметр приймають гідравлічний радіус R , критичне число Рейнольдса приймають рівним $Re_{R_{кр}}=580$ (індекс « R » у числа Re означає, що число обчислено за гідравлічним радіусом R).

5.2 Опис лабораторної установки

Схема лабораторної установки подана на рисунку 5.1. Вона складається з резервуара з водою 1, від якого відходить скляна труба 2 з краном 3 на кінці, і посудини 4 з водним розчином фарби, яка може по трубці 5 вводитися тонкою струминкою всередину потоку води в скляну трубу 2.

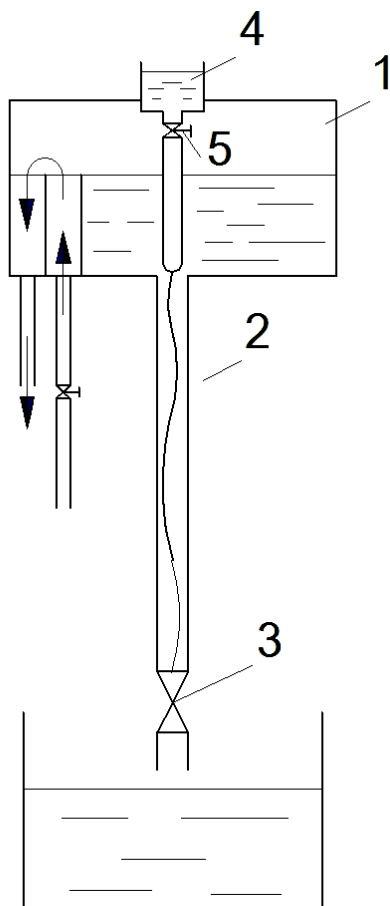


Рисунок 5.1

5.3 Порядок проведення дослідів

Спочатку встановлюється мала швидкість потоку води в трубі, при якій струминка фарби, що вводиться у воду, не перемішується з водою і зберігається чітко видимою уздовж усієї скляної труби. Режим течії при цьому є ламінарним.

Потім відкриттям крана 3 швидкість води збільшується і встановлюється така течія, при якій робиться помітним початок перемішування струменів і, отже, руйнування ламінарної структури потоку. Це означає перехід від ламінарного режиму течії до турбулентного.

Нарешті, кран 3 повністю відкривають, швидкість у трубі виходить найбільшою і спостерігається перемішування фарби з водою, тобто встановлюється турбулентний режим течії.

У кожному з перерахованих трьох випадків проводиться вимірювання об'єму води W за допомогою мензурки і часу її наповнення за секундоміром t , а також вимірюється температура води.

5.4 Обробка результатів дослідів і оформлення звіту з роботи

Маючи виміряний час заповнення мірного резервуара при ламінарному і при турбулентному режимах, обчислити витрату Q за формулою $Q = \frac{W}{t}$. За відомим діаметром $d = 1,5$ см трубопроводу, знайдений витраті Q , визначити число Рейнольдса

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d \nu}$$

За заміряною температурою води визначити кінематичну в'язкість ν за графіком $\nu = f(t)$. Зіставляючи отримані з дослідів

числа Рейнольдса з критичним числом $Re_{кр}$, зробити висновок про режим течії.

Результати відліків занести в протокол випробувань (таблиця 5.1) і оформити звіт з роботи.

Таблиця 5.1 – Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Номер досліджу	
			1	2
1 Мірний об'єм	W	см ³		
2 Час наповнення	t	с		
3 Об'ємна витрата	Q	см ³ /с		
4 Число Рейнольдса	Re			
5 Режим руху				

Питання для самоконтролю

- 1 Які режими руху рідини зустрічаються в природі?
- 2 Дайте коротку характеристику режимам руху.
- 3 Як визначити, який режим руху буде в тому чи іншому конкретному випадку?
- 4 Для чого необхідно знати режими руху рідини?
- 5 Від яких характеристик потоку залежить режим руху рідини?
- 6 Від яких факторів залежить кінематичний коефіцієнт в'язкості?
- 7 Що таке критична швидкість?
- 8 Як визначити режим руху в некруглій трубі?

Лабораторна робота 6 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВТРАТИ НАПОРУ НА ТЕРТЯ ПО ДОВЖИНІ ТРУБОПРОВОДУ

Мета роботи

Дослідне визначення величини коефіцієнта втрат на тертя λ_T при турбулентному режимі руху рідини в круглій трубі.

6.1 Загальні положення

Основною розрахунковою формулою для втрат напору на тертя при сталій течії рідини в круглій трубі постійного перерізу є формула Дарсі

$$h_{\text{тер}} = \lambda \frac{l v^2}{d 2g} = \lambda \frac{l 8Q^2}{\pi^2 g d^5}, \quad (6.1)$$

де λ – коефіцієнт втрат напору на тертя або коефіцієнт Дарсі;

l – довжина труби;

d – діаметр труби;

v – середня швидкість течії рідини.

Ця формула застосовна як при турбулентній, так і при ламінарній течії. Відмінність полягає лише в значеннях коефіцієнта λ . Цей коефіцієнт є функцією основного критерію подібності напірних потоків – числа Рейнольдса, а при турбулентному режимі також відносної шорсткості внутрішньої поверхні труби, тобто

$$\lambda = f\left(Re; \frac{\Delta}{d}\right),$$

де Δ – середня висота горбків шорсткості (абсолютна шорсткість).

При ламінарному режимі течії рідини втрата напору на тертя по довжині труби пропорційна швидкості (витраті) в першому ступені і визначається за формулою Пуазейля, яка має вигляд

$$h_{\text{тер}} = f \frac{128\nu\ell Q}{\pi g d^4} \quad (6.2)$$

Якщо ж цю формулу привести до вигляду формули Дарсі, то

$$h_{\text{тер}} = \lambda_{\text{л}} \frac{\ell \cdot v^2}{d \cdot 2g}, \quad (6.3)$$

де

$$\lambda_{\text{л}} = \frac{64}{Re}. \quad (6.4)$$

Користуючись формулою Дарсі при ламінарному режимі, не слід забувати, що втрата напору $h_{\text{тер}}$ пропорційна швидкості v в першому ступені; квадрат швидкості у формулі (6.3) отримано множенням і діленням виразу (6.2) на v . Коефіцієнт $\lambda_{\text{л}}$ у цьому випадку обернено пропорційний числу Рейнольдса, яке саме пропорційне швидкості v .

Таким чином, коефіцієнт $\lambda_{\text{л}}$ при ламінарному режимі залежить тільки від числа Рейнольдса $\lambda_{\text{л}} = f(Re)$, а формула (6.4), за якою він визначається, добре узгоджується з дослідними даними, отриманими для гладких і шорсткуватих круглих труб.

При турбулентному режимі течії в першому наближенні цей коефіцієнт $\lambda_{\text{л}}$ можна вважати постійним, а втрату напора $h_{\text{тер}}$ – пропорційною квадрату швидкості.

Однак при більш точному підході виявляється деяка залежність $\lambda_{\text{л}}$ від швидкості течії v , від діаметра труби d і в'язкості рідини ν , тобто від основного критерію гідродинамічної подібності числа Рейнольдса $Re = \frac{vd}{\nu}$.

Крім того, на значення λ_T впливає так звана шорсткість внутрішньої поверхні труби, що дорівнює відношенню деякої середньої висоти горбків шорсткості Δ до діаметра труби $\frac{\Delta}{d}$.

Таким чином, у цілому

$$\lambda_T = f\left(R_e, \frac{\Delta}{d}\right)$$

Найбільш зручною, що виражає цю функціональну залежність, при турбулентному режимі руху є універсальна формула Альтшуля

$$\lambda_T = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{R_e} \right)^{0,25} \quad (6.5)$$

При турбулентному режимі розрізняють три області опору. Перша область – область гідравлічно гладких труб, де коефіцієнт λ_T від шорсткості не залежить, а визначається лише числом R_e , тобто $\lambda_T = f(R_e)$. У цій області числа R_e і відносна шорсткість $\frac{\Delta}{d}$ мають малі значення, тому у формулі Альтшуля перший член $\frac{\Delta}{d}$ малий у порівнянні з другим $\frac{68}{R_e}$ і може бути відкинутий, а сама формула Альтшуля перетворюється у формулу Блазіуса

$$\lambda_T = 0,11 \left(\frac{68}{R_e} \right)^{0,25} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{R_e}} \quad (6.6)$$

У другій області опору коефіцієнт λ_T залежить одночасно від числа Re і від відносної шорсткості $\frac{\Delta}{d}$, тобто $\lambda_T = f\left(Re, \frac{\Delta}{d}\right)$ і може визначати формулою Альтшуля (6.5) в загальному вигляді.

Третя область – область, де коефіцієнт λ_T практично не залежить від числа Re , а визначається лише відносною шорсткістю $\frac{\Delta}{d}$. Пояснюється це тим, що товщина ламінарного шару зі збільшенням числа Рейнольдса стає дуже малою і горбки шорсткості обтікаються турбулентним потоком. Незалежність коефіцієнта λ від числа Рейнольдса робить у цій області втрати напора на тертя пропорційними квадрату швидкості (витраті). Тому цю сферу опору часто називають областю квадратичного опору, або автомобельною областю.

6.2 Опис дослідної установки

Основна частина дослідної установки являє собою горизонтальну мірну ділянку 1, виконану зі сталеві труби діаметром $d = 17 \text{ мм}$, довжиною $l = 1 \text{ м}$ (рисунок 6.1). Потік рідини подається до мірної ділянки від насоса 2 через напірний бачок 3, який згладжує коливання тиску води.

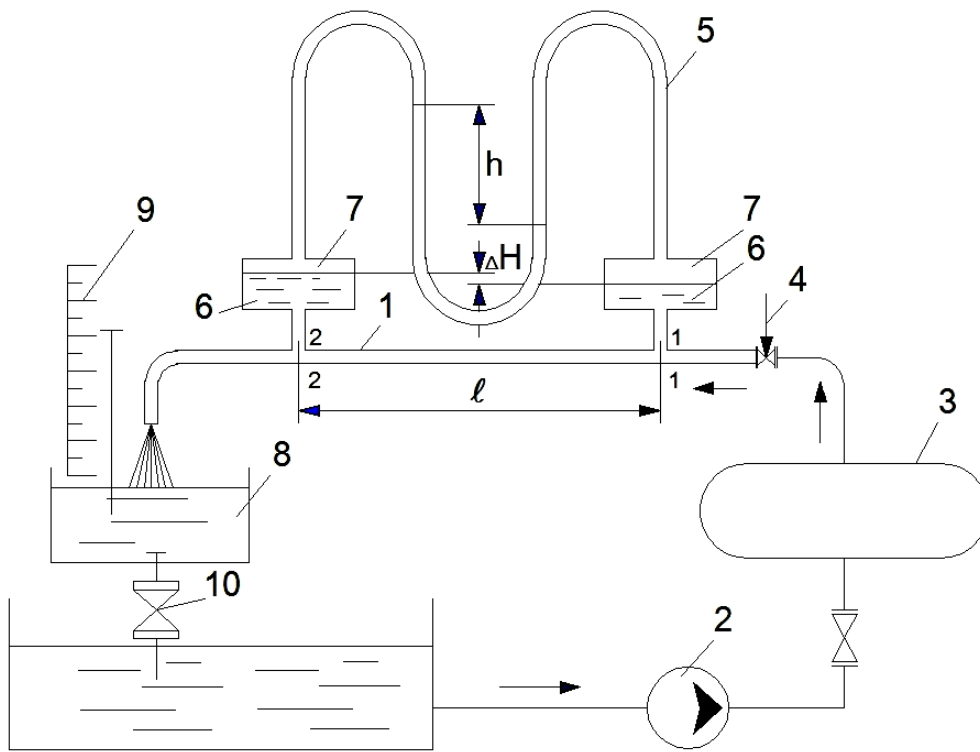


Рисунок 6.1

Для вимірювання втрат напору, які являють собою різницю тисків на вході і виході мірної ділянки (перерізи 1-1 і 2-2), до кінців мірної ділянки підключений U- подібний диференційний манометр 5, заповнений тетраброметаном за допомогою розділових бачків, як показано на рисунку. При цьому тиск до манометра передається через повітряні порожнини 7 розділових бачків 6. Різниця п'езометричних висот у перерізах 1-1 і 2-2 буде визначатися виразом

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \Delta H + h \frac{\rho_{\text{тет}}}{\rho_{\text{в}}}$$

Так як ΔH дуже мала величина, нею можна знехтувати, тоді

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = h \frac{\rho_{\text{тет}}}{\rho_{\text{в}}} = h_{\text{тр}}$$

де $\rho_{\text{тер}}$ і $\rho_{\text{в}}$ – відповідно густина рідини, залитої в манометр, і робочої рідини в мірній ділянці.

Так, за показниками диференційного манометра визначаються втрати напору на тертя. Втрати напору $h_{\text{тер}}$ можуть також визначатися за механічним манометром, приєднаним до перерізів 1-1 і 2-2 замість диференційного манометра.

Швидкість руху рідини на мірній ділянці 1 регулюється за допомогою крана 4.

Витрата води визначається об'ємним способом за допомогою мірного бака 8.

6.3 Порядок проведення дослідів

6.3.1 Увімкнути електродвигун насоса.

6.3.2 За допомогою крана 4 встановити рекомендовану витрату рідини в мірній ділянці.

6.3.3 Записати показання диференційного манометра у відповідну графу протоколу випробувань.

6.3.4 Заміряти витрату рідини, що проходить через мірну ділянку 1, об'ємним способом. Для цього потік направити з трубопроводу 1 у мірний бак 8, одночасно вмикаючи секундомір. При наповненні 10 літрів (відлік ведуть за шкалою 9 над мірним баком 8) секундомір вимкнути й одночасно спрямувати потік від мірного бака у відповідний канал за допомогою зливного пристрою 10.

6.3.5 Дослід повторити 3-4 рази при різних витратах.

6.3.6 Після закінчення дослідів закрити кран 4 і вимкнути електродвигун насоса.

6.4 Обробка результатів дослідів і оформлення звіту з роботи

Для визначення коефіцієнта втрат напору на тертя $\lambda_{\text{т}}$, насамперед слід показання диференційного манометра h ,

виражені висотою тетраброметанового стовпа рідини, перевести в метри водяного стовпа. Для цього необхідно отриману величину h збільшити на $\frac{\rho_{\text{тет}}}{\rho_{\text{в}}} = 2,96$.

Об'ємна витрата визначається за формулою, м³/с,

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

де W – мірний об'єм. Зазвичай $W = 0,01 \text{ м}^3$.

Знаючи Q , можна визначити середню швидкість течії води на мірній ділянці, м/с:

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

де $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа поперечного перерізу труби ($d_{\text{труби}} = 17 \text{ мм}$).

Далі з формули Дарсі обчислити дослідне значення коефіцієнта втрат на тертя $\lambda_{\text{т}}$ за формулою

$$\lambda_{\text{т}} = \frac{h_{\text{тер}} \pi^2 g d^5}{8 \ell Q^2},$$

де $h_{\text{тер}}$ і Q взяті з досліду;

і число Рейнольдса $R_e = \frac{v_1 d}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d \nu}$.

Кінематична в'язкість ν залежить від температури води і визначається за графіком (рисунок 6.2, а).

Потім будується графік залежності $\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}$. При цьому ординатою є величина з абсцисою $\lg Re$. Якщо ліву і праву частини рівності помножити на 100, а потім прологарифмувати, то отримаємо лінійну залежність $\lg(100\lambda) = 1,5 - \lg Re$, яка використовується для побудови графіка (рисунок 6.2, б).

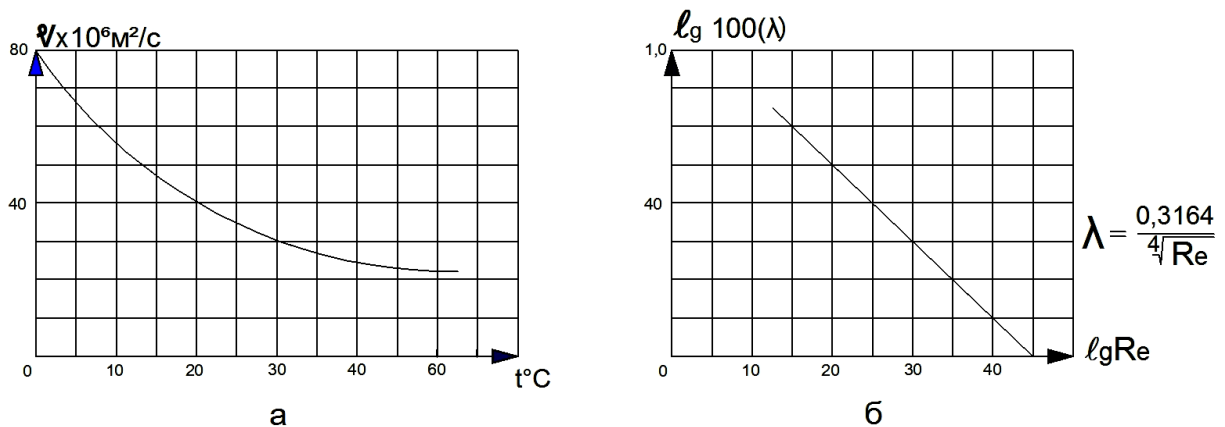


Рисунок 6.2

Для порівняння на цьому графіку нанести результати, отримані в роботі. Дослідні значення λ і Re в координатах $\lg(100\lambda)$ і Re виділити кружками або трикутниками. Крім цього, побудувати графік залежності втрат напору від витрати $h_{тер} = f(Q)$.

Результати розрахунків занести в протокол випробувань (таблиця 6.1) і оформити звіт про роботу.

Таблиця 6.1 – Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Номер дослідів			
			1	2	3	4
1 Показання диферен-						

ційного манометра	h	см				
2 Втрати напору	$h_{\text{тер}}$	см				
3 Мірний об'єм	W	см ³				
4 Час наповнення	t	с				
5 Об'ємна витрата	Q	см ³ /с				
6 Коефіцієнт втрат на тертя	λ					
7 Число Рейнольдса	Re					

Питання для самоконтролю

- 1 Як визначити втрати напору на тертя?
- 2 Від чого залежить λ при турбулентному і ламінарному режимах?
- 3 Яким способом визначається об'ємна витрата в досліді?
- 4 Який трубопровід вважається гідравлічно гладким, а який шорстким?
- 5 Пояснити, як змінюється швидкість уздовж мірної ділянки.
- 6 Як зміниться величина $h_{\text{тер}}$, якщо при незмінній витраті збільшити діаметр труби?
- 7 Чи зміняться втрати напору на тертя при ламінарному режимі руху, якщо збільшити шорсткість труби?
- 8 Який трубопровід вважається гідравлічно гладким?
- 9 Яким чином у досліді вимірюються втрати напору на мірній ділянці трубопроводу?

Лабораторна робота 7 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА МІСЦЕВОГО СПРОТИВУ

Мета роботи

Визначення коефіцієнта втрат у діафрагмі дослідним шляхом.

