

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

Методичні вказівки

для проведення практичних занять, лабораторних робіт,  
виконання розрахунково-графічної роботи,  
контрольної роботи та самостійної роботи

з дисципліни

# ***ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИНИ І ГАЗУ***

*(для студентів 2 курсу денної та 2-3 курсів заочної  
форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр  
напрямку підготовки 6.060101 «Будівництво»  
спеціальності «Теплогазопостачання і вентиляція»  
та для слухачів другої вищої освіти спеціальності  
7.06010107 «Теплогазопостачання і вентиляція»)*

Методичні вказівки для проведення практичних занять, лабораторних робіт, виконання розрахунково-графічної роботи, контрольної роботи та самостійної роботи з дисципліни «Технічна механіка рідини і газу» (для студентів 2 курсу денної та 2-3 курсів заочної форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр напрямку підготовки 6.060101 «Будівництво» спеціальності «Теплогазопостачання і вентиляція» та для слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.06010107 «Теплогазопостачання і вентиляція») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: О. В. Ромашко, І. Є. Березняк. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 44 с.

Укладачі: О. В. Ромашко,  
І. Є. Березняк

Рецензент: проф., д.т.н. І. І. Капцов

Затверджено на засіданні кафедри експлуатації газових та теплових систем,  
протокол № 11 від 31.10.2009 р.

# І. СТАТИКА РІДИНИ І ГАЗУ

## *Практичне заняття 1*

*Рідина. Гіпотеза безперервності. Визначення сил, які діють у спокійній та рухомій рідині.*

Предметом вивчення механіки рідини і газу є фізичне тіло, у якого відносно положення його елементів змінюється на значну величину при застосуванні достатньо малих сил відповідного напрямку. Таким чином, основною властивістю рідкого тіла є текучість, це визначення відноситься як до краплинних рідин, так і до газів.

Гази заповнюють весь представлений ним об'єм, їх щільність може мінятися в широких межах залежно від прикладених сил. У звичайних умовах об'єм рідини мало залежить від прикладених до неї сил. Поблизу режиму критичного стану різниця між рідиною і газом стає малопомітною.

Властивості твердих тіл, рідин і газів обумовлені їх різною молекулярною будовою. Однак, основною гіпотезою механіки рідини і газу є гіпотеза *безперервності середовища*, відповідно до якої рідина представляється речовиною, яка безперервно, без пустот заповнює простір. Гіпотеза безперервності середовища дозволяє замінити реальні дискретні об'єкти спрощеними моделями, які є матеріальним континуумом, тобто матеріальним середовищем, маса якого безперервно розподілена за об'ємом, тобто рідину можна розглядати як суцільне середовище (континуум), позбавлене молекул і міжмолекулярних просторів. Гіпотеза безперервності середовища означає, що всякий малий елемент об'єму рідини вважається все настільки великим, що містить також дуже велике число молекул.

Згідно гіпотезою безперервності маса середовища розподілена в об'ємі безперервно і нерівномірно.

Гіпотеза суцільної середи підтверджується чисельними експериментами, як за звичайних умов, так і при суттєвих відхиленнях від нормальних умов, дає можливість застосовувати апарат диференціального і інтегрального обчислень, обґрунтовує поняття значення в точці стосовно різних параметрів рідини.

Після приймання гіпотези суцільної середи логічно ввести також поняття рідкої частини – малого об'єму суцільної середи, який при русі може деформуватися, і маса якого не змішується з навколишнім рідким середовищем. Рідка частка розглядується як матеріальний об'єкт, до якого застосовуються всі основні закони.

Гіпотеза суцільної середи може не виконуватися у випадку, якщо розміри області течії стають подібними з довжиною вільного пробігу молекули. Таке положення може мати місце при перебігу розріджених газів.

Оскільки рідина володіє властивістю текучості і легко деформується під дією мінімальних сил, то в рідині не можуть діяти зосереджені сили, а можливе існування лише сил розподілених за об'ємом (масі) або по поверхні. Розподілені сили, що у зв'язку з цим діють на рідині, є по відношенню до рідини зовнішніми. По характеру дії сили можна розділити на дві категорії: масові сили і поверхневі.