7.1 Загальні положення

Як відомо, гідравлічні втрати (втрати повного напору або питомої енергії) поділяють на два види: втрати на тертя по довжині трубопроводу і місцеві втрати.

У цій роботі вивчаються місцеві втрати напору, обумовлені так званими місцевими гідравлічними опорами. Місцеві гідравлічні опори являють собою місцеві зміни форми і розміру русла, викликають деформацію потоку.

Найпростішими місцевими опорами є розширення, звуження і поворот русла. Більш складні опори являють собою поєднання перерахованих найпростіших.

Місцевим гідравлічним опором, який досліджується в цій роботі, є діафрагма, встановлена в трубі, що викликає раптове звуження і розширення потоку.

Причинами втрат у місцевих опорах, як правило, є вихороутворення, тертя, вторинні течії. Якщо в трубі встановлена діафрагма втрати напору обумовлені головним чином вихороутворенням внаслідок відриву потоку від стінок труби.

Величина втрат напору на місцеві гідравлічні опори визначається за формулою Вейсбаха

$$h_m = \zeta_m \frac{v^2}{2g} = \zeta_m \frac{8Q^2}{\pi^2 g d^4}, \quad (7.1)$$

де h_m – місцеві втрати напору;

ζ_m – безрозмірний коефіцієнт місцевого опору;

v – середня по перерізу швидкість у трубі;

Q – об'ємна витрата;

d – діаметр труби.

Коефіцієнти місцевих опорів в загальному випадку залежать від форми місцевого опору і числа Рейнольдса. У разі місцевих опорів, що викликають відрив потоку від фіксованих ліній і пов'язаним з ним вихреброоброзованням, як наприклад, в діафрагмі, коефіцієнт місцевого опору залежить практично тільки від форми місцевого опору.

У більшості випадків чисельні значення коефіцієнтів місцевих опорів отримують дослідним шляхом, через складність явищ, що відбуваються при русі рідини через місцевий опір.

7.2 Опис лабораторної установки

Дослідна установка, схема якої подана на рисунку 7.1, являє собою трубопровід постійного перерізу $d = 17 \text{ мм}$, усередині якого розташована діафрагма 11. Потік рідини подається до мірної ділянки 1 від насоса 2 через напірний бачок 3. Вода, що проходить через трубопровід із діафрагмою, потрапляє в мірний резервуар 8, а потім у відвідний канал за допомогою зливного пристрою 10. Швидкість рідини регулюється шляхом зміни ступеня закриття крана 4. Для вимірювання втрат напору в діафрагмі використовується U-подібний диференційний манометр 5, заповнений тетраброметаном (відносна густина 2,98), підключений до перерізів (1-1) до і (2-2) після діафрагми за допомогою розділового бачка 6. При цьому тиск до манометра передається через повітряні порожнини 7 цих бачків. Так як різниця рівнів у розділових бачках ΔH дуже мала, нею можна нехтувати.

Тоді втрати напору, виражені в метрах водного стовпа, можна визначити так:

$$h' = h \frac{\rho_{\text{тет}}}{\rho_{\text{в}}},$$

де $\rho_{\text{тет}}$ и $\rho_{\text{в}}$ – відповідно густина тетраброметану і води;

h – різниця показань диференційного манометра.

Втрати напору можуть бути визначені також механічними манометрами, які підключені у тих же перерізах трубопроводу. Різниця показань манометрів і буде шуканою втратою напору

$$h' = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho g}$$

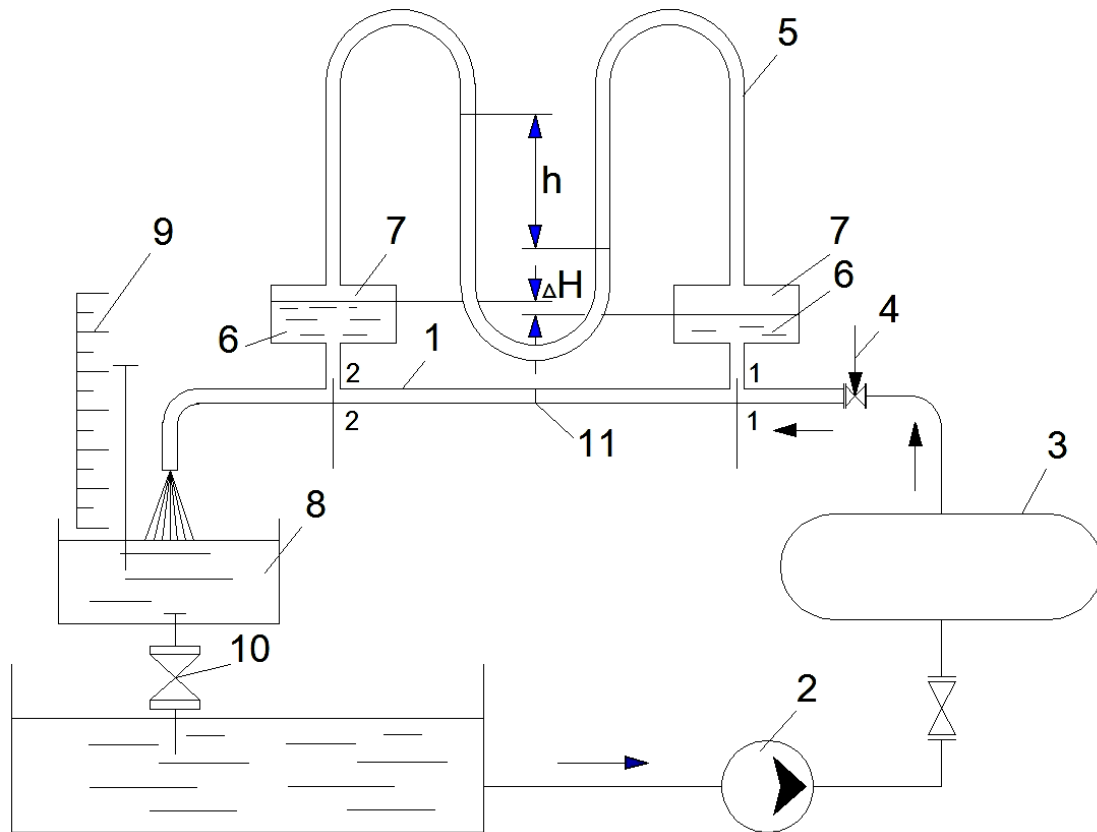


Рисунок 7.1

7.3 Порядок проведення досліду

7.3.1 Увімкнути електродвигун насоса.

7.3.2 За допомогою крана 4 встановити рекомендовану витрату рідини в трубопроводі 1.

7.3.3 Після встановлення показань тетраброметанового диференційного манометра, які являтимуть собою різницю рівнів тетраброметану у U-Подібному диференційному манометрі h , записати ці показання у відповідну графу протоколу випробувань.

7.3.4 За допомогою мірного бака за шкалою 9 і секундоміра визначити витрату об'ємним способом.

7.3.5 Після закінчення досліду закрити кран 4, вимкнути електродвигун насоса.

7.4 Обробка результатів досліду й оформлення звіту з роботи

Обчислити втрати напору, для чого різницю показань диференційного манометра, рівну h в метрах тетрабромметанового стовпа збільшити у 2,98 рази й отримати втрати напору h' в метрах водяного стовпа.

Слід звернути увагу, що в цій роботі h' – втрати напору, які покаже диференційний манометр, будуть являти собою суму втрат напору на тертя в мірній ділянці і втрати в діафрагмі

$$h' = h_{\text{тер}} + h_{\text{д}}$$

Щоб отримати втрати в діафрагмі, необхідно визначити втрати на тертя за формулою Дарсі

$$h_{\text{тер}} = \lambda \frac{\ell v^2}{d \cdot 2g} = \lambda \frac{\ell \cdot 8Q^2}{\pi^2 g d^5},$$

де величина коефіцієнта втрат на тертя λ приймається рівною значенню, обчисленому в попередній роботі.

Знаючи $h_{\text{тер}}$, відняти їх значення від загальних втрат і визначити втрати в діафрагмі

$$h_{\text{д}} = h' - h_{\text{тер}}$$

Потім визначити витрату рідини за формулою $Q = \frac{W}{t}$, м³/с, після чого обчислити середню швидкість руху рідини по трубі, м/с:

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

Дослідне значення коефіцієнта втрат у діафрагмі визначити за формулою Вейсбаха

$$\zeta_d = \frac{\pi^2 g d^4 h_d}{8Q^2}$$

Результати розрахунків занести в протокол випробувань (таблиця 7.1) і оформити звіт з роботи.

Таблиця 7.1 – Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Номер досліджу	
			1	2
1 Показання диференційного манометра	h	см		
2 Втрати напору	h'	см		
3 Коефіцієнт втрат на тертя	λ			
4 Втрати на тертя	$h_{\text{тер}}$	см		
5 Втрати в діафрагмі	h_d	см		
6 Мірний об'єм	W	см ³		
7 Час наповнення мірного об'єму	t	с		
8 Об'ємна витрата	Q	см ³ /с		
9 Коефіцієнт втрат напору в діафрагмі	ζ_d			
10 Число Рейнольдса	Re			

Питання для самоконтролю

1 Що являють собою місцеві опори?

- 2 Від чого залежить величина коефіцієнта місцевих опорів ζ_m ?
- 3 За якою формулою визначаються місцеві втрати напору?
- 4 Як визначається ζ_d дослідним шляхом?

Лабораторна робота 8 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ВИТРАТИ ОТВОРІВ І НАСАДКІВ

Мета роботи

Дослідне визначення коефіцієнта витрати μ при витіканні через круглий отвір і циліндричний насадок, приєднаний до даного отвору.

8.1 Загальні положення

Отвір вважається малим, якщо його розміри у багато разів менші (не менше 20) від величини напору.

Насадком називається короткий патрубок, приєднаний до отвору в тонкій стінці, довжина якого $l = (3 \div 4)d$.

Насадки бувають циліндричні, конічні та інших форм. Циліндричні насадки підрозділяються на зовнішні і внутрішні, а конічні, крім того, на ті, що сходяться, і ті, що розходяться (рисунок 8.1 а – г).

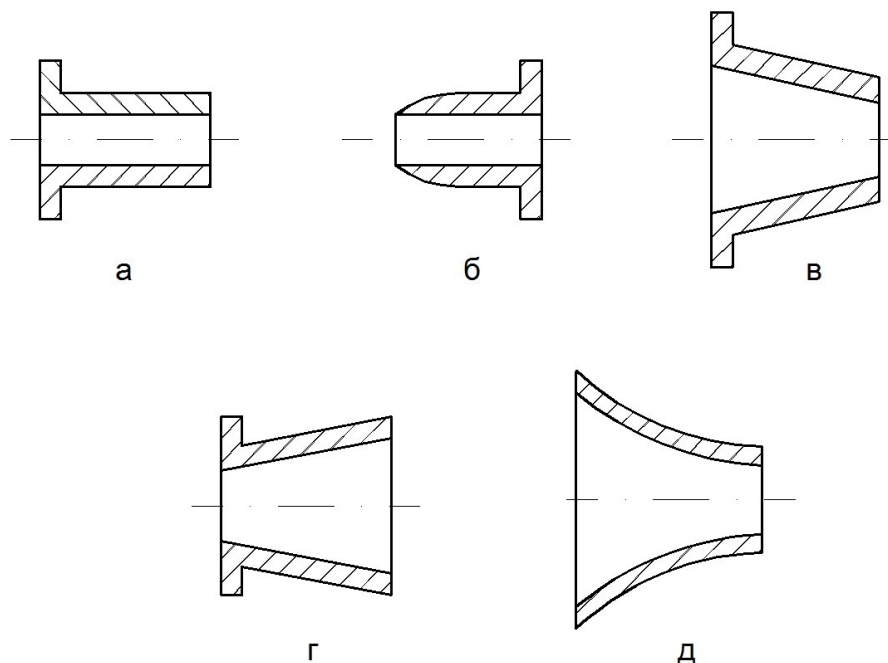


Рисунок 8.1

Насадок, виконаний за формою стинутого струменя, називається коноїдальним насадком (рисунок 8.1, д).

Для розрахунку швидкості v і витрати рідини Q при витіканні через отвори або насадки (рисунок 8.2) використовують формули:

$$v = \varphi \sqrt{2gH}; \quad Q = \mu \omega \sqrt{2gH} \quad (8.1)$$

де ω – площа отвору або насадка;

$$H = Z_0 + \frac{p_0 - p_a}{\rho g} \quad \text{– розрахунковий напір;}$$

μ – коефіцієнт витрати, рівний добутку коефіцієнта стиснення струменя ε на коефіцієнт швидкості φ

$$\mu = \varepsilon \varphi;$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}} \quad \text{– коефіцієнт швидкості;}$$

ζ – коефіцієнт опору.

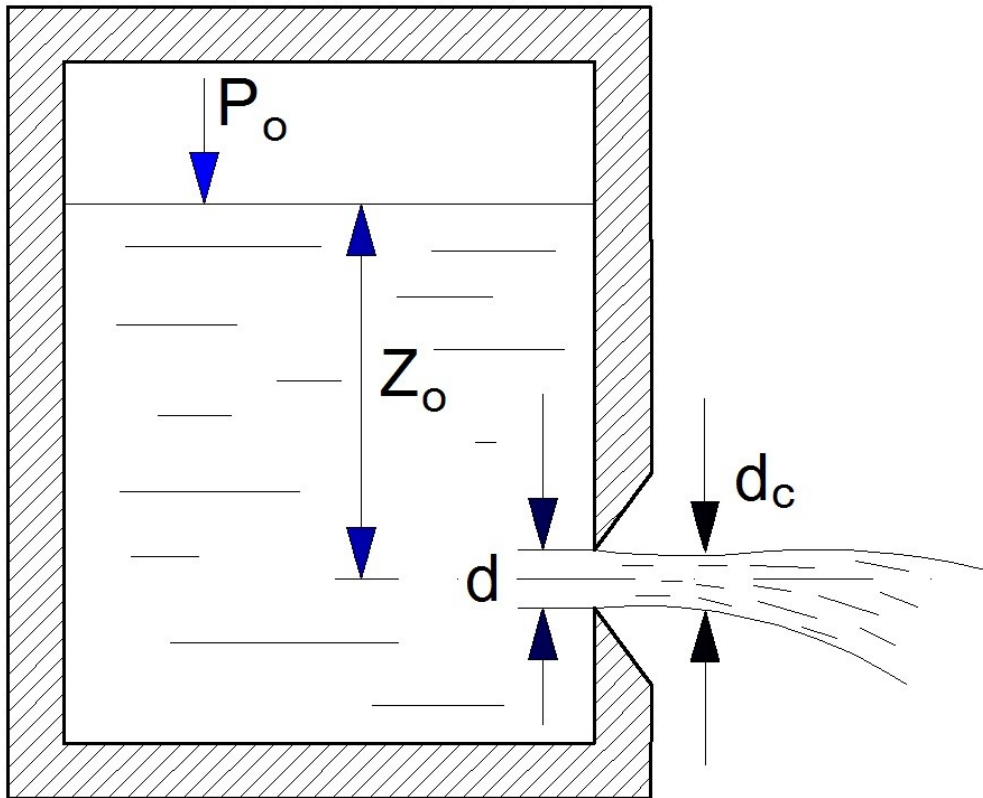


Рисунок 8.2

Якщо втрат немає $\zeta = 0$, коефіцієнт швидкості $\varphi = 1$. Таким чином, коефіцієнт швидкості дорівнює відношенню дійсної швидкості v_d витікання до теоретичної v_T , яка була б у разі відсутності втрат.

Фізичний зміст коефіцієнта витрати – це відношення дійсної витрати рідини до витрати теоретичної, тобто якщо немає стиснення струменя ($\varepsilon = 1$) і опору ($\zeta = 0, \varphi = 1$)

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

Числове значення коефіцієнта витрати μ залежить від форми отвору або насадка і від числа Рейнольдса.

При витіканні через зовнішній циліндричний насадок струмінь усередині насадка звужується, а потім розширюється і з насадка витікає повним перерізом (рисунок 8.3), отже, $\varepsilon = 1$ і

$\mu = \varphi$. Кільцевий простір навколо струменя заповнений вихорами.

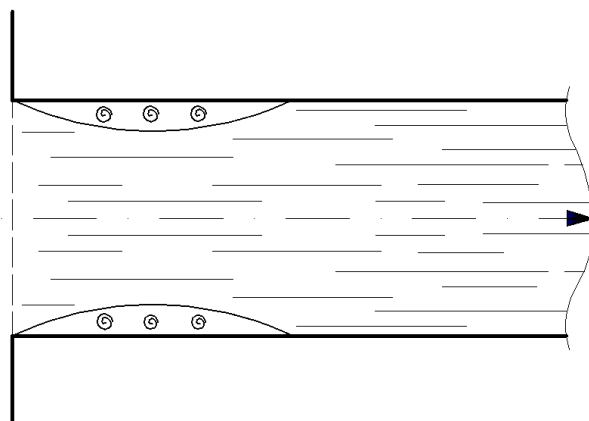


Рисунок 8.3

Унаслідок стиснення і подальшого розширення струменя всередині насадка при витіканні в атмосферу виникає вакуум ($p_{абс} < p_{атм}$). Чим більший напір H , під дією якого відбувається витікання, тим менший абсолютний тиск $p_{абс}$ у звуженому перерізі струменя. При деякому напорі тиск усередині насадка може знизитися настільки, що у вузькому перерізі струменя почнеться **кавітація** (холодне кипіння).

Кавітація – це порушення суцільності потоку рідини, обумовлене появою в ній бульбашок або порожнин, заповнених паром або газом. Кавітація виникає при зниженні тиску, унаслідок чого рідина закипає або з неї виділяється розчинений газ.

Подальше збільшення напору призведе до того, що область кавітації буде розширюватися, а потім відбудеться відрив струменя від стінок насадка, настане другий режим витікання - витікання через отвір у тонкій стінці (рисунок 8.4). Напір, при якому відбувається перехід від першого режиму до другого, називається критичним.

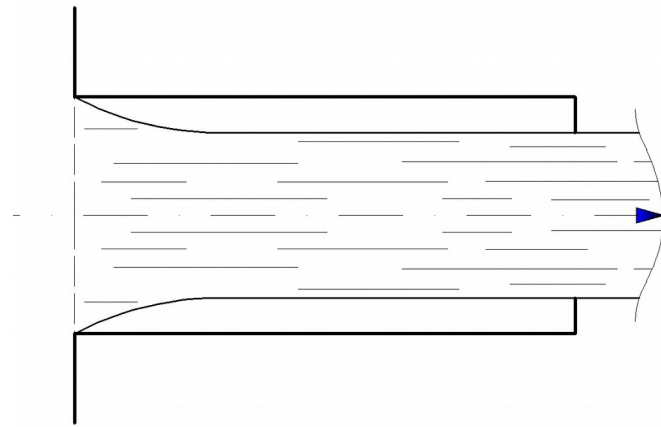


Рисунок 8.4

Приблизно значення критичного напору можна знайти з умови, що у вузькому перерізі абсолютний тиск дорівнює 0 ($p_{\text{абс}} = 0$).

8.2 Опис дослідної установки

До резервуара 1 з випробуваним отвором або насадком вода подається через кран 3 від насоса 4. По закінченні через насадок вода потрапляє в мірний бак 5. За допомогою манометра 2 (рисунок 8.5), встановленого на верхній твірній резервуара, вимірюється надлишковий тиск рідини $p_{\text{надл}}$.

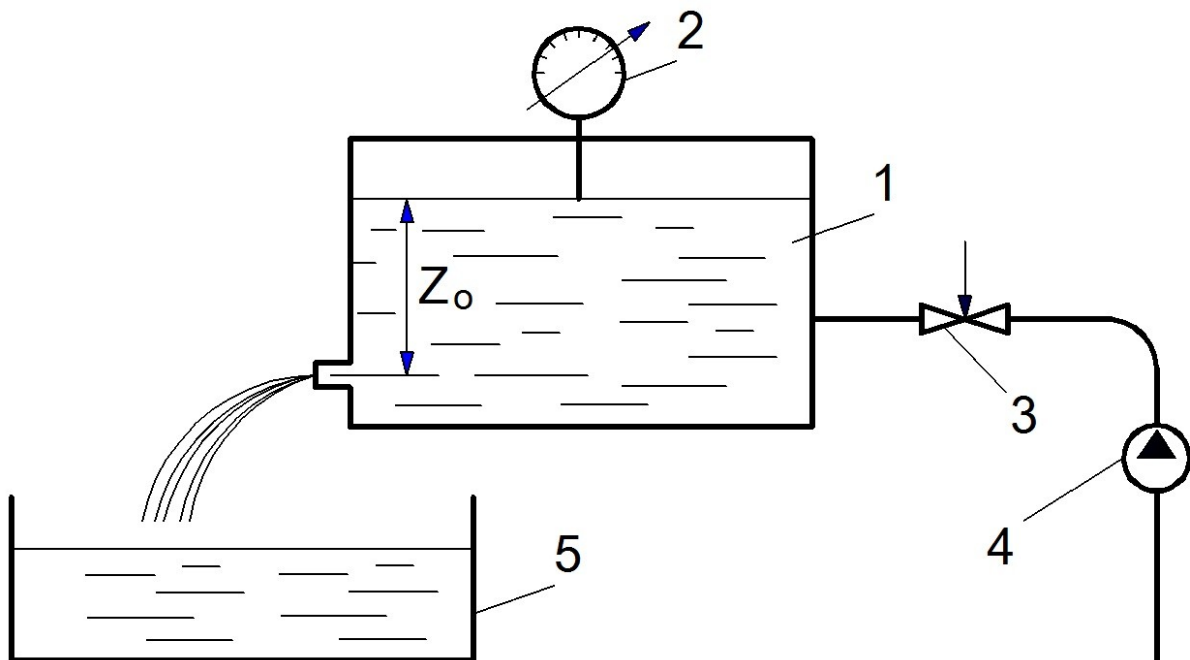


Рисунок 8.5

Тоді розрахунковий напір буде визначатися виразом

$$H = Z_0 + \frac{p_{\text{надл}}}{\rho g} \approx \frac{p_{\text{надл}}}{\rho g} .$$

8.3 Порядок проведення дослідів

8.3.1 Установити досліджуваний круглий отвір.

8.3.2 Увімкнути електродвигун насоса.

8.3.3 Відкрити кран 3 і встановити деякий тиск за показанням манометра.

8.3.4 За секундоміром визначити час, протягом якого через круглий отвір витікає заданий об'єм рідини W .

8.3.5 Закрити кран, замінити отвір на циліндричний насадок і повторити дослід.

8.3.6 Записати дослідні показання у відповідні графи журналу виконання лабораторних робіт.

8.3.7 Заглушити отвір і вимкнути електродвигун.

8.4 Обробка результатів дослідів і оформлення звіту з роботи

Дійсна витрата через отвір або насадок, $\text{см}^3/\text{с}$

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

де W – мірний об'єм;

t – час його заповнення.

Теоретична витрата

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

де ω – площа перерізу отвору або насадка;

H – розрахунковий напір.

Діаметри отвору і насадка вказані на лабораторній установці.

Тоді коефіцієнт витрати
$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$$

Результати розрахунків занести в протокол випробувань (таблиця 8.1) і оформити звіт з роботи.

Таблиця 8.1 – Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Номер досліджу	
			1	2
1 Показання манометра	$H = \frac{p_{\text{надл}}}{\rho g}$	умов. поділ.		
2 Тиск за манометром		кгс/см ²		
3 Розрахунковий напір		см		
4 Площа отвору				

5 Мірний об'єм	ω	см^2		
6 Час наповнення	W	см^3		
7 Дійсна об'ємна витрата	t	с		
	$Q = \frac{W}{t}$	$\text{см}^3/\text{с}$		
8 Теоретична витрата	Q_T	$\text{см}^3/\text{с}$		
9 Коефіцієнт витрати	μ			

Питання для самоконтролю

- 1 Яким чином у досліді вимірюється дійсна витрата рідини при витіканні через насадок?
- 2 Що називається коефіцієнтом стиснення струменя?
- 3 Яким чином у досліді визначається розрахунковий напір рідини?
- 4 Що називається коефіцієнтом швидкості і коефіцієнтом витрати?
- 5 Що таке перший і другий режими витікання з циліндричного насадка?

Лабораторна робота 9 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО УДАРУ В ТРУБІ

Мета роботи

Дослідне визначення величини підвищення тиску в трубопроводі.

9.1 Загальні положення

Гідравлічним ударом називають періодичний процес різкого підвищення і зниження тиску в трубопроводі при раптовому гальмуванні потоку. Різке гальмування потоку рідини відбувається при швидкому закритті крана, золотника або клапана. У початковий момент при цьому виникає значне, різке зростання тиску на величину $\Delta p_{уд}$. Кінетична енергія потоку переходить у роботу пружних деформацій рідини і стінок труби – рідина стискається, а стінки труби розтягуються.

Уперше теоретично й експериментально гідравлічний удар досліджував М.Є. Жуковський. Результати його роботи були опубліковані у 1898 р. Ним же була отримана і формула підвищення тиску при гідравлічному ударі

$$\Delta p_{уд} = \rho v_0 C, \quad (9.1)$$

де ρ – густина рідини;

v_0 – швидкість потоку в трубі до перекриття перерізу;

C – швидкість поширення ударного тиску (ударної хвилі) по трубопроводу, що залежить від пружних властивостей рідини і матеріалу стінок труби.

Швидкість поширення ударної хвилі визначається за такою формулою

$$C = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \frac{dK}{\delta E}}}, \quad (9.2)$$

де c_0 – швидкість звуку в рідині;

K – об'ємний модуль пружності рідини;

- E – модуль пружності матеріалу стінок труби;
 d – діаметр труби;
 δ – товщина стінок труби.

Для трубопроводу з абсолютно жорсткими стінками величина $E = \infty$, а швидкість ударної хвилі C виявляється рівною швидкості звуку в рідині, тобто

$$C_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Для води $C_0 = 1450 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Мала стисливість крапельних рідин і велика жорсткість стінок металевих труб є причиною виникнення великого ударного тиску $\Delta p_{\text{уд}}$. У гнучких шлангах, а також газопроводах підвищення тиску при різкому гальмуванні рухомого середовища мізерно мале завдяки малій жорсткості стінок і досить великій стисливості середовища.

Формула (9.1) справедлива для так званого **прямого удару**, коли час закриття запірною пристрою

$$t_{\text{зак}} < t_0 = \frac{2\ell}{c},$$

де $t_0 = \frac{2\ell}{c}$ – фаза гідравлічного удару, час необхідний для пробігу ударної хвилі від крана до початку трубопроводу довжиною ℓ і назад

При $t_{\text{зак}} > t_0$ буде **непрямий удар**. Ударний тиск $\Delta p_{\text{уд}}$ виходить меншим, ніж при прямому ударі, оскільки в момент

підходу фронту відбитої ударної хвилі до запірного пристрою він не повністю закритий і пропускає через себе деяку кількість рідини, пом'якшуючи при цьому удар.

Формула для визначення ударного тиску при непрямому ударі має вигляд

$$\Delta p'_{\text{уд}} = \frac{2\rho\ell v}{t_{\text{зак}}} \quad (9.3)$$

Як видно з формули (9.3), чим більший час закриття запірного пристрою $t_{\text{зак}}$, тим менше підвищення тиску при непрямому гідравлічному ударі.

9.2 Опис дослідної установки

Лабораторна установка складається з витратного бака 1 (рисунок 9.1), до якого приєднаний трубопровід 2 довжиною $\ell = 15$ м з внутрішнім діаметром $d = 18$ мм і товщиною стінки $\delta = 3$ мм та зливного бака 5. Наприкінці дослідного трубопроводу перед краном установлений манометр 3, призначений для фіксації максимального значення ударного тиску. Корковий кран 4 при швидкому його закритті створює гідравлічний удар у трубопроводі.

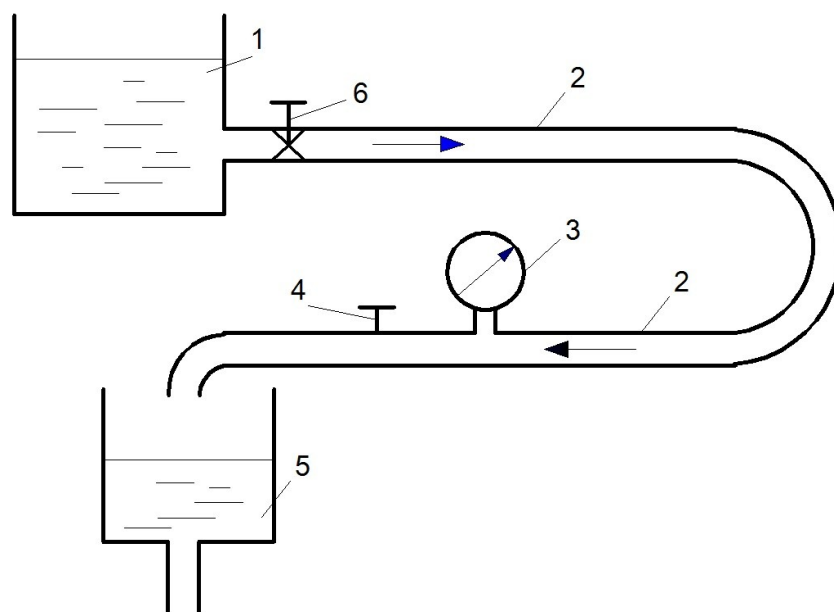


Рисунок 9.1

9.3 Порядок проведення дослідів

9.3.1 Установити на нуль стрілку манометра і фіксує стрілку.

9.3.2 За допомогою регульовального крана 6 установити ту чи іншу витрату і провести її вимірювання об'ємним способом.

9.3.3 Поворотом крана 4 проти годинникової стрілки здійснити швидке його закриття, що призведе до гідравлічного удару в магістралі.

9.3.4 За манометром (по фіксуючій стрілці) визначити $\Delta p_{уд}$.

9.3.5 При повторенні дослідів слід відкрити корковий кран і фіксує стрілку манометра встановити в початкове положення.

9.4 Обробка результатів дослідів й оформлення звіту з роботи

Об'ємна витрата води в трубопроводі, м³/с:

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

Швидкість потоку в трубопроводі

$$v = \frac{Q}{\omega},$$

де $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа поперечного перерізу труби.

За формулою (9.2) визначити значення швидкості поширення ударної хвилі в трубопроводі. У розрахунках прийняти значення об'ємного модуля пружності води

$K = 2,1 \cdot 10^4$ кг/см² або $K = 2,1 \cdot 10^9$ Н/м² та модуля пружності матеріалу стінок труби $E = 2,1 \cdot 10^6$ кг/см² = $2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м².

За формулою (9.1) розрахувати теоретичне підвищення тиску при гідравлічному ударі.

Дослідне значення підвищення тиску при гідравлічному ударі визначаємо за манометром.

Результати обчислень занести в протокол випробувань (таблиця 9.1) і оформити звіт з роботи.

Таблиця 9.1 – Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Номер дослідів	
			1	2
1 Мірний об'єм	W	см/с		
2 Час заповнення мірного об'єму	t	с		
3 Об'ємна витрата	Q	см ³ /с		
4 Швидкість потоку в трубопроводі	v	см/с		
5 Швидкість поширення ударної хвилі	c	см/с		
6 Підвищення тиску за формулою Жуковського	$\Delta p_{уд}$	атм		
7 Підвищення тиску за манометром	p	атм		
8 Період удару	T	с		
9 Кількість поділок за манометром				

Питання для самоконтролю

- 1 Що називається гідравлічним ударом?
- 2 Як визначається швидкість руху рідини в трубопроводі?

3 Яким чином у досліді вимірюється величина підвищення тиску при гідравлічному ударі?

4 Що називається прямим і непрямим ударом?

5 Як визначається підвищення тиску при прямому ударі?

6 Як визначається підвищення тиску при непрямому ударі?

Лабораторна робота 10 ВИПРОБУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА

Мета роботи

Експериментальне визначення залежності напору насоса від подачі Q при постійній частоті обертання n .

Загальні положення

Насос – це гідравлічна машина, у якій механічна енергія привода передається рідині. Це забезпечує рух рідини по трубопроводу.

Найбільшого поширення набули два типи насосів: лопатеві і об'ємні.

Відцентровий насос (рисунок 10.1) належить до лопатевих насосів.

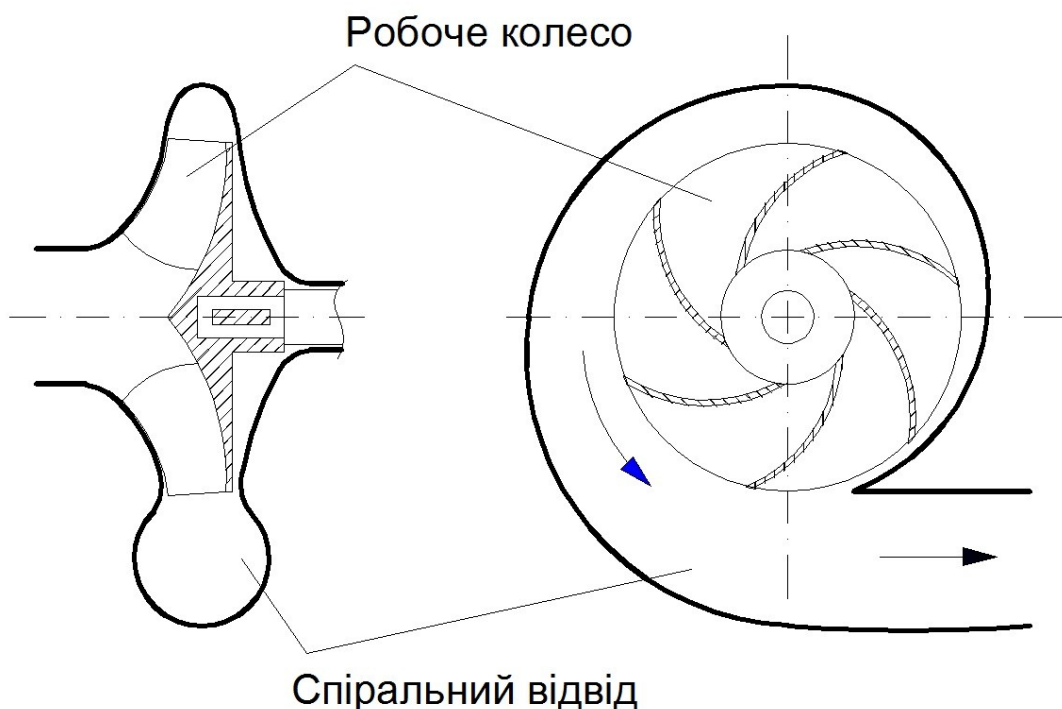


Рисунок 10.1

Його проточна частина складається з робочого колеса, оснащеного лопатками, і спірального відводу. Принцип дії відцентрового насоса полягає в силовому впливі лопаток

робочого колеса на рідину, що протікає між ними, тобто в безперервному відкиданні рідини лопатками колеса від центру до периферії в спіральний відвід.

Робота насоса характеризується його подачею, напором, потужністю, ККД і частотою обертання вала насоса.

Подачею насоса Q називається витрата рідини, що забезпечується насосом.

Напір насоса а $H_{\text{нас}}$ – це прирощення питомої енергії (повного напору) рідини в насосі, або це енергія, що надається насосом одиниці ваги (об'єму або маси) рідини. Ураховуючи, що питома енергія рідини складається з трьох доданків (див. лабораторну роботу 3), можна записати для одиниці ваги

$$H_{\text{нас}} = \left(Z_{\text{н}} + \frac{p_{\text{н}}}{\rho g} + \frac{v_{\text{н}}^2}{2g} \right) - \left(Z_{\text{в}} + \frac{p_{\text{в}}}{\rho g} + \frac{v_{\text{в}}^2}{2g} \right),$$

де індекс «н» – нагнітання або вихід з насоса, а індекс «в» – всмоктування або вхід у насос.

При однакових діаметрах всмоктуючого і напірного патрубків насоса $d_{\text{в}} = d_{\text{н}}$ будуть однаковими і швидкості $v_{\text{в}} = v_{\text{н}}$ і в рівнянні різниця швидкісних напорів буде дорівнювати нулю.

Різниця нівелірних висот ураховує відмінність висот розташування перерізів, у яких заміряється тиск $p_{\text{н}}$ і $p_{\text{в}}$. Для насоса цією різницею висот можна знехтувати. Тоді

$$H_{\text{нас}} = \left(Z_{\text{н}} + \frac{p_{\text{н}} - p_{\text{в}}}{\rho g} + \frac{v_{\text{н}}^2 - v_{\text{в}}^2}{2g} \right)$$

при $v_{\text{в}} = v_{\text{н}}$

$$H_{\text{нас}} = \frac{p_{\text{н}} - p_{\text{в}}}{\rho g}$$

Корисна потужність насоса або потужність, що розвивається насосом, – це енергія, що передається насосом рідини в одиницю часу. Якщо врахувати, що вагова витрата рідини через насос дорівнює $\rho g Q$, а кожна одиниця ваги рідини набуває в насосі енергію, рівну $H_{\text{нас}}$, то корисну потужність насоса можна виразити таким чином:

$$N_{\text{нас}} = N_{\text{пол}} = \rho g Q H_{\text{нас}}$$

Споживана насосом потужність N (потужність, витрачена на привод насоса) більша від корисної потужності насоса на величину втрат потужності в насосі. Ці втрати оцінюються ККД насоса η , який дорівнює відношенню корисної потужності насоса до споживаної

$$\eta = \frac{N_{\text{пол}}}{N} = \frac{\rho g Q H_{\text{нас}}}{N}$$

Звідси споживана насосом потужність

$$N = \frac{\rho g Q H_{\text{нас}}}{\eta}$$

Втрати потужності в насосі складаються з трьох видів втрат:
 - **гідравлічні** (втрати напору в проточній частині насоса);
 - **об'ємні** (втрати на циркуляцію рідини через зазори в насосі, або на витoki всередині насоса);
 - **механічні** (втрати на тертя в підшипниках, ущільненнях і на тертя зовнішньої поверхні робочого колеса об рідину).