*Масові сили* пропорційні масі тіла і діють на кожну рідку частку цієї рідини. До категорії масових сил відносяться сили тяжіння і сили інерції переносного руху. Величина масових сил, віднесена до одиниці маси рідини, носить назву одиничної масової сили. Якщо рідина, знаходиться під дією тільки сил тяжіння, то одиничною силою є прискорення вільного падіння:

$$g = \frac{Mg}{M}$$

де  $M$  - маса рідини.

*Поверхневі сили* рівномірно розподілені по поверхні і пропорційні майдани цієї поверхні. Ці сили, діють з боку сусідніх об'ємів рідкої середи, твердих тіл або газової середи. У спільному випадку поверхневі сили мають дві складові нормальну і тангенціальну. Одинична поверхнева сила називається напругою. Нормальна складова поверхневих сил називається силою тиску  $P$ , а напруга (одинична сила) називається тиском:

$$p = \frac{P}{S}$$

де  $S$  - площа поверхні.

Напруга тангенціальної складової поверхневої сили  $T$  (дотична напруга  $\tau$ ) визначається аналогічним чином (у рідині  $T=0$ , що покоїться).

$$\tau = \frac{T}{S}$$

## **Практичне заняття 2.**

### *Визначення фізичних властивостей рідини.*

До основних фізичних властивостей рідин слід віднести ті її властивості, які визначають особливості поведінки рідини при її русі. Такими є властивості, що характеризують концентрацію рідини в просторі, властивості, що визначають процеси деформації рідини, що визначають величину внутрішнього тертя в рідині при її русі, поверхневі ефекти.

Найважливішою фізичною властивістю рідини, що визначає її концентрацію в просторі, є *щільність* рідини. Під щільністю рідини розуміється маса одиниці об'єму рідини:

$$\rho = \frac{M}{W},$$

де  $M$  - маса рідини;

$W$  - об'єм, займаний рідиною.

Щільність краплинних рідин і газів залежить від температури і тиску.

Є аналогічна характеристика і для газів. Під відносною щільністю газу (по повітрю) розуміється відношення величини абсолютної щільності газу до щільності повітря за стандартних умов.

Про щільність рідини можна судити по ваговому показнику - *питомій вазі* рідини. Під питомою вагою рідини (газу) розуміється вага одиниці об'єму рідини (газу):

$$\gamma = \frac{G}{W},$$

де  $G$ - вага рідини (газу);

$W$ - об'єм, який займає рідина (газ).

Зв'язок між щільністю і питомою вагою рідини такий же як і між масою тіла і її вагою:

$$\gamma = \rho g$$

Розмірність питомої ваги рідини в системі одиниць СІ  $\text{н/м}^3$ .

Краплинні рідини відносяться до категорії погано стискуваних тіл. Оцінка пружних властивостей рідин може здійснюватися по низці спеціальних параметрів:

- *коефіцієнт об'ємного стискування* рідини - відносна зміна об'єму рідині при зміні тиску на одиницю.

$$\beta = -\frac{1}{W_0} \frac{dW}{dp}$$

де  $W_0$  - початковий об'єм рідини (при початковому тиску);

$\beta$  - коефіцієнт об'ємного (пружного) стискування рідини.

Коефіцієнт об'ємного стискування рідини залежить від властивостей самої рідини і не залежить від зовнішніх умов. Коефіцієнт об'ємного стискування рідини має розмірність зворотну розмірності тиску -  $\text{м/н}$ .

*Модуль пружності* рідини  $K$ , залежний від термодинамічного стану рідини (величина зворотна коефіцієнту об'ємного стискування рідини):

$$K = \frac{1}{\beta}.$$

Величина модуля пружності рідини має розмірність напруги -  $\text{н/м}$ .

При русі реальних (в'язких) рідин в них виникає внутрішня напруга, обумовлена *силами внутрішнього тертя* рідини.

Напруга, що виникає при деформації зсуву згідно з гіпотезою Ньютона пропорційна градієнту швидкості в рухомих шарах рідини, а сила тертя між шарами рухомої рідини буде пропорційна площі поверхні рухомих шарів рідини:

$$T = \tau S,$$

де  $T$  - сила тертя між шарами рухомої рідини;

$S$  - площа поверхні шарів рухомої рідини;

$\tau$  - дотична напруга, що виникає в рідині при деформації зсуву

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy}, \quad \mu - \text{коефіцієнт динамічної в'язкості рідини.}$$

Величина *коефіцієнта динамічної в'язкості* рідини при постійній температурі і постійному тиску залежить від внутрішніх (хімічних) властивостей самої рідини.

Окрім коефіцієнта динамічної в'язкості рідини широко використовується *коефіцієнт кінематичної в'язкості* рідини  $\nu$ , що є відношенням коефіцієнта динамічної в'язкості до щільності рідини:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

У системі одиниць СІ коефіцієнт кінематичної в'язкості вимірюється в м/с.

На природних границях в пограничному шарі рідини між молекулами самої рідини і молекулами навколишнього середовища існують сили тяжіння. У пограничному шарі виникає напруга, яка називається поверхневим натягненням рідини. Цій напрузі відповідатимуть *сили поверхневого натягнення*.

Сили поверхневого натягнення малі і виявляються при малих об'ємах рідини. Величина напруги на межі розділу залежить від температури рідини; при збільшенні температури внутрішня енергія молекул зростає і, зменшується напруга в пограничному шарі рідини і, отже, зменшуються сили поверхневого натягнення.

У реальних рідинах завжди знаходиться газ в *розчиненому* стані. Кількість газу, яка може розчинитися в краплинній рідині, залежить від фізико-хімічних властивостей самої рідини і газу, що розчиняється в ній, а також від температури і тиску. Максимальна кількість газу, яка може бути розчинена в даній рідині носить назву граничної газонасиченості для даного газу.

Іншою характеристикою процесу розчинення газу в рідині є тиск насичення, це такий мінімальний тиск в рідині, при якому досягається насичення краплинної рідини газом. Кількість газу розчинного в одиниці об'єму рідини пропорційна тиску.

У рідині може одночасно розчинятися ціла група різних газів; нерідкі випадки, коли краплинна рідина і газ, що розчиняється в ній, мають однакову природу (нафта і вуглеводневі гази), в останньому випадку між рідиною і газом може існувати дуже умовна межа, залежна від температури суміші і інших умов.

При підвищенні температури рідини і, в деяких випадках, при зниженні тиску частка маси краплинної рідини поступово переходить в газоподібний стан (пара). Інтенсивність процесу *пароутворення* залежить від температури кипіння рідини при нормальному атмосферному тиску.

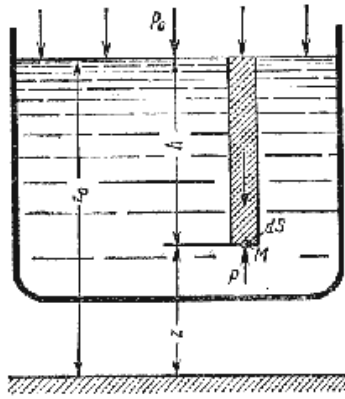
*Адсорбцією* прийнято називати концентрацію однієї з речовин, що відбувається в його поверхневому шарі, тобто на кордоні розділу двох фаз. Адсорбована речовина (у нашому випадку це рідина) називається адсорбатом, а адсорбуюча речовина (у нашому випадку це тверде тіло) називається адсорбентом. Процес адсорбції відбувається на поверхні твердого тіла без впровадження молекул адсорбата в тверде тіло.

У тих випадках, коли молекули адсорбата проникають в поверхневий шар адсорбенту, то такий процес називають абсорбцією. Слід зазначити, що швидкість сорбційних процесів залежить від зовнішніх умов (температура і тиск), а також від властивостей самих речовин.