Тоді повний ККД насоса η є добутком трьох множників ККД: гідравлічного $\eta_{\text{г}}$, об'ємного $\eta_{\text{о}}$ і механічного $\eta_{\text{м}}$, тобто

$$\eta = \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{о}} \cdot \eta_{\text{м}}$$

Робочою характеристикою насоса називається залежність його напору, потужності і ККД від подачі насоса при постійній частоті обертання робочого колеса ($n = \text{const}$).

ККД насоса η перетворюється в нуль двічі: при $Q = 0$ і $H = 0$. При деякому оптимальному для цієї частоти обертання значенні подачі ККД насоса буде максимальним. Типовий вигляд кривої ККД η за Q показаний на рисунку 10.2.

Робоча характеристика цього відцентрового насоса в принципі може бути отримана теоретичним (розрахунковим) шляхом. Однак цей шлях дуже складний і не дає належної точності, тому на практиці зазвичай користуються експериментальними характеристиками, отриманими в результаті випробувань насоса.

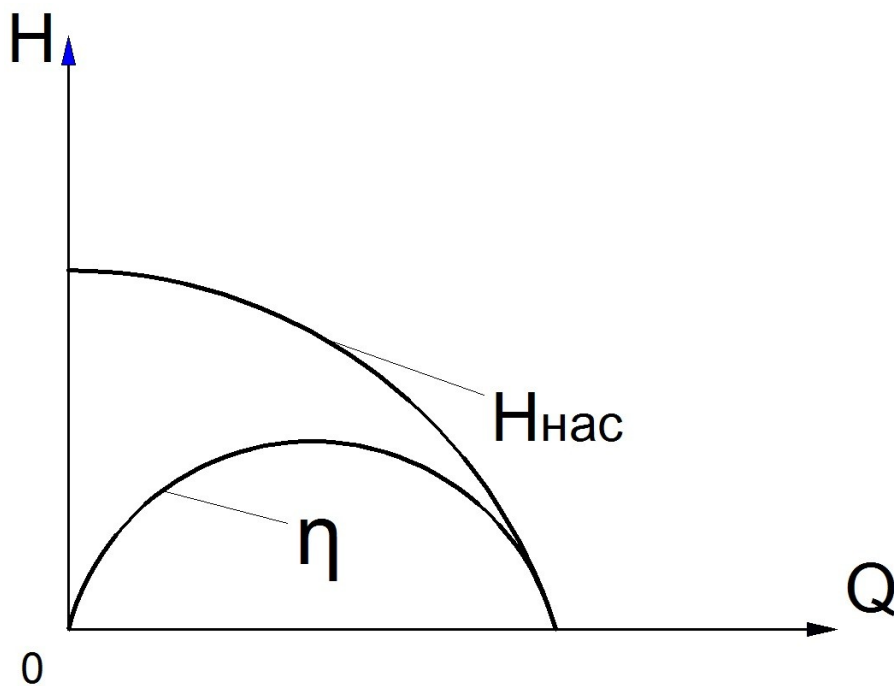


Рисунок 10.2

При випробуванні насоса підтримується постійна частота обертання робочого колеса і змінюється опір трубопроводу, з яким з'єднаний насос, тобто відбувається дроселювання — зміна ступеня відкритості дроселя (вентиля, засувки або іншого запірно-регулювального пристрою).

10.2 Опис дослідної установки

Відцентровий насос 3 подає воду з бака 1 по трубопроводу 2 в мірний бак 7, з якого вона зливається в бак 1. Перед входом у насос 3 для вимірювання тиску встановлений мановакуумметр 5. Надмірний тиск на виході з насоса вимірюється манометром 6. Витрата води визначається з допомогою мірного бака 7. Постійна частота n у досліді забезпечується приводним електродвигуном. Регулювання подачі насоса проводиться за допомогою крана 4 (рисунок 10.3).

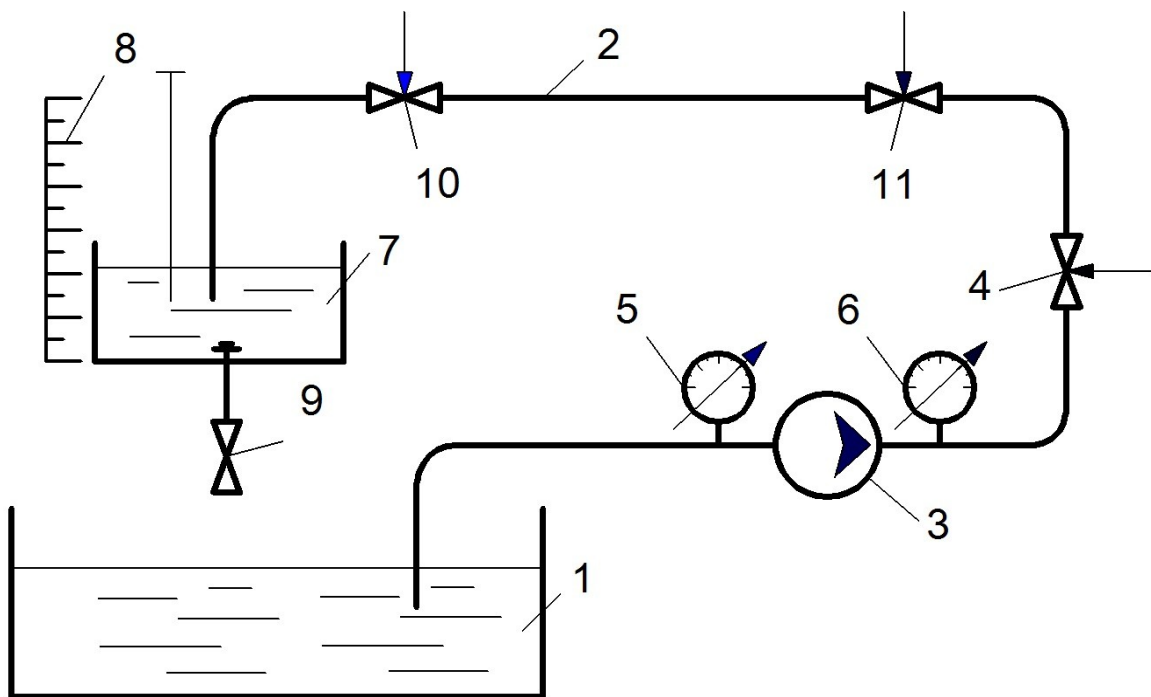


Рисунок 10.3

10.3 Порядок проведення дослідів

- 10.3.1 Відкрити крани 10 і 11 і закрити кран 4.
- 10.3.2 Вимкнути електродвигун насоса.
- 10.3.3 Зняти показання мановакуумметра 5 і манометра 6.
- 10.3.4 Послідовним відкриттям крана 4 встановити рекомендовані режими роботи насоса (крани 10 і 11 протягом усього дослідів повинні бути відкритими).

10.3.5 При кожному режимі роботи проводити виміри показань мановакуумметра, манометра і часу заповнення мірного об'єму мірного бака 7 для визначення витрати рідини Q .

10.3.6 При визначенні часу заповнення мірного об'єму (10 літрів) мірного бака 7 за шкалою 8 слід попередньо закрити кран 9. Після визначення часу заповнення мірного об'єму відкрити кран 9.

10.3.7 Після закінчення дослідів закрити кран 4 і вимкнути електродвигун насоса.

10.4 Обробка результатів дослідів й оформлення звіту з роботи

Об'ємна витрата, $\text{см}^3/\text{с}$:

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

де W – мірний об'єм;

t – час заповнення мірного об'єму W за секундоміром.

Напір насоса являє собою різницю тисків рідини на виході $p_{\text{н}}$ і вході $p_{\text{в}}$ в насосі

$$p_{\text{нас}} = p_{\text{н}} - p_{\text{в}}$$

Тиск $p_{\text{в}}$, $\text{кгс}/\text{см}^2$, на вході в насос – це тиск, знятий за мановакуумметром.

Тиск $p_{\text{н}}$ на виході з насоса – це показання манометра в умовних поділках. Ціна поділки манометра 0,016. Тому $p_{\text{нас}} = 0,016 \cdot n$ $\text{кгс}/\text{см}^2$, де n – число умовних поділок.

Напір насоса, виражений у сантиметрах водяного стовпа,

$$H_{\text{нас}} = \frac{p_{\text{нас}}}{\gamma},$$

де $\gamma = 0,001 \text{ кгс/см}^3$.

Після визначення подачі Q і напору $H_{\text{нас}}$ побудувати характеристику насоса у вигляді графічної залежності $H_{\text{нас}} = f(Q)$.

Результати розрахунків занести в протокол випробувань (таблиця 10.1) і оформити звіт з роботи.

Таблиця 10.1 – Протокол випробувань

Величина	Позначення	Розмірність	Номер досліду				
			1	2	3	4	5
1 Тиск за мановакуумметром	$p_{\text{в}}$	кг/см ² умов. поділ.					
2 Тиск за манометром	$p_{\text{н}}$	кг/см ²					
3 Тиск за манометром	$p_{\text{нас}}$	кг/см ²					
4 Тиск в насосі	$H_{\text{нас}}$	м					
5 Напір насоса	W	м ³					
6 Мірний об'єм							
7 Час наповнення мірного об'єму	t	с					
8 Об'ємна витрата	Q	м ³ /с					
9 Корисна потужність	N	Вт					

Питання для самоконтролю

- 1 Що таке напір насоса?
- 2 Що називається подачею насоса?
- 3 У яких одиницях вимірюється напір насоса?
- 4 Як вимірюється в досліді подача насоса?
- 5 Що називається корисною потужністю насоса?
- 6 Що таке коефіцієнт корисної дії насоса?

Лабораторна робота 11 ВИТІКАННЯ ЧЕРЕЗ ВОДОЗЛИВИ

Мета роботи

Визначення коефіцієнта витрати m для незатопленого водозливу і коефіцієнта затоплення σ .

11.1 Загальні положення

Водозливами називають споруди, що перегороджують потік, але пропускають через свою верхню грань рідину з вільною поверхнею і призначені для зливу рідини. До водозливів належать також і великі отвори, якщо рідина, що витікає, не змочує верхньої кромки, і багато інших інженерних споруд, наприклад, малі мости, водоскидні греблі, безнапірні водопропускні труби в насипах доріг, водозабірні споруди каналів, а деякі типи водозливів (водозливи з тонкою стінкою) широко використовуються як надто точні прилади для вимірювання витрати в гідравлічних і гідротехнічних лабораторіях та в ряді інших випадків.

Водозлив розмежовує потік на дві частини: **верхній б'єф** – потік перед водозливом і **нижній б'єф** – потік за водозливом (рисунок 11.1).

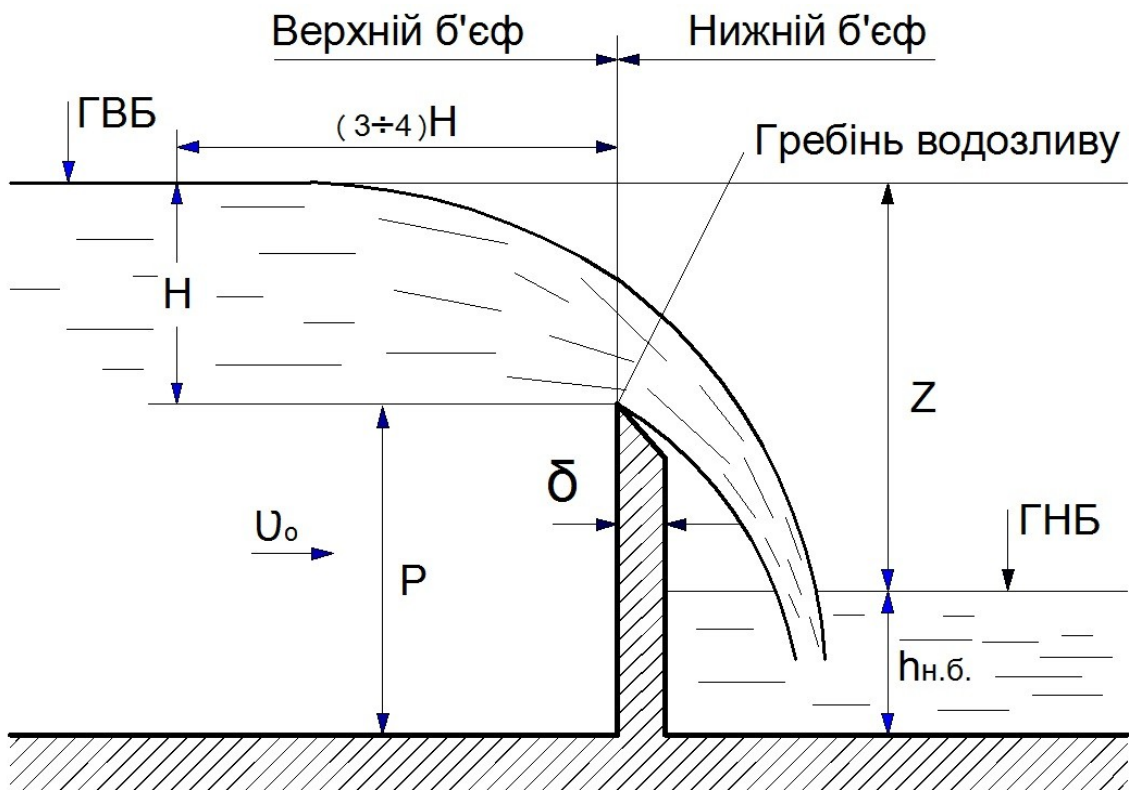


Рисунок 11.1

Верхній кінець стінки водозливу називають *гребенем водозливу*.

Глибина рідини над гребенем водозливу, вимірювана там, де рівень ще не знизився, називається *статичним напором на водозливі* і позначається через **H**.

Зниження рівня рідини перед водозливом починається на відстані 3-4 **H** від його гребеня. Перевищення гребеня водозливу над дном потоку у верхньому б'єфі називається *височиною порога водозливу* і позначається через **P**. Через **Z** позначається *перепад рівнів рідини* верхнього та нижнього б'єфів; v_0 – *швидкість підходу*, тобто середня швидкість перед водозливом; δ – *товщина водозливної стінки*.

Водозливи класифікуються за такими основними ознаками:
за **обрисом профілю стінки**:

а) з *тонкою стінкою* (або водозливи з гострим ребром) (рисунок 11.2), коли рідина переливається через тонку (гостру) поперечну перешкоду. При товщині стінки $\delta \leq 0,67 H$ вважають, що товщина стінки не впливає на характер струмини, яка переливається;

б) **практичного профілю** (рисунок 11.2, а), коли рідина переливається через товсту криволінійну стінку $2H \geq \delta > 0,67H$, а обрис низової межі такого водозливу близький до форми струминни;

в) з **широким порогом** (рисунок 11.2, б), коли стінка, яка перегороджує потік, має товщину $8H \geq \delta > 2H$, при якій на порозі спостерігається паралельноструминна течія;

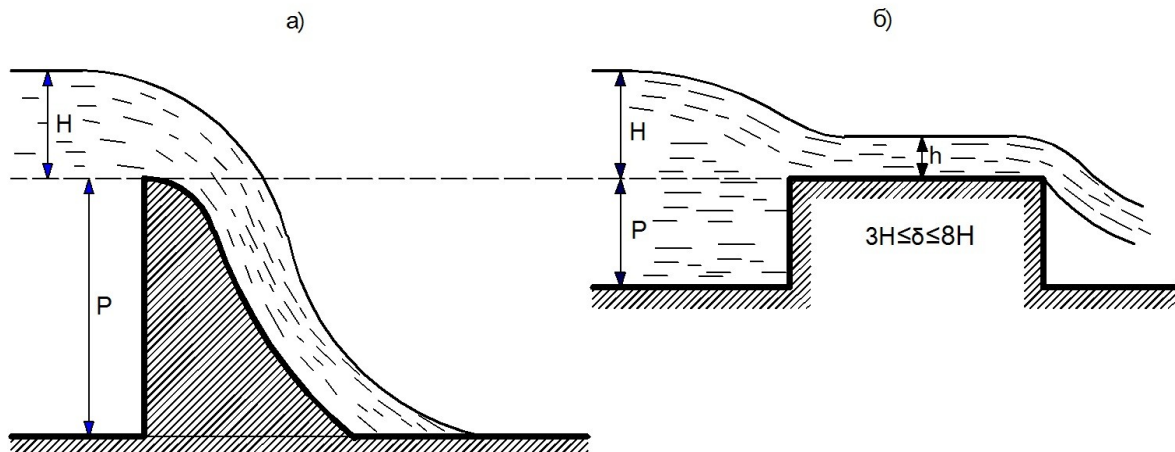


Рисунок 11.2

за **формою вирізу зливного отвору**: у стінці водозливу роблять прямокутні, трапецеїдальні та трикутні отвори (рисунок 11.3);

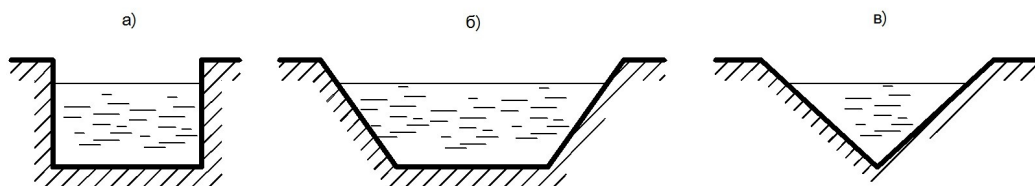


Рисунок 11.3

за **розташуванням порога**: водозливи **в плані** бувають **прямі** (рисунок 11.4, а), коли поріг водозливу перпендикулярний напрямку потоку у верхньому б'єфі, **косі** – поріг розташований під кутом до потоку (рисунок 11.4, б), **бокові** – поріг розташований паралельно напрямку потоку (рисунок 11.4, в);

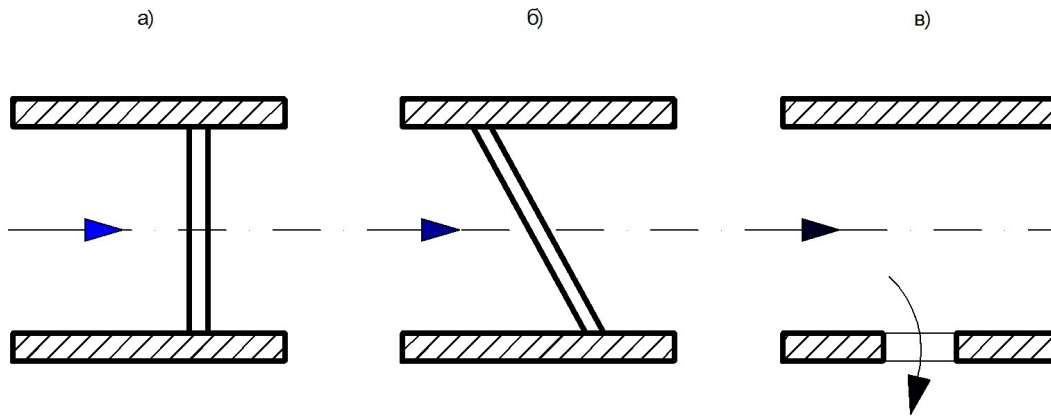


Рисунок 11.4

за умовами бокового стиску потоку: водозливи розподіляються на водозливи *без бокового стиску* при рівності ширини русла і ширини водозливу ($b=B$) і водозливи з *боковим стиском*, коли ширина водозливу менша від ширини русла, на якому розташований водозлив, тобто $b < B$ (рисунок 11.5).