### **Практичне заняття 3.**

#### ***Основне рівняння гідростатики. Закон Паскаля.***

Розглянемо випадок рівноваги рідини в стані «абсолютного спокою», тобто коли на рідину діє лише сила тяжіння. Оскільки об'єм рідини в посудині малий в порівнянні з об'ємом Землі, то рівень вільної поверхні рідини в посудині можна вважати за горизонтальну площину.



Тиск на вільну поверхню рідини дорівнює атмосферному тиску  $p_0$ . Визначимо тиск  $p$  в довільно вибраній точці М, розташованій на глибині  $h$ . Виділимо біля точки М горизонтальну площину  $dS$ . Побудуємо на даній площині вертикальне тіло, обмежене знизу самою площиною, а зверху (у площині вільної поверхні рідини) її проекцією. Розглянемо рівновагу отриманого рідкого тіла. Тиск на підставі виділеного об'єму буде зовнішнім по відношенню до рідкого тіла і буде направлений вертикально вгору. Запишемо рівняння рівноваги в проекції на вертикальну вісь тіла.

$$pdS - p_0dS - \rho gh dS = 0.$$

Скоротивши всі члени рівняння на  $dS$ , отримаємо:

$$p = p_0 + \rho gh = p_0 + \gamma h$$

Тиск в усіх точках вільної поверхні однаковий і дорівнює  $p_0$ , отже, тиск в усіх точках рідини на глибині  $h$  також однаковий згідно основного рівняння гідростатики. Поверхня, тиск на якій однаковий, називається поверхнею рівня. В даному випадку поверхнею рівня є горизонтальна площина.

З цієї формули ясно, що всяка зміна зовнішнього тиску  $p_0$  викликає зміну тиску рідини, що покоїться, на ту ж величину. Цей результат відомий як *закон Паскаля*.

#### **Практичне заняття 4.**

*Прибори для виміру тиску. Співвідношення одиниць виміру тиску в різних системах одиниць.*

Нормальна складова поверхневих сил називається силою тиску  $P$ , а напруга (одинична сила) називається тиском:

$$p = \frac{P}{S}$$

де  $S$  - площа поверхні.

Величина тиску (іноді в літературі називається гідростатичним тиском) в системі СІ вимірюється в паскалях.

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ н/м}^2.$$

Оскільки ця величина дуже мала, то величину тиску прийнято вимірювати в мегапаскалях МПа

$$1 \text{ МПа} = 1 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

У технічній системі одиниць, що використовується до цих пір, тиск вимірюється в технічних атмосферах, ат

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 0,1 \text{ МПа}, 1 \text{ МПа} = 10 \text{ ат}.$$

У технічній системі одиниць тиск, окрім технічної атмосфери, вимірюється також у фізичних атмосферах, А.

$$1 \text{ А} = 1,033 \text{ ат}.$$

Розрізняють тиск абсолютний, надлишковий і тиск вакууму.

Абсолютним тиском називається тиск в точці вимірювання, відлічений від нуля. Якщо за рівень відліку прийнята величина атмосферного тиску, то різниця між абсолютним тиском і атмосферним називається надлишковим тиском.

$$P_{\text{надл}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{А}}$$

Якщо тиск, вимірюваний в точці, яка нижче за величину атмосферного тиску, то різниця між заміряним тиском і атмосферним називається тиском вакууму

$$P_{\text{вак}} = P_{\text{А}} - P_{\text{абс}}.$$

Надлишковий тиск в рідинах вимірюється манометрами. Це дуже великий набір вимірювальних приладів різної конструкції і різного виконання.

Ртутний барометр складається з вертикальної скляної трубки з міліметровою шкалою і закритим верхнім кільцем, яка заповнена ртуттю, і чаші з ртуттю, в яку опущена трубка нижнім кінцем.