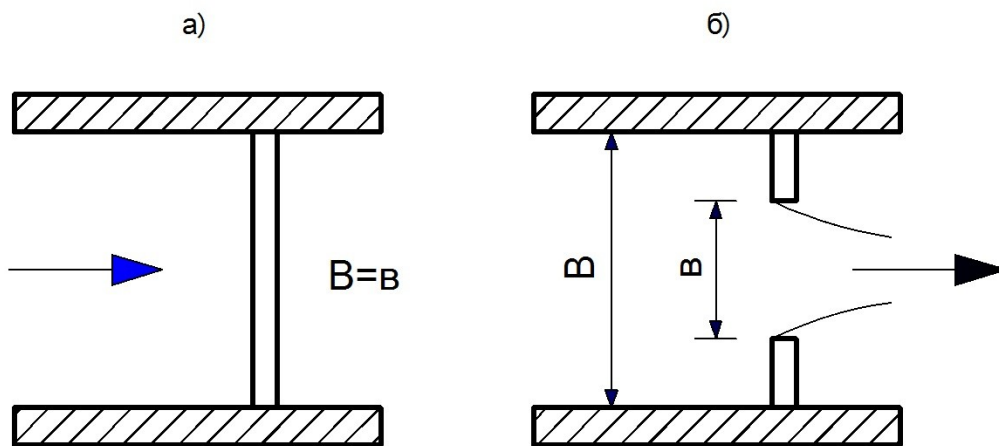


Рисунок 11.5

У залежності від сполучення падаючого струменя з рівнем води за водозливом останній може бути *незатоплений* (рисунок 11.6) і *затоплений* (рисунок 11.7).

Основним рівнянням для визначення витрати через незатоплений водозлив усіх видів буде

$$Q = m \cdot a \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (11.1)$$

де m - коефіцієнт витрати водозливу, який залежить від типу водозливу і співвідношення його характеристик;

\hat{a} – ширина водозливу;

H – напір над гребенем водозливу.

При розрахуванні різних видів водозливів змінюється тільки значення m , яке в переважній більшості визначається дослідним шляхом або за емпіричними формулами.

Витрати через затоплений водозлив визначають за рівнянням (11.1) з уведенням поправкового коефіцієнта σ на затоплення.

Водозливи мають широке застосування на практиці, тому ми докладно розглянемо водозливи з широким порогом і водозливи практичного профілю.

11.2 Витікання через водозлив практичного профілю

Водозлив практичного профілю отриманий за координатами нижнього обрису струменя, що вільно падає з гребеня водозливу з гострим ребром для розрахункового напору H над його гребенем (рисунки 11.6, 11.7). Таким профіль водозливу найчастіше спостерігається на практиці при будівництві водозливних гребель.

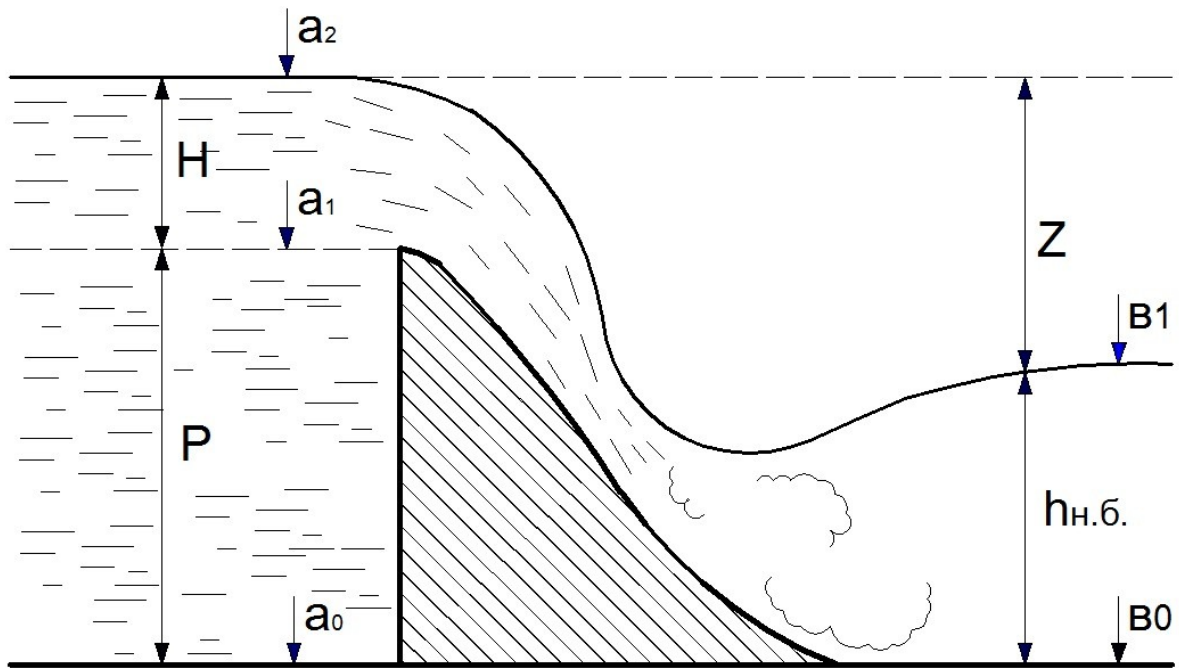


Рисунок 11.6

Розрахункова залежність для витрат через незатоплений водозлив (якщо рівень нижнього б'єфа нижчий від порога водозливу, тобто при $h_6 < P$), без бокового стиску (коефіцієнт стиску $\epsilon < 1$) має вигляд, аналогічний рівнянню (11.1)

$$Q = m \cdot \hat{a} \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (12.2)$$

де H_0 – повний напір, який складається зі статичного H і гідродинамічного (швидкісного) напору або напір з урахуванням швидкості підходу

$$H_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}, \quad (11.3)$$

де v_0 – середня швидкість підходу до водозливу, розраховується як

$$v_0 = \frac{Q}{\hat{a}(P+H)} \quad (11.4)$$

де $\hat{a}(P+H)$ – площа перерізу потоку перед водозливом;
 \hat{a} – ширина водозливу.

Витрати рідини через затоплений водозлив мають бути розраховані за рівнянням

$$Q = \sigma \cdot m \cdot \hat{a} \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (11.5)$$

де σ – коефіцієнт затоплення, залежний від так званого відносного затоплення $h_{\text{п}}/H$;

m – коефіцієнт витрат для незатопленого водозливу;

$h_{\text{п}}$ – перевищування рівня води у нижньому б'єфі над порогом водозливу (рисунок 11.7).

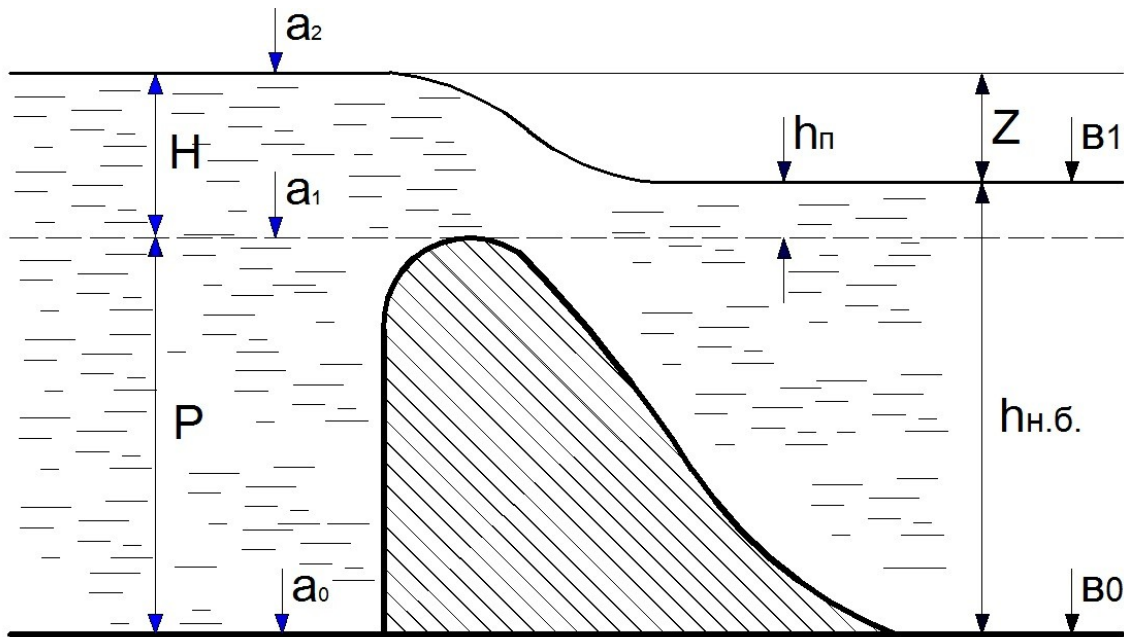


Рисунок 11.7

Значення коефіцієнта затоплення наведено на графіку (рисунок 11.8).

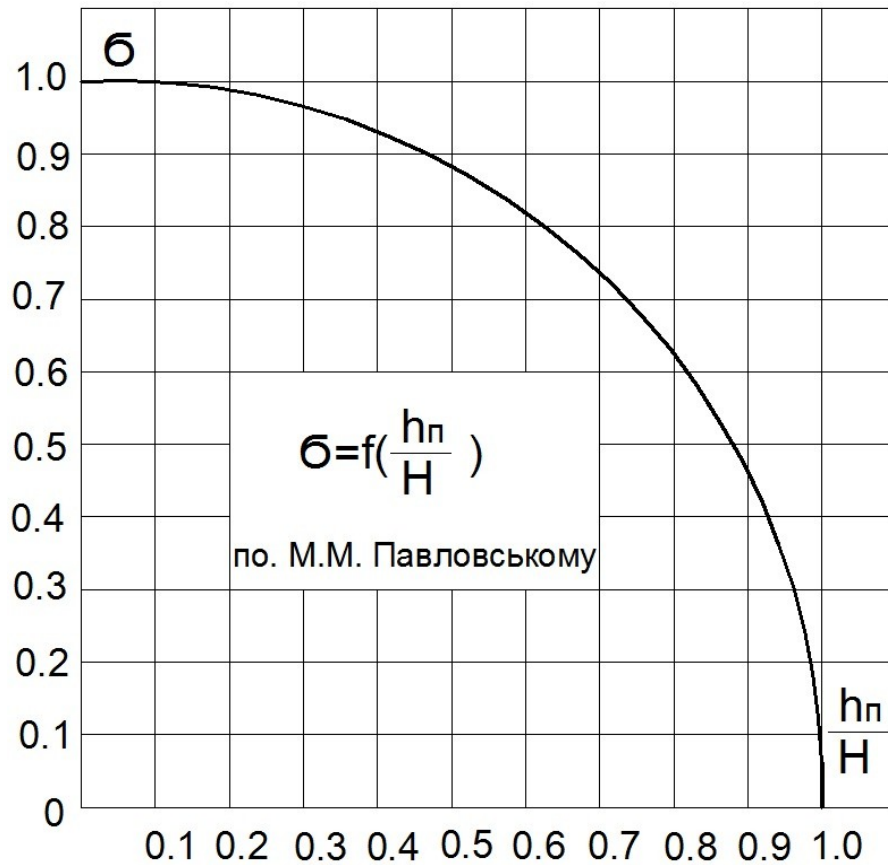


Рисунок 11.8

11.3 Опис лабораторної установки

Установка для проведення дослідів (рисунок 11.9) складається з лотка, виготовленого із органічного скла.

Лотік обладнаний заспокійливими перегородками 1, переливною стінкою 2, змінним водозливом практичного профілю 3, який кріпиться гвинтами. Регулюють витрати води в нижньому б'єфі краном 4. Для встановлення визначеного рівня води у нижньому б'єфі поставлено спицевий затвор 5.

До і після водозливу встановлюються мірні голки для замірювання рівня води в лотку. Для проведення дослідів необхідно мати: секундомір, мірний резервуар, ємність 5 або 10 л, дві мірні голки, водозлив практичного профілю.

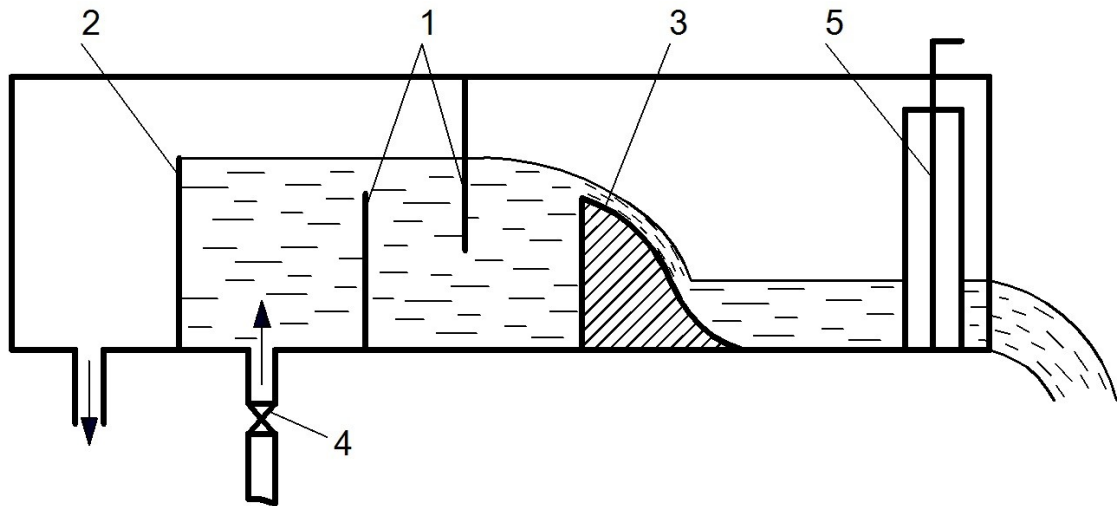


Рисунок 11.9

11.4 Порядок проведення дослідів

11.4.1 Установити і закріпити в лотку водозлив практичного профілю.

11.4.2 Установити мірні голки на відстані 12–17 см до водозливу і 25-30 см – за водозливом.

11.4.3 До пуску води в лотік мірні голки опустити на дно лотока і по ноніусу взяти відлік a_0 і b_0 відповідно до і після водозливу з точністю до $\pm 0,1$ мм.

При спостереженнях необхідно звернути увагу звідки йде початок відліку по мірній голці. Якщо початок шкали внизу, відлік по ноніусу беремо по нижній рисці і, навпаки, відраховуємо по верхній рисці у випадку початку шкали вгорі.

11.4.4 Відкрити кран 4 і пустити воду в лотік з таким розрахунком, що її рівень буде однаковим з гребенем водозливу. Не зсуваючи з місця мірну голку, штангу її піднімаємо так, щоб вістря голки було вище від рівня води на 2-3 см. За допомогою мікрометричного гвинта вістря підводять до поверхні води. По ноніусу робиться відлік a_1 . Різниця відліків $a_1 - a_0 = P$ дає височину порога водозливу.

11.4.5 Для замірювання напору H на гребені водозливу штанги обох голок піднімають на 3-4 см і знову пускають воду через водозлив, відкривши кран 4 так, щоб вода перелившись зробила напір над гребенем водозливу величиною $H = 2 \div 3$ см.

Знову роблять відлік по ноніусу a_2 . Величина напору H визначається як різниця відліків по мірній голці $a_2 - a_1 = H$.

11.4.6 Заміряють витрати об'ємним способом (за допомогою секундоміра засікають час наповнення мірного об'єму).

11.4.7 При цій же витраті Q (при тому ж відкритті крана 4) водозлив затоплюється, для чого необхідно зменшити отвір спицевого затвора в кінці лотока так, щоб рівень води у нижньому б'єфі був вище від порога водозливу. Коли рівень у верхньому і нижньому б'єфах буде стабільним, підводять кінці голок до поверхні рідини і роблять відлік a_3 і v_1 по ноніусу обох голок.

11.4.8 Визначають напір над гребенем затопленого водозливу як різницю відліків по голці до водозливу $a_3 - a_1 = H$. Різниця ж відліків $v_1 - v_0 = h_{н.б.}$ дає глибину води у нижньому б'єфі при затопленому водозливі.

11.4.9 Отримані величини для незатопленого і затопленого водозливів занести в протокол випробувань (таблиця 11.1) і оформити звіт з роботи.

11.5 Обробка спостережень та оформлення звіту з роботи

За часом наповнення мірного резервуара об'ємні витрати визначають за формулою

$$Q = \frac{W}{t}.$$

Знаючи напір H для незатопленого водозливу і витрату Q , визначають швидкість підходу v_0 за формулою (11.4), ширину водозливу приймають рівною $v = 10$ см.

За залежністю (11.3) визначають повний напір H_0 . Підставивши отримані значення у формулу (11.2), розраховують коефіцієнт витрати незатопленого водозливу практичного профілю m .

Для затопленого водозливу визначається коефіцієнт затоплення σ за формулою (11.5) і зіставляється з коефіцієнтом затоплення σ за графіком (рисунок 11.8), маючи на увазі, що

$$\sigma = f\left(\frac{h_i}{H}\right),$$

де $h_{\text{п}}$ – величина підтоплення, яка визначається як різниця рівня води нижнього б'єфа затопленого водозливу і порога водозливу, тобто $h_{\text{п}}=V_1-P$.

Отримані величини заносять у протокол випробувань (таблиця 11.1) і оформляють звіт з роботи.

Таблиця 11.1 – Протокол випробувань

Величина		Номер досліду	
		1	2
Незатоплений водозлив	1 Висота порога P , см		
	2 Ширина водозливу v , см		
	3 Об'єм води в мірному резервуарі W , см ³		
	4 Час наповнення мірного резервуара t , с		
	5 Витрата $Q=W/t$, см ³ /с		
	6 Напір H , см		
	7 Швидкість підходу $v_0 = \frac{Q}{b(P+H)}$, см/с		
	8 Швидкісний напір $\frac{\alpha v_0^2}{2g}$, см		
	9 Повний напір H_0 , см		
	10 Дослідний коефіцієнт витрат m		
	11 Довідкове значення m		
Затоплений водозлив	12 Напір H , см		
	13 Швидкість підходу v_0 , см/с		
	14 Швидкісний напір $\frac{\alpha v_0^2}{2g}$, см		
	15 Повний напір H_0 , см		
	16 Глибина підтоплення $h_{\text{п}}$, см		
	17 Коефіцієнт швидкості ϕ за формулою		
	18 Коефіцієнт швидкості ϕ за довідником		

Питання для самоконтролю

- 1 Що називається водозливом?
- 2 Назвіть основні елементи водозливів.
- 3 За якими ознаками класифікуються водозливи?
- 4 Що таке затоплений і незатоплений водозлив?
- 5 За яким рівнянням визначаються витрати через водозлив?
- 6 Від чого залежить коефіцієнт витрати водозливу m ?
- 7 Як визначається витрата через затоплений водозлив?
- 8 Від чого залежить коефіцієнт затоплення σ для водозливу практичного профілю?

Лабораторна робота 12

ВИТІКАННЯ ЧЕРЕЗ ВОДОЗЛИВИ З ШИРОКИМ ПОРОГОМ

Мета роботи

Визначення коефіцієнта витрати m для незатопленого водозливу, а також коефіцієнта швидкості φ для затопленого водозливу.

12.1 Загальні положення

Водозливом з широким порогом називається водозлив, що має горизонтальний поріг, довжина якого вздовж потоку (товщина стінки δ) перебуває в межах $(2 \div 3)H < \delta < (8 \div 10)H$ (рисунок 11.2, б). При цьому характер руху потоку на такому водозливі плавно змінюється, близько до паралельноструминного з гідростатичним розподілом тисків. Як і інші види водозливів водозливи з широким порогом можуть бути незатопленими і затопленими (рисунки 12.1, 12.2).

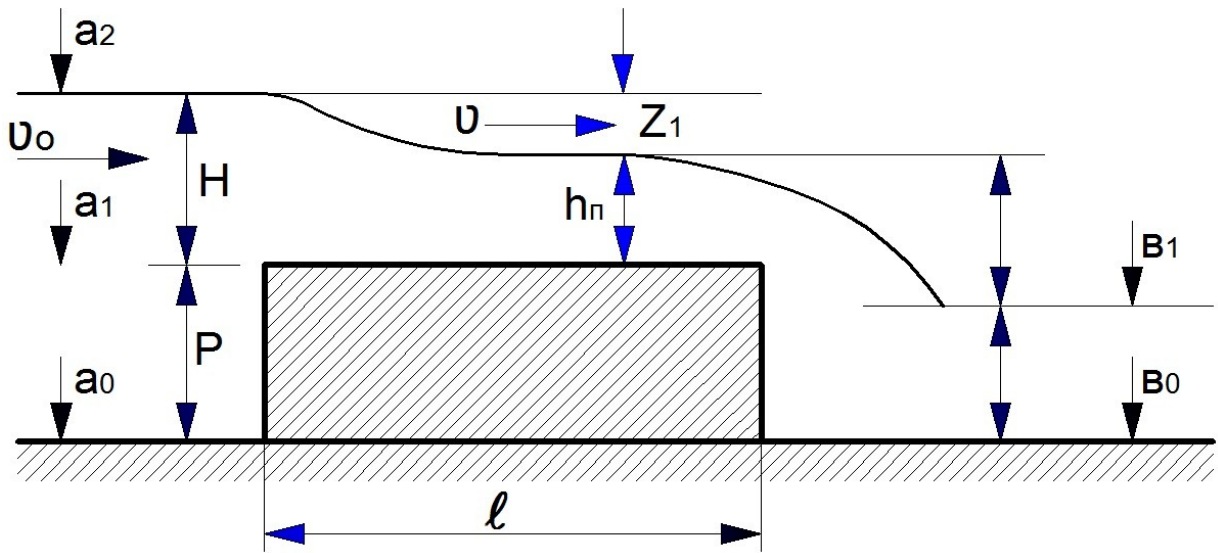


Рисунок 12.1

Незатоплений водозлив з широким порогом має два перепади вільної поверхні потоку: на початку і в кінці порога. Слід зазначити, що при незатопленому водозливі з широким порогом у кінці нього встановлюється глибина $h_{кр.}$, а саме, поки рівень нижнього б'єфа $h_б$ не перевищить рівень води в кінці водозливу, затоплення не впливатиме на витікання рідини через водозлив і відповідно на коефіцієнт витрати m .

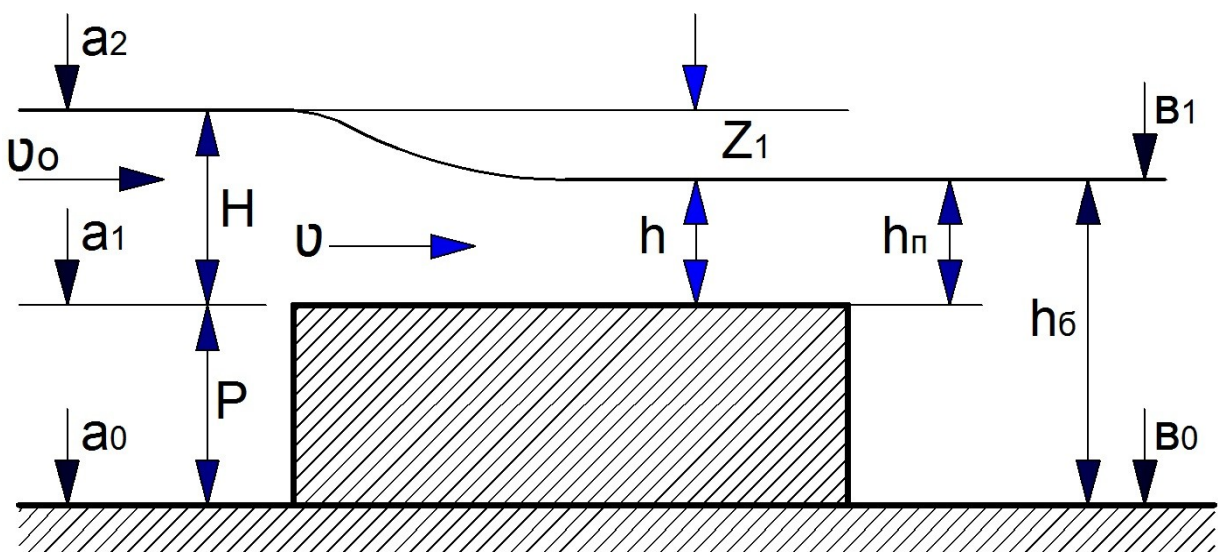


Рисунок 12.2

Витрату через незатоплений водозлив визначають за звичайною формулою для водозливів:

$$Q = m v \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (12.1)$$

де позначення ті самі, що і в лабораторній роботі 11.

При затопленому водозливі витрата визначається за формулою

$$Q = \varphi v h_{\text{п}} \sqrt{2g(H_0 - h)}, \quad (12.2)$$

де φ – коефіцієнт швидкості затопленого водозливу (для порога без заокруглення вхідного ребра $\varphi = 0,9$, $m = 0,32$);

$h_{\text{п}}$ – глибина підтоплення;

h – глибина води на порозі (наближено її можна вважати постійною по довжині водозливу). Глибина води на порозі затопленого водозливу $h = h_{\text{п}}$.

Вводячи у вираз (12.2) коефіцієнт ε , отримаємо розрахункову формулу для витрати через водозлив з широким порогом при урахуванні впливу швидкості підходу потоку v_0 і його бокового стиску ε :

$$Q = \varepsilon \varphi v h \sqrt{2g(H_0 - h)}, \quad (12.3)$$

де ε – коефіцієнт бокового стиску струменя.

При орієнтовних розрахунках значень коефіцієнта бокового стиску приймають у межах $\varepsilon = 0,85 \div 0,95$.

У тілі насипів залізниць і автомобільних доріг часто влаштовують водопропускні труби і невеликі містки, які за характером протікання в них води можуть бути віднесені до водозливу з широким порогом і розраховуватися за наведеними вище залежностями. Отвори цих споруд не мають порога ($P=0$) і напір H перед ними утворюється за рахунок бокового стиску русла (рисунок 12.3).

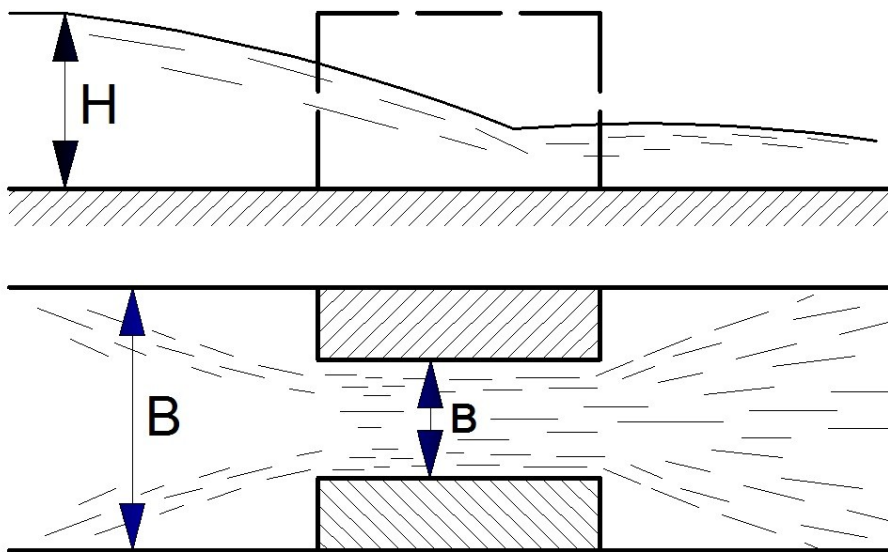


Рисунок 12.3

При розрахунку споруд, що працюють за схемою водозливу з широким порогом, насамперед слід перевірити умову, чи буде цей водозлив затопленим або незатопленим: якщо $\frac{h_6}{H} < N$ л – незатоплений; $\frac{h_6}{H} \geq N$ – затоплений, де N змінюється в межах $0,75 \div 0,87$; однак для наближених розрахунків можна приймати $N = 0,8$. Після цього розрахунок ведеться відповідно за формулами затопленого або незатопленого водозливу (12.1) – (12.3).

12.2 Опис дослідної установки

Ця робота виконується на тій же установці, що і попередня робота 11. Схема цієї установки наведена на рисунку 10.1. Відмінність полягає в конструкції водозливу з широким порогом.

12.3 Порядок проведення дослідів

Порядок роботи і методика замірів окремих величин докладно описані в роботі 11.

12.4 Обробка результатів дослідів, оформлення звіту з роботи

Після вимірювання висоти порога водозливу P , напору H і витрати Q (методика описана в роботі 11) визначають швидкість підходу за формулою (11.4), а потім повний напір H_0 – за залежністю (11.3). На підставі отриманих величин обчислюють дослідний коефіцієнт витрати за формулою (12.1) і зіставляють з довідковим значенням (дається керівником).

При затопленому водозливі за заміряною витратою Q і величині підтоплення h_p визначається коефіцієнт швидкості за залежністю (12.2) і порівнюється з величиною коефіцієнта швидкості за довідником. Отримані величини занести в протокол випробувань (таблиця 12.1) і оформити звіт з роботи.

Таблиця 12.1 – Протокол випробувань

Величина	Номер дослідів	
	1	2
1	2	3

Незагнаний водозлив	1 Висота порога P , см, як $(a_1 - a_0)$		
	2 Ширина водозливу b , см		
	3 Об'єм води в мірному баку V , см ³		
	4 Час наповнення мірного бака t , с		
	5 Витрата $Q = \frac{V}{t}$, см ³ /с		
	Напір H , см, як $(a_2 - a_1)$		
	Швидкість підходу $v_0 = \frac{Q}{b(P+H)}$, см/с		
	Швидкісний напір $\frac{v_0^2}{2g}$, см		
	Повний напір H_0 , см		
	Дослідний коефіцієнт витрати m		
Довідкове значення m			

Продовження таблиці 12.1

1	2	3
---	---	---

Затоплений водозлив	Напір H , см, як $(a_3 - a_2)$		
	Швидкість підходу v_0		
	Швидкісний напір $\frac{v_0^2}{2g}$, см		
	Повний напір H_0 , см		
	Глибина підтоплення $h_{\text{п}}$, см, як $(B_1 - a_1)$		
	Відносне підтоплення $\frac{h_{\text{п}}}{H}$, см		
	Коефіцієнт швидкості φ за формулою		
	Коефіцієнт швидкості φ за довідником		

Питання для самоконтролю

- 1 Що називається водозливом?
- 2 Особливості затопленого і незатопленого водозливу з широким порогом.
- 3 Як визначається витрата через затоплений водозлив з широким порогом?

Лабораторна робота 13 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО СТИБКА В ПРЯМОКУТНИХ РУСЛАХ

Мета роботи

1 Візуальне ознайомлення з явищем гідравлічного стрибка, визначення дослідним шляхом сполучених глибин h_1 і h_2 , довжини стрибка l_c .

2 Підрахунок цих же величин за наведеними формулами і порівняння з результатами дослідів.

3 Визначення втрати енергії на ділянці довжини гідравлічного стрибка.

13.1 Загальні положення

При переливанні рідини через водозливи, при витіканні рідини з-під щита, а також при русі потоку в руслах з уклонами, більшими за критичний, можливе утворення гідравлічного стрибка.

Гідравлічним стрибком називається раптовий перехід на порівняно короткій відстані від глибини h_1 , меншої за критичну, до глибини h_2 , більшої за критичну, з різким переходом від великих швидкостей руху до менших. Глибини потоків h_1 і h_2 до і після стрибка називають **взаємними**, або **сполученими**. При цьому глибина h_1 називається першою сполученою глибиною, а h_2 – другою. Різниця $h_2 - h_1 = a$ є **висотою стрибка**.

На рисунку 13.1 наведено схематичне зображення цього явища, яке нагадує хвилю, що зупинилась. При цьому на довжині ℓ_c , що дорівнює приблизно $(4 \div 5) h_2$ (де h_2 – глибина потоку після стрибка), відбувається інтенсивне перемішування рідини з утворенням вальців і з порушенням гідростатичного закону розподілу тисків.

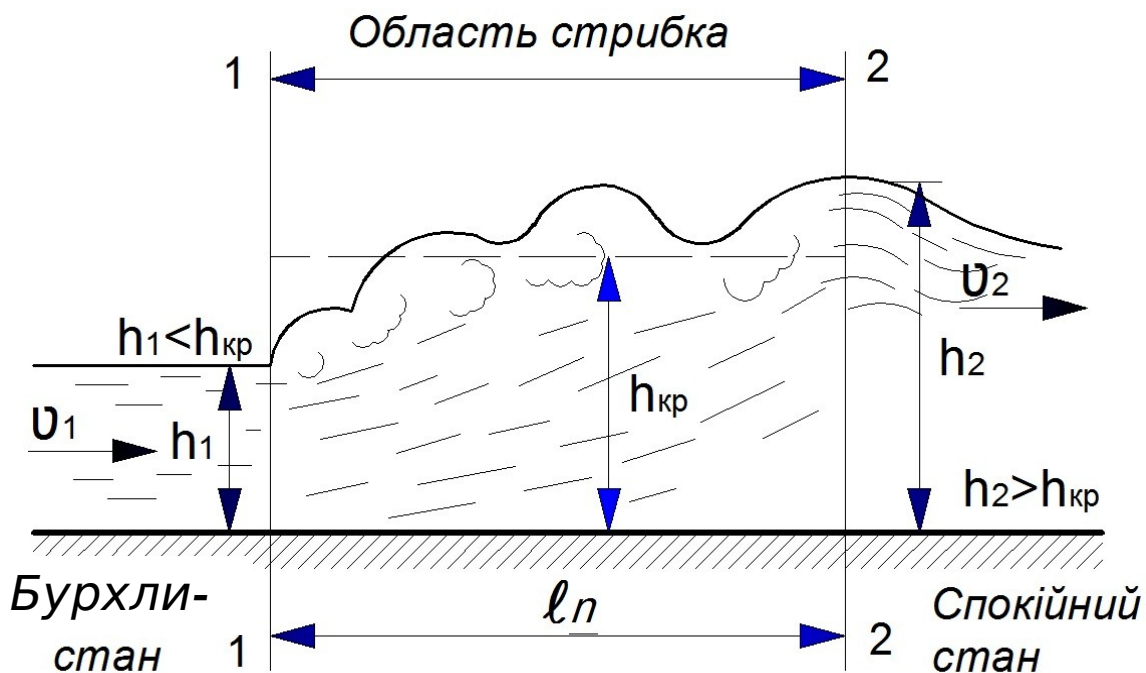


Рисунок 13.1

Остання обставина полегшує теоретичне розв'язання питання про визначення взаємних глибин і дає змогу дати розв'язання, яке є одним з найточніших в інженерній гідравліці.

Якщо до відсіку рідини, обмеженого перерізами 1-1 і 2-2 (рисунок 13.1), застосувати закон зміни кількості руху, взявши за вісь проекцій горизонтальну вісь потоку, то одержимо основне рівняння гідравлічного стрибка, яке зв'язує між собою сполучені глибини h_1 і h_2 . Знаючи витрату Q і одну із глибин, можна знайти взаємну з нею глибину.

Це рівняння

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega_1} + y_1\omega_1 = \frac{\alpha Q^2}{g\omega_2} + y_2\omega_2, \quad (13.1)$$

де y_1 і y_2 - глибини занурення центрів ваги живих перерізів в рідину.

Для русла прямокутної форми, де $\omega = bh$, $y = \frac{h}{2}$ і $Q = qv$ (де q – питома витрата, яка припадає на одиницю ширини русла), рівняння стрибка можна привести до простішого вигляду

$$\frac{\alpha q^2}{gh_1} + \frac{h_1^2}{2} = \frac{\alpha q^2}{gh_2} + \frac{h_2^2}{2}. \quad (13.2)$$

Після відповідних перетворень рівняння може бути записано в такому вигляді:

$$2h_k^3 = h_1^2 h_2 + h_1 h_2^2, \quad (13.3)$$

де h_k – критична глибина, яка встановлюється в руслі при мінімумі питомої енергії перерізу.

Питомою енергією перерізу називається питома енергія потоку відносно площини порівняння, що проходить через найнижчу точку для перерізу

$$E = H + \frac{v^2}{2g}$$

Для прямокутного русла критична глибина обчислюється за залежністю

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \quad (13.4)$$

де Q – витрата;

B – ширина прямокутного русла;

q – питома витрата.

Розв'язуючи рівняння (13.3) щодо h_1 і h_2 при $\alpha = 1$, отримаємо відомі формули для сполучених глибин при гідравлічному стрибку в прямокутному руслі:

$$h_1 = \frac{h_2}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \frac{\alpha q^2}{gh_2^3}} - 1 \right] = \frac{h_2}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \frac{h_k^3}{gh_2^3}} - 1 \right], \quad (13.5)$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \frac{\alpha q^2}{gh_1^3}} - 1 \right] = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \frac{h_k^3}{gh_1^3}} - 1 \right].$$

Формула (13.5) встановлює залежність між h_1 і h_2 або через питому витрату q , або через критичну глибину h_k .