Для вимірювання тиску і рівня рідини в резервуарі служать рідинні прилади. Вони є довільними вертикальними каналами з шкалами, розміченими в одиницях довжини. Однотрубний манометр з'єднується верхнім кінцем із атмосферою, а нижнім - із резервуаром. Ним визначається манометричний тиск на дні резервуару.

Рівнемір з'єднаний обома кінцями з резервуарами і служить для вимірювання рівня рідини в них.

Мановакууметр представляє собою U-образний канал, частково заповнений рідиною. Лівим коліном він підключений до резервуару, а правим - до порожнини, призначений для визначення манометричного або вакуумметричного тиску над вільною поверхнею рідини в резервуарі.

### **Практичне заняття 5.**

#### *Визначення сили тиску рідини на плоскі стінки.*

Згідно основного закону гідростатики величина тиску  $p$  визначається глибиною занурення точки під рівень вільної поверхні  $h$  рідини і величиною щільності рідини  $\rho$ .

Для горизонтальної поверхні величина тиску однакова в усіх точках цієї поверхні, оскільки величина сили при рівномірному розподілі тиску не залежить від орієнтації плоскої стінки  $S$  в просторі і обчислюється за формулою

$$F = pS,$$

то тиск на дні

$$p = p_0 + \rho gh_0,$$

а сила

$$F = (p_0 + \rho gh_0)S_0.$$



Таким чином, сила тиску рідини на горизонтальну поверхню (дно посудини) дорівнює добутку площі цієї поверхні на величину тиску на глибині занурення цієї поверхні.

Сила тиску на похилу поверхню, занурену в рідину. Практичним прикладом такої поверхні може служити похила стінка посудини. Для виведення рівняння і обчислення сили тиску на стінку виберемо наступну систему координат: вісь  $OX$  направимо уздовж перетину плоскості вільної поверхні рідини з похилою стінкою, а вісь  $OZ$  направимо уздовж цієї стінки перпендикулярно осі  $OX$ . Тоді як координатна плоскість  $XOZ$  виступатиме сама похила стінка. На плоскості стінки виділимо малу площину  $dS$ , яка, у зв'язку з малими розмірами, може вважатися горизонтальною. Величина тиску на глибині площини буде дорівнювати:

$$p = p_0 + \rho g z \sin \alpha = p_0 + \rho g h,$$

де  $h$  - глибина занурення площини щодо вільної поверхні рідини (по вертикалі).

$$h = z \sin \alpha.$$

Сила тиску  $dP$  на площину:

$$dP = p dS = (p_0 + \rho g h) dS$$

Для визначення сили тиску на всю змочену частку похилої стінки (частка площини стінки посудини, розташована нижче за рівень вільної поверхні рідини), необхідно проінтегрувати це рівняння по всій змоченій частці площини стінки  $S$ .

$$P = \int_S (p_0 + \rho g h) dS = p_0 S + \rho g \int_S h dS = p_0 S + \rho g \sin \alpha \int_S z dS$$

Інтегралом  $\int_S z dS$  є статичний момент площини  $S$  відносно осі  $OX$ . Він, як відомо,

дорівнює добутку цієї площини на координату її центру тяжіння  $z_c$ . Тоді остаточно:

$$P = p_0 S + \rho g \sin \alpha z_c S = (p_0 + \rho g h_c) S = p_c S.$$

Таким чином, сила тиску на похилу плоску поверхню, занурену в рідину дорівнює змоченій площі цієї поверхні на величину тиску в центрі тяжіння цієї площі. Сила тиску на плоску стінку крім величини і напрямку характеризується також і точкою прикладення цієї сили, яка називається центром тиску.