За нижченаведеними формулами можна визначити питому енергію перерізу E_1 до стрибка і E_2 після стрибка:

$$E_1 = h_1 + \frac{q^2}{2gh_1^2}; \quad E_2 = h_2 + \frac{q^2}{2gh_2^2}. \quad (13.6)$$

Втрати енергії на ділянці довжини гідравлічного стрибка ℓ_c рівняються

$$\Delta E = E_1 - E_2.$$

Підставивши значення E_1 і E_2 , після перетворення отримаємо

$$\Delta E = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2}. \quad (13.7)$$

За даними досліджень, втрати енергії в гідравлічному стрибку складають 64-67 % від загальних втрат енергії потоку перед стрибком.

Довжина гідравлічного стрибка може бути визначена за наближеною формулою Чертоусова М.Д.

$$\ell_c = 4,5h_2, \quad (13.8)$$

або за формулою Павловського М.М

$$\ell_c = 2,5(1,9h_2 - h_1). \quad (13.9)$$

13.2 Опис дослідної установки

Досліди проводяться в гідравлічному лотку з органічного скла, схема якого наведена на рисунку 11.9. За допомогою крана 4 вода подається в лотік, який обладнаний заспокійливими перегородками 1, переливною стінкою 2. У самому лотку встановлено водозлив практичного профілю, за яким потік перебуває в бурхливому стані. Якщо за допомогою спицевого затвора в кінці лотка встановити глибину так, щоб спостерігався

спокійний потік, то сполучення його з бурхливим потоком станеться з допомогою гідравлічного стрибка.

13.3 Порядок проведення дослідів

13.3.1 Відкрити кран 4, який регулює величину подаваної витрати.

13.3.2 За допомогою спицевого затвора встановити стрибок за водозливом. При цьому необхідно, щоб стрибок не насувався на водозлив і щоб валець стрибка сягав затвора (рисунок 13.2).

13.3.3 Виміряти витрату Q об'ємним способом, для чого за секундоміром знайти час наповнення t мірної ємності об'ємом W .

13.3.4 Виміряти глибини h_1 і h_2 , для чого мірною голкою визначити відмітку горизонту води до і після стрибка та горизонт дна a_0 .

$$h = \text{ГВ} - \text{ГД}$$

13.3.5 Виміряти довжину стрибка з допомогою лінійки, вважаючи переріз 2-2 (рисунок 13.1) розташованим там, де поверхня потоку вже відносно спокійна і не спостерігається зворотного руху рідини на поверхні потоку.

13.3.6 Закрити кран 4.

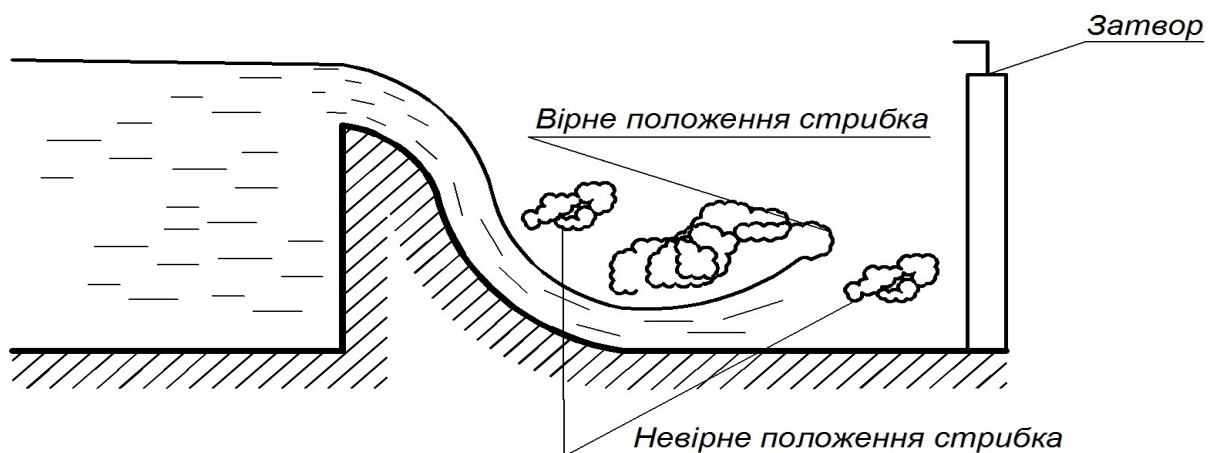


Рисунок 13.2

13.4 Обробка результатів дослідів і оформлення звіту з роботи

Визначаємо витрату за формулою $Q = \frac{W}{t}$. За відомою об'ємною витратою Q визначаємо питому витрату $q = \frac{Q}{b}$, де b – ширина лотка, рівна 10 см. Критичну глибину визначаємо за формулою (13.4). Сполучену глибину h_1 визначаємо за формулою (13.5) залежно від виміряної в процесі дослідів глибини h_2 . Знаходимо величину розбіжності між підрахованою і дослідною величинами Δh . Далі визначаємо довжину стрибка за формулою (13.8), використовуючи для цього виміряні величини h_1 і h_2 . За формулою (13.6) визначаємо питому енергію перерізу E_1 до стрибка і E_2 після стрибка, а також втрати енергії в гідравлічному стрибку за формулою (13.7), причому h_1 і h_2 беремо з дослідів.

Результати розрахунків занести в протокол випробувань (таблиця 13.1) і оформити звіт з роботи.

Таблиця 13.1 – Протокол випробувань

Величина	Позначення	Номер дослідів	
		1	2

1 Відмітка горизонту дна, см	ГД		
2 Відмітка горизонту води до стрибка, см	ГВ ₁		
3 Глибина, см, ГВ1-ГД	h_1		
4 Відмітка горизонту води після стрибка	ГВ ₂		
5 Глибина, см, ГВ2-ГД	h_2		
6 Питома витрата, см ³ /с	q		
7 Критична глибина, см	h_k		
8 Глибина h_1 за розрахунком, см	h_1		
9 Глибина h_2 за розрахунком, см	h_2		
10 Відсоток розбіжності	Δh		
11 Довжина стрибка з досліду, см	l_c		
12 Довжина стрибка за розрахунком, см	l_c		
13 Відсоток розбіжності	Δl_c		
14 Питома енергія до стрибка	E_1		
15 Питома енергія після стрибка	E_2		
16 Втрати енергії на ділянці ГД	ΔE		

Питання для самоконтролю

- 1 Пояснити значення гідравлічного стрибка.
- 2 Що таке взаємні глибини і як вони визначаються?
- 3 Що називається критичною глибиною, питомою енергією перерізу, питомою витратою і як вони визначаються?
- 4 Що являють собою втрати енергії в гідравлічному стрибку?

Лабораторна робота 14

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЄДНАННЯ Б'ЄФІВ

Мета роботи

Проведення візуального спостереження за сполученням б'єфів і перевірка дослідним шляхом критерію установлення характеру сполучення б'єфів.

14.1 Загальні положення

При витіканні через водозливи, перепади, з-під щита в горизонтальний лотік і швидкотоки відбувається накопичення потенціальної енергії потоку у верхньому б'єфі, де потік перебуває в спокійному стані. Однак при переливі води через водозлив потік має велику руйнівну силу в результаті великого запасу кінетичної енергії у падаючого струменя, тому що у міру наближення до нижнього б'єфа переріз струменя зменшується, а швидкість струменя збільшується. Зазвичай глибина потоку в головному перерізі h_c менша від критичної глибини h_k , тому в стиснутому перерізі потік завжди перебуває в бурхливому стані.

У нижньому б'єфі таких споруд побутовий (природний) стан потоку зазвичай спокійний (якщо $i_0 < i_k$).

Таким чином, у нижньому б'єфі безпосередньо за водозливом потік переходить з бурхливого стану в спокійний, що можливо тільки при наявності гідравлічного стрибка, тобто струмінь води, який переливається через водозлив, сполучається з потоком в нижньому б'єфі через гідравлічний стрибок.

У залежності від положення гідравлічного стрибка в нижньому б'єфі розрізняють **три види сполучення б'єфів**:

з відігнаним стрибком (рисунок 14.1);

із стрибком в стиснутому перерізі (рисунок 14.2);

стрибок затоплений (насунутий) (рисунок 14.3).

При цьому очевидно, що глибину води в стиснутому перерізі як мінімальну можна прийняти за першу сполучену глибину, тобто $h_c = h_1$ гідравлічного стрибка, за якою,

користуючись формулами (13.5), можна знайти і другу сполучену глибину h_c'' .

Співвідношення між побутовою глибиною h_δ і глибиною h_c'' визначає положення стрибка.

Дійсно, з рисунка 14.2 неважко встановити, що стрибок у стиснутому перерізі буде тільки в тому випадку, коли глибина стиснутого перерізу h_c та побутова глибина h_δ будуть взаємними, тобто $h_c'' = h_\delta$.

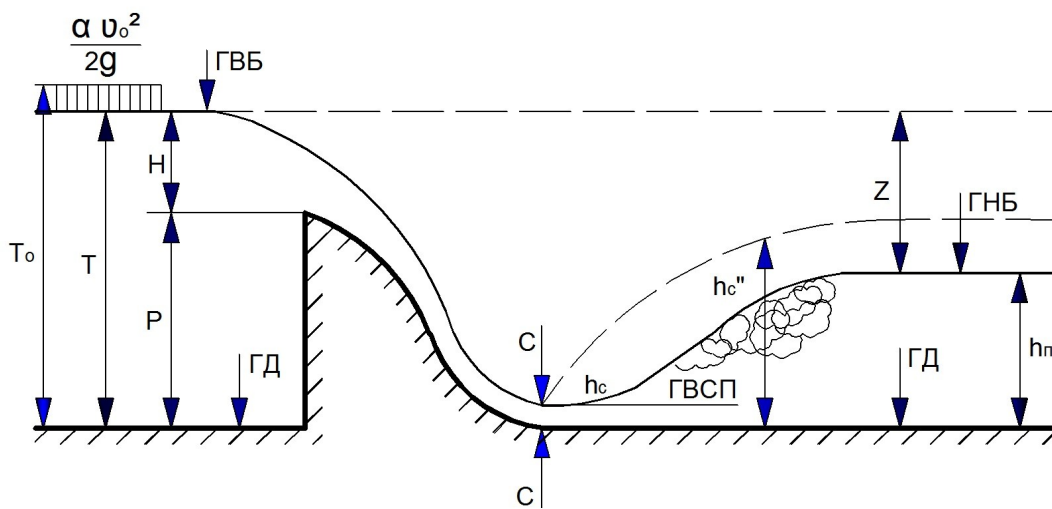


Рисунок 14.1

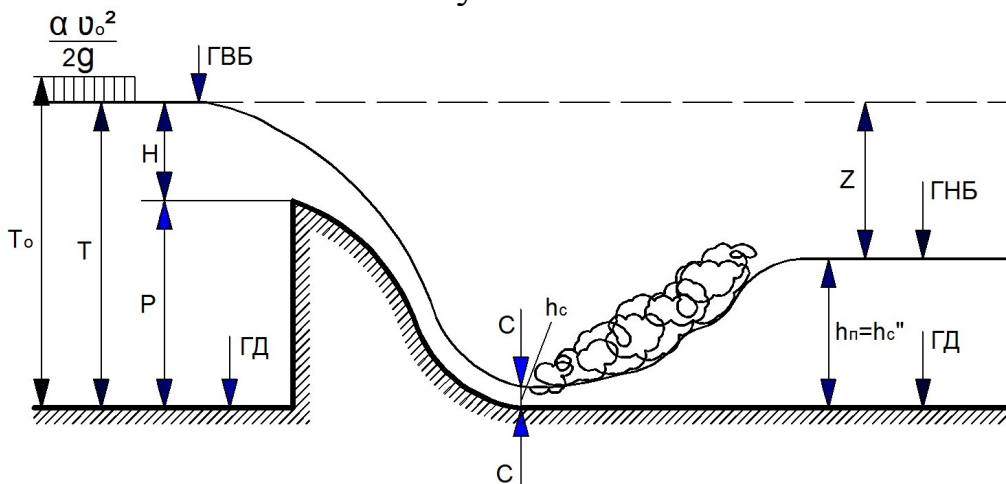


Рисунок 14.2

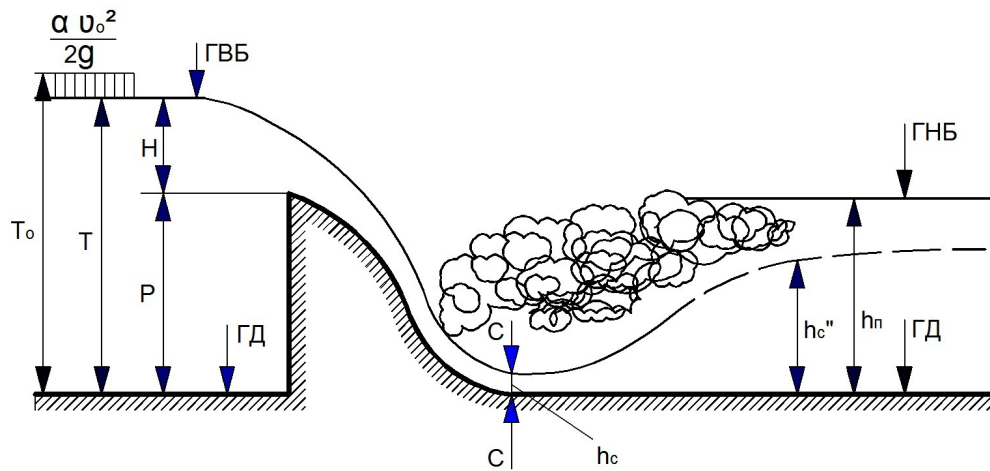


Рисунок 14.3

Якщо побутова глибина h_6 буде більшою від h_c'' – глибини, взаємної з h_c , то стрибок буде затопленим і насунеться на споруду (рисунок 14.3), а якщо $h_6 < h_c''$, то стрибок переміститься вниз за течією так, що глибина перед ним і побутова глибина будуть взаємними (рисунок 14.1).

Таким чином, для встановлення характеру сполучення б'єфів можна скористатися зазначеними співвідношеннями, тобто при:

$h_c'' > h_6$ – сполучення з відігнаним стрибком;

$h_c'' = h_6$ – сполучення із стрибком в стиснутому перерізі

(14.1);

$h_c'' < h_6$ – сполучення з затопленим стрибком.

Слід зазначити, що найбільш небажаною формою сполучення падаючого струменя з потоком у нижньому б'єфі є відігнаний стрибок, так як він характеризується значною довжиною відгону стрибка, на якій утворюються великі швидкості, що потребують міцного кріплення дна.

Найбільш бажаним для роботи є сполучення за типом затопленого стрибка, так як швидкості потоку у відповідному руслі значно менші, ніж при відігнаному гідравлічному стрибку.

Отже, для визначення форми сполучення падаючого струменя з потоком у нижньому б'єфі треба знати дві глибини: h_0 і h_c . Побутову глибину легко визначають шляхом вимірювань або знаходять за формулами рівномірного руху у відкритих руслах.

Глибина h_c як друга сполучена глибина з h_0 може бути визначена тільки тоді, коли буде відома глибина в стиснутому перерізі, тому розрахунок нижнього б'єфа повинен починатися з визначення глибини в стиснутому перерізі.

Глибину h_c знаходять за рівнянням балансу енергії для перерізів 0-0 і С-С:

$$T_0 = H + P + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = h_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + h_{0-c},$$

яке має вигляд

$$T_0 = h_c + \frac{h_k^3}{2\varphi^2 h_c^2},$$

де T_0 – повний запас енергії перед водозливом;

φ – коефіцієнт швидкості, що залежить від форми зливної грані водозливу, визначається за довідником або таблицями.

Глибину h_c можна також визначити за графіком залежності (рисунок 11.3) відносної глибини в стиснутому перерізі $\frac{h_c}{h_k}$ від відносної питомої енергії перерізу у верхньому б'єфі $\frac{T_0}{h_k}$ і коефіцієнта швидкості φ , тобто

$$\frac{h_c}{h_k} = f\left(\frac{T_0}{h_k}, \varphi\right)$$

14.2 Опис лабораторної установки

Досліди виконуються в гідравлічному лотоку зі скляними стінками, схема якого подана на рисунку 11.9, а її опис дано в роботі 11.

14.3 Порядок проведення досліду

У гідравлічному лотоку (рисунок 11.9) відкрити кран 4 і пустити воду через водозлив. Регулюючи горизонт води в нижньому б'єфі за водозливом за допомогою спицевого затвора, необхідно виміряти:

- 1) об'ємну витрату Q ;
- 2) за допомогою мірної голки величини горизонту верхнього б'єфа ГВБ і горизонту дна ГД перед водозливом;
- 3) глибину h_c як різницю горизонтів води ГВСС і ГД (рисунок 14.1) відразу за водозливом практичного профілю;
- 4) для кожного випадку сполучення б'єфів виміряти мірною голкою побутову глибину h_b як різницю горизонтів нижнього б'єфа ГНБ і ГД.

Глибина h_b вимірюється за стрибком там, де вільна поверхня води досить спокійна і не спостерігається зворотних рухів у вальцях стрибка;

5) отримані величини занести в протокол випробувань (таблиця 14.1) і оформити звіт з роботи.

14.4 Обробка результатів досліду й оформлення звіту з роботи

14.4.1 За замірним часом наповнення мірного резервуара обчислюємо об'ємну витрату $Q = \frac{W}{t}$.

14.4.2 Знаючи об'ємну витрату Q , визначаємо питому витрату $q = Q/V_{\text{лотка}}$ і критичну глибину за формулою (13.4).

14.4.3 Знаходимо глибину h_c в стиснутому перерізі за графіком залежності відносної глибини в стиснутому перерізі зі

$\frac{h_c}{h_k} = \zeta_c$ від відносної питомої енергії перерізу у верхньому б'єфі

$\frac{T_0}{h_k} = \zeta_{T_0}$ і коефіцієнта швидкості φ , тобто $\frac{h_c}{h_k} = f\left(\frac{T_0}{h_k}, \varphi\right)$, яка

подана на рисунку 14.4. Для цього на осі абсцис відкладаємо

величину $\zeta_{T_0} = \frac{T_0}{h_k}$ і через цю точку проводимо вертикаль до

перетину з кривою, відповідною прийнятому значенню коефіцієнта швидкості φ . Потім через цю точку перетину

проводимо горизонталь, яка на осі ординат відсікає шукане

значення $\zeta_c = \frac{h_c}{h_k}$.

Глибина в стиснутому перерізі визначиться як $h_c = \zeta_c h_k$.

Знайдене значення зіставляємо з дослідним значенням.