Центр тиску сили атмосферного тиску  $p_0 S$  знаходитиметься в центрі тяжкості площини, оскільки атмосферний тиск передається на всі точки рідини однаково. Центр тиску самої рідини на площину можна визначити виходячи з теореми про момент рівнодіючої сили. Згідно цієї теореми момент рівнодійної сили щодо осі  $OX$  дорівнюватиме сумі моментів сил відносно цієї ж осі.

$$P_{атм} \cdot z_D = \int_S z \cdot dP_{атм},$$

$$\rho g \cdot \sin \alpha \int_S z^2 dS$$

$$\text{звідки } z_D = \frac{\rho g \cdot \sin \alpha \int_S z^2 dS}{\rho g \cdot \sin \alpha \cdot z_c \cdot S} = \frac{J_x}{z_c \cdot S},$$

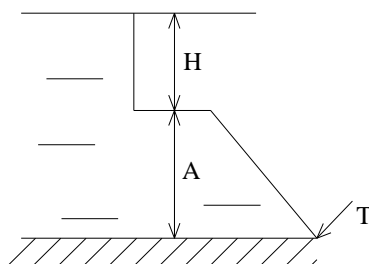
де  $z_D$ - положення центру надлишкового тиску на вертикальній осі;

$J_x$ - момент інерції площини  $S$  щодо осі  $OX$ .

Звідси центр тиску (точка прикладення рівнодіючої сили надлишкового тиску) розташований завжди нижче за центр тяжіння площини. У випадках, коли зовнішньою силою, що діє на вільну поверхню рідини, є сила атмосферного тиску, то на стінку посудини одночасно діятимуть дві однакові по величині і протилежні по напрямку сили, обумовлені атмосферним тиском (на внутрішню і зовнішню сторони стінки).

### Завдання 1.

Труба квадратного перетину закрита затвором АВ, який може обертатися навколо горизонтальної осі. Визначити силу Т, що утримує квадратний щит в закритому положенні.



### Рішення.

Для визначення сили Т необхідно розглянути умову рівноваги щита відносно шарніра:

$$\sum M = P \cdot \left( \frac{A}{2 \sin \varphi} \right) - T \left( \frac{A}{\sin \varphi} \right) = 0;$$

$$\text{Звідки } T = \frac{P}{2} (H).$$

де Р – сила тиску рідини на квадратний щит, яка дорівнює добутку площі щита на його тиск в центрі тяжкості:

$$\omega = \left( \frac{A}{\sin \varphi} \right)^2 - \text{площа щита};$$

$$P_{\text{цт}} = (H + a/2) \cdot 1000 \cdot 9,81 \text{ (Па)} - \text{тиск в центрі тяжкості щита.}$$

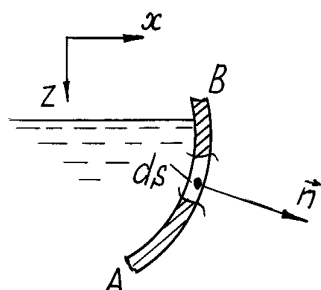
Сила тиску рідини на щит  $P = \omega \cdot P_{\text{цт}}$ , а необхідна сила

$$T = \frac{P}{2} (H).$$

### Практичне заняття 6.

*Визначення сили тиску рідини на циліндричні стінки.*

Задача зводиться до знаходження сили тиску рідини на поверхні стінок, що обмежують її.



Розглянемо криволінійну поверхню АВ довільної форми, площа якої S. Виділимо на ній елементарну площину dS, нехай  $\vec{n}$  - орт зовнішньої нормалі. Сила, що діє на цю площину

$$d\vec{F} = p \vec{n} dS$$

де p - гідростатичний тиск в центрі площини.

Запишемо цей вираз в проекціях на осі

координат і отримаємо  $dS_z$  - вертикальна,  $dS_x$  - горизонтальна проекції  $dS$ .

Розглянемо горизонтальну складову. Відомо, що інтеграл  $F_x$  є статичний момент площини, який дорівнює добутку  $h_{cm}S_x$ , де  $h_{cm}$  - координата центру тяжіння вертикальної проекції.

$$\text{Отже} \quad F_x = \rho g h_{cm} S_x,$$

тобто горизонтальна складова дорівнює добутку вертикальної проекції стінки на гідростатичний тиск в центрі тяжкості цієї проекції.

Можливі два випадки розташування криволінійної поверхні під рівнем рідини. У першому випадку рідина розташована над твердою поверхнею; тіло тиску заповнене рідиною і вважається позитивним, а вертикальна складова сили спрямована вниз. У другому випадку тіло тиску не заповнене рідиною і вважається негативним; вертикальна сила тиску спрямована вгору.

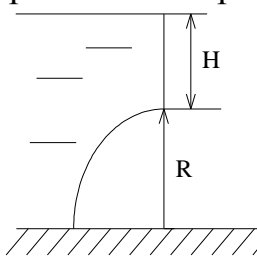
Якщо криволінійна поверхня  $S$  замкнута і повністю занурена під рівень рідини, яка абсолютно покоїться, то дія рідини зводиться до однієї вертикальної сили. Щоб знайти вертикальну силу, проектуємо  $S$  на вільну поверхню рідини. Проектуючи вертикалі відзначають на поверхні тіла замкнуту лінію, яка ділить поверхню на дві частини. Для верхньої частини тіло тиску позитивне і відповідна йому сила направлена вертикально вниз, а для нижньої – тіло тиску негативне і сила направлена вгору. Позначивши об'єми цих тіл тиску відповідно через  $V_B$  і  $V_H$  знайдемо величину результуючої вертикальної сили:

$$F_z = \rho g (V_H - V_B) = \rho g V_m,$$

де  $V_m$  – об'єм тіла.

### **Завдання 1.**

Визначити силу тиску рідини на циліндричну поверхню АВ і напрям дії сили до горизонту. Ширіна поверхні біля напрямі нормалі до креслення -b.



### **Рішення.**

Горизонтальна складова сили тиску на циліндрову поверхню дорівнює силі тиску на проекцію цієї поверхні на вертикальну площину:

$$P_x = 1000 \cdot 9,81 \cdot (H+R) / 2 \cdot (H+R) \cdot b, (H).$$

Вертикальна складова сили тиску на циліндрову поверхню дорівнює вазі рідини в об'ємі тіла тиску.

Тілом тиску називається об'єм, розміщений між поверхнею, вертикальною площиною, проведеною через крайні точки поверхні і вільною поверхнею рідини.

Якщо тіло тиску заповнене рідиною, воно називається дійсним і вертикальна складова сили тиску  $P_y$  спрямована вниз; якщо в тілі тиску немає води – тіло тиску називають уявним, а вертикальна складова сили тиску  $P_y$  спрямована вгору.

$$P_y = \rho \cdot g \cdot V_{\text{тт}},$$

де  $V_{\text{тт}}$  – об'єм тіла тиску.

$$P_y = 1000 \cdot 9,81 \cdot V_{\text{тт}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot (R \cdot (R+H) - R^2/4) \cdot b.$$

Сила тиску складе:

$$P = \sqrt{(P_x^2 + P_y^2)}, \text{ (Н)}.$$

Кут до горизонту обчислюємо за формулою:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{P_x}{P_y}\right).$$

### **Практичне заняття 7.**

*Закон Архімеда. Визначення сили, що виштовхує.*

*Умови плавання тіл. Умові остійного плавання.*

Рівнодіюча сил тиску носить назву виштовхуючої сили, ця сила направлена вертикально вгору і чисельно дорівнює вазі рідини в об'ємі витисненому тілом. Останнє положення отримало назву закону Архімеда. Закон Архімеда часто формулюють трохи інакше: «тіло, занурене в рідину втрачає в своїй вазі стільки скільки важить витиснена ним рідина».

Таким чином, на занурене в рідину тіло діють дві сили: вага тіла  $G = \rho_m g \cdot W_m$  і виштовхуюча сила  $R = -\rho_{\text{ж}} g \cdot W_m$ .

Якщо  $\rho_m > \rho_{\text{ж}}$ , то  $G_m > R$ . - тіло тонутиме.

Якщо  $\rho_m < \rho_{\text{ж}}$ , то  $G_m < R$ . -тіло спливатиме до тих пір, поки вага тіла і величина виштовхуючої сили, що діє на занурену частину об'єму тіла, не урівноважаться.