14.4.4 За знайденим значенням h_c визначаємо сполучену з нею глибину h_c'' за формулою (13.5) або за графіком на

рисунку 14.4. Для цього так само, як і при визначенні глибини в стиснутому перерізі, на осі абсцис відкладаємо значення

$\zeta_{T_0} = \frac{T_0}{h_k}$ і через цю позначку проводимо вертикаль до кривої, що

відповідає прийнятому φ , а потім через точку перетину – горизонталь до кривої АВ. Із одержаної точки на криву АВ опускаємо вертикаль, яка показує на осі абсцис значення ζ'' ; а потім знаходимо глибину h_c'' , сполучену з глибиною h_c в стиснутому перерізі $h_c'' = \zeta_c h_k$.

14.4.5 Перевіряємо критерій (14.1) для визначення характеру сполучення б'єфів.

14.4.6 Результати розрахунків занести в протокол випробувань (таблиця 14.1) і оформити звіт з роботи.

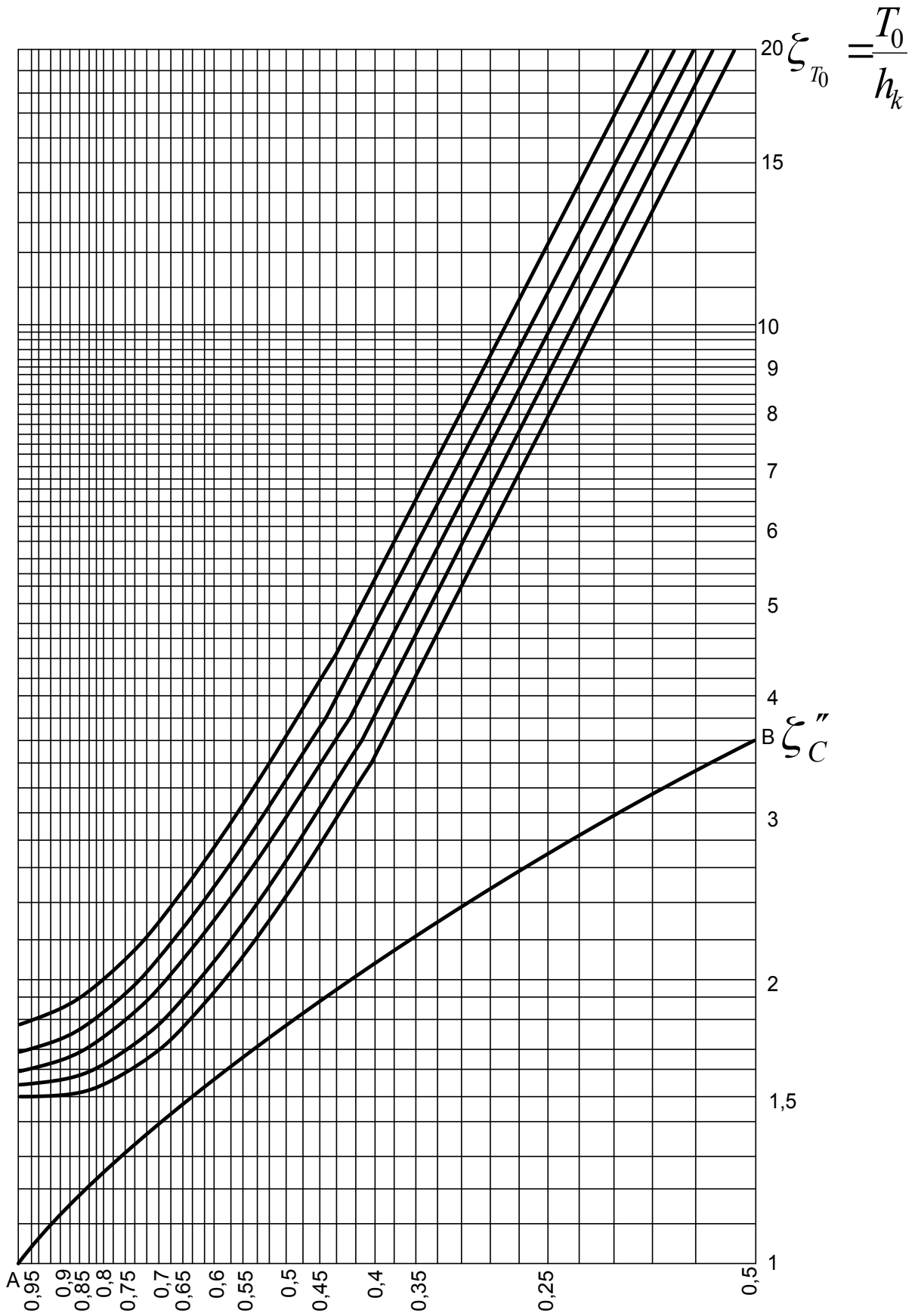


Рисунок 14.4

Таблиця 14.1 – Протокол випробувань

$$V_{\text{лотка}} = 10 \text{ см}$$

$$\varphi = 0,95$$

Вимірювання об'ємної витрати			q , см ³ / с	h_k , см	Вимірювання у ВБ						
W , см ³	t , с	Q , см ³ / с			ГД, см	ГГ, см	ГВБ, см	Н, см	Р, см	Т, см	v_0 , см/ с

Продовження таблиці 14.1

$\frac{v_0^2}{2g}$, см	T_0 , см	Вимірювання в стиснутому перерізі			$\frac{T_0}{h_k}$, см	$\frac{h_c}{h_k}$, см	за розрахунком, см h_c	h_c'' , см	Вид співвідношення	ГНБ, см	h_b , см	Вид сполучення б'єфів
		ГД, см	ГВ, см	h_c , см								

Питання для самоконтролю

- 1 Що називається сполученням б'єфів?
- 2 Які існують форми сполучення б'єфів?
- 3 Що таке стиснута глибина потоку?
- 4 Які існують заходи з ліквідації відігнутого стрибка?

Лабораторна робота 15

ПОБУДОВА КРИВОЇ ДЕПРЕСІЇ У ЗЕМЛЯНИХ ГРЕБЛЯХ (ПЕРЕМИЧКАХ) З ДРЕНАЖЕМ НА ВОДОНЕПРОНИКНІЙ ОСНОВІ

Мета роботи

Побудова кривої депресії дослідним шляхом за показаннями п'езометрів і за розрахунком. Перевірка наведених вище формул зіставленням дослідної і розрахункової кривих депресії.

15.1 Загальні положення

Під дією напору H , створюваного греблею, відбувається фільтрація води з верхнього б'єфа в нижній через тіло греблі. Поверхня фільтраційного потоку АВ (рисунок 15.1) називається **депресійною поверхнею (кривою)**. Якщо крива депресії буде виходити (виклинюватися) на низовому укосі (у точці В), то тут може відбуватися винос частинок ґрунту, спочатку більш дрібних, а потім і великих. Це явище, пов'язане з порушенням стійкості частинок ґрунту, називається **суфозія**. Воно призводить до посилення фільтрації, потім до сповзання і в остаточному підсумку до руйнування низового укосу і може призвести до катастрофічного руйнування греблі.

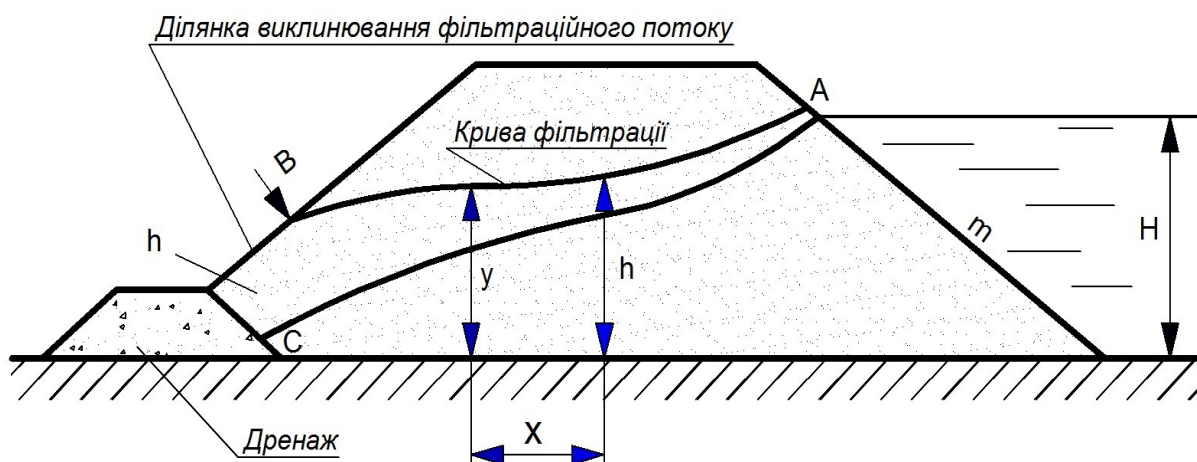


Рисунок 15.1

Для правильного відведення фільтраційного потоку через тіло земляної греблі та запобігання суфозії влаштовується дренаж. Дренаж приводить до зниження кривої депресії, що є дуже бажаним (крива депресії повинна бути нижче від глибини промерзання). У греблі крива депресії повинна розташовуватися так, як показано на рисунку 15.1 (крива АС). Відстань h від кривої депресії до денної поверхні низового укосу (з урахуванням капілярного підняття) повинна бути більше від глибини промерзання, тобто насичений водою ґрунт не повинен підлягати періодичному промерзання і відтаванню, оскільки це призводить до руйнування греблі.

Фільтрація ґрунтового потоку підпорядковується основному закону ламінарної фільтрації Дарсі

$$v = kJ = k \frac{dH}{dx}, \quad (15.1)$$

де $v = \frac{Q}{\omega}$ – швидкість фільтрації;

k – коефіцієнт фільтрації, тобто швидкість фільтрації при ухилі $J=1$;

$J = \frac{dH}{dx}$ – п'єзометричний ухил (градієнт) фільтраційного потоку.

Нерівномірний рух фільтраційного потоку, що повільно змінюється, підпорядковується рівнянню Дюпюї

$$2 \frac{q}{k} = \frac{h^2 - y^2}{x}. \quad (15.2)$$

При фільтрації через земляні греблі на ділянці її АВ (так званий верховий клин – рисунок 15.2), унаслідок значного викривлення струминок, рух не є повільно змінюваним і не підпорядковується рівнянню (15.2). Однак у зв'язку з тим, що

урахування викривлення струминок призвело б до ускладнення розрахунків, вдаються до прийому, описаного нижче.

Дійсний рух фільтраційного потоку зі значним викривленням струминок через верхній клин **авс** і відповідно ділянку кривої депресії АВ умовно в розрахунках замінюють повільно змінюваним рухом фільтраційного потоку через прямокутну ділянку **vcde** з кривою депресії **Вс** (рисунки 15.2 – 15.4).

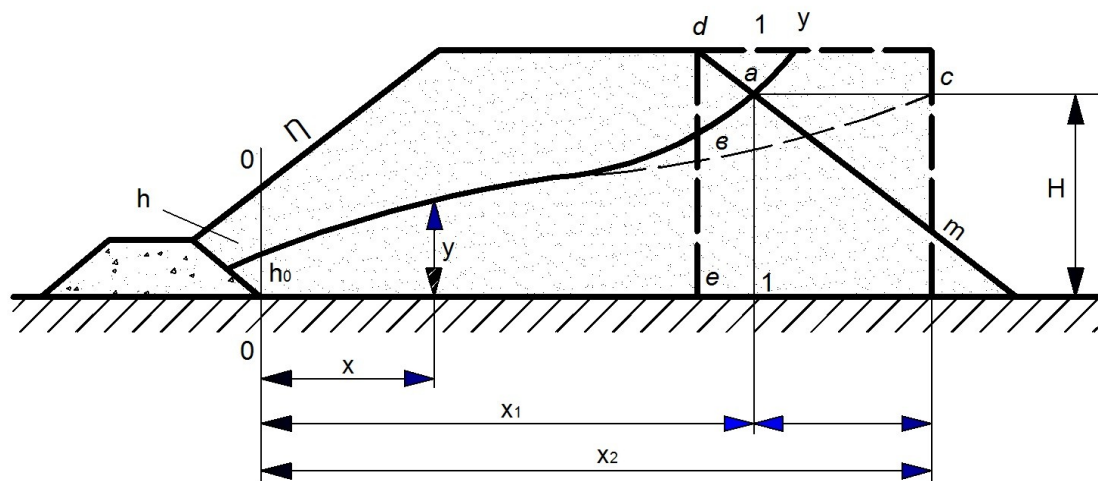


Рисунок 15.2

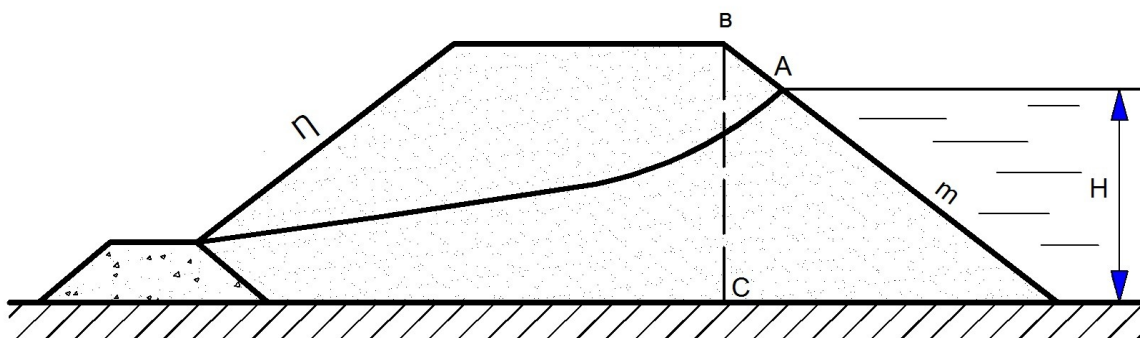


Рисунок 15.3

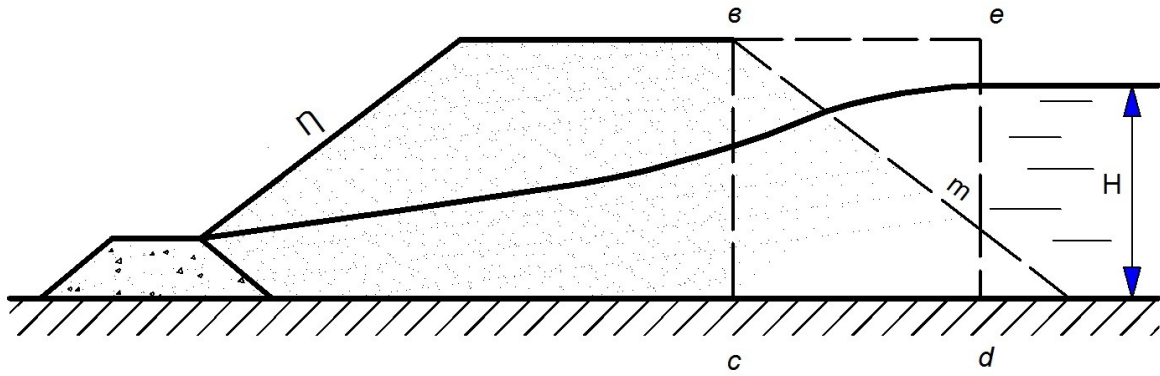


Рисунок 15.4

Положення роздільного перерізу **e-d**, що являє собою напірну грань цієї прямокутної ділянки, можна визначити, якщо відома відстань ΔL між перерізами **1-1** і **e-d**.

Для визначення ΔL існує емпірична формула

$$\Delta L = \beta H, \quad (15.3)$$

де коефіцієнт β визначається за формулою:

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{1}{m}}, \quad (15.4)$$

де H – напір;

m – коефіцієнт закладення верхового укусу.

Розрахунок кривої депресії проводиться за формулою Дюпюї (для перерізів **e-d** і **0-0**)

$$2 \frac{q}{k} = \frac{H^2 - h_0^2}{L} \quad (15.5)$$

і за емпіричною формулою для h_0

$$\frac{q}{k} = 1,4h_0, \quad (15.6)$$

де h_0 – глибина фільтраційного потоку в перетині 0-0 і початку дренажу;

L – відстань між перерізами e-d і 0-0,

$$L = L_1 + \Delta L \quad (15.7)$$

k – коефіцієнт фільтрації;

q – питома витрата фільтраційного потоку.

Для побудови кривої депресії необхідно знати k і h_0 .

Розв'язуючи спільно рівняння (15.5) і (15.6) щодо h_0 , отримаємо

$$h_0 = \sqrt{1,96H + H^2} - 1,4L, \quad (15.8)$$

де k – визначається з формули (15.6).

15.2 Опис дослідної установки

Установка для виконання дослідів складається з моделі ділянки піщаної греблі у фільтраційному лотку шириною 50 мм (рисунок 15.2). Для виконання дослідів необхідно встановити зливну лійку на рівні передбачуваного горизонту води у верхньому б'єфі так, щоб величина H перебувала в межах 25–30 см. Після цього необхідно відкрити кран і пустити воду в лотік. Для відліків за п'езометрами необхідно насосом відкачати повітря так, щоб у п'езометрі 1 відлік відповідав напору H у лотку. Відліки п'езометрів і є відмітками ординат кривої депресії.

15.2 Обробка результатів дослідів і оформлення звіту з роботи

Для теоретичних розрахунків необхідно визначити фільтраційну витрату (об'ємним способом) $Q = \frac{W}{t}$ і питому витрату $q = \frac{Q}{B}$.

Потім необхідно визначити β за формулою (15.4), а за формулою (15.7) знайти L . Знаючи L і H , за формулою (15.8) визначити h_0 і за формулою (15.6) знайти k . Потім, задаючись різними значеннями координат кривої депресії (або величинами x), з рівняння Дюпюї (15.2) визначити ординати y за формулою

$$y = \sqrt{2 \frac{q}{k} x + h_0^2}$$

Криву депресії за результатами дослідів і за розрахунком необхідно в масштабі зобразити графічно на міліметровому папері.

Результати розрахунків занести в протокол випробувань (таблиці 15.1, 15.2) і оформити звіт з роботи.

Таблиця 15.1 – Протокол випробувань

W, см ³	t, с	Q, см ³ /с	B, см	q, см ² /с	H, см	ΔL , см	L_1 см	L, см	h_0 , см	$\frac{q}{k}$, см	k, см/с

Таблиця 15.2 – Запис ординат кривої депресії

		У сантиметрах												
З дослідів	x													
	y													
З	x													

Питання для самоконтролю

- 1 Що називається кривою депресії?
- 2 Як визначається швидкість фільтрації?
- 3 Фізичний зміст коефіцієнта фільтрації k .

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1982.
- 2 Вильнер Я.М., Ковалев Я.Т., Некрасов Б.Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. – Минск: Вышэйш шк., 1976.
- 3 Киселев П.Г. Гидравлика. – М.: Энергия, 1980.
- 4 Железняков Г.В. Гидрология и гидрометрия. – М.: Высш. шк., 1981.
- 5 Большаков В.А. Справочник по гидравлике. – К.: Вища шк., 1985.
- 6 Константинов Ю.М. Гидравлика. – М.: Высш. шк., 1981.
- 7 Прозоров И.В. Гидравлика, водоснабжение и канализация городов. – М.: Высш. шк., 1975.