Якщо  $\rho_m = \rho_{\text{ж}}$ , то  $G_m = R$ . - тіло знаходитиметься в зваженому стані в рідині, тобто плавати всередині рідини на будь-якій заданій глибині.

Для тіла, плаваючого на поверхні рідини, має виконуватися умова:

$$\rho_m g \cdot W_m = \rho_{\text{ж}} g \cdot W_2.$$

### **Практичне заняття 8.**

*Особливості рівноваги в стисливому середовищі. Визначення розподілу тиску в атмосфері в залежності від геодезичної відмітки.*

Гази відносяться до стислих рідин. Рівняння рівноваги і руху газів відмінне від таких же рівнянь для краплинних рідин тим, що необхідно враховувати стислість газів. Тому диференціальні рівняння рівноваги є загальними для краплинних рідин і газів.

Розглянемо рівновагу газів і вирішимо основну задачу – розподіл гідростатичного тиску, тобто визначимо функцію  $p = f(x, y, z)$ .

У зв'язку з особливостями характеристичного рівняння розглянемо закон розподілу тиску:

- 1) щільність постійна незалежно від теплового режиму;
- 2) щільність змінюється по ізотермічному закону

$$\rho = \frac{p}{gR'T} = \frac{p}{RT};$$

3) щільність змінюється по політропному закону

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1/n}.$$

*Розподіл тиску при  $\rho = \text{const}$ .* В цьому випадку розподіл тиску в сталому газовому середовищі аналогічний такому для краплинної рідини. Основне диференціальне рівняння гідростатики має вигляд

$$dp = -\rho g dz \quad \text{або} \quad \frac{dp}{\rho} + g dz = 0.$$

Інтегруючи це рівняння з урахуванням  $\rho = \text{const}$ , отримуємо  $\frac{p}{\rho} + gz = C$ .

Постійна інтегрування  $C$  визначається з умов на границі, в результаті отримуємо

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_0}{\rho} + g(z_0 - z).$$

З рівняння видно, що тиск знижується зі збільшення висоти положення даної точки. *Розподіл тиску при  $T = \text{const}$ .* В цьому випадку основне диференціальне рівняння матиме вигляд

$$dp = -\rho g dz = -g \frac{p}{RT} dz \quad \text{або} \quad g dz = -RT \frac{dp}{p}.$$

Інтегруючи рівняння отримаємо  $g(z_2 - z_1) = RT \ln \frac{p_1}{p_2}$ .

Таким чином, при ізотермічному процесі збільшення висоти розміщення точки при зміні тиску відповідає логарифмічному закону.

*Розподіл тиску у політропному процесі.* В цьому випадку  $\rho = \rho_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1/n}$ .

Роблячи необхідну підстановку, знаходимо

$$dp = -\rho g dz = -\rho_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1/n} g dz, \quad \text{звідки} \quad dz = -\frac{p_0^{1/n}}{\rho_0 g} \cdot \frac{dp}{p^{1/n}} = A p^{-1/n} dp,$$

$$A = \frac{p_0^{1/n}}{\rho_0 g}.$$

Роблячи відповідні підстановки і перетворення, отримаємо

$$h = 3,4 \frac{p_0^{0,71}}{\rho_0 g} (p_0^{0,29} - p^{0,29}).$$

Дуже частона практиці такий розрахунок виявляється достатнім.

*Розподіл температури.* Використовуючи формулу

$$gz + \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p}{\rho} = gz_0 + \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0},$$

можна отримати рівняння, яке описує закон розподілу температури в сталому газовому середовищі:

$$gz + \frac{n}{n-1} \cdot RT = gz_0 + \frac{n}{n-1} \cdot RT_0,$$

що представляє собою закон розподілу температури.

Вважаючи, що  $h = (z - z_0)$  і виконавши відповідні перетворення отримаємо

$$T = T_0 - \frac{n-1}{nR} hg.$$

Звідси виходить, що зміна температури по висоті відбувається по лінійному закону.

### **Завдання 1.**

Визначити висоту границі повітряного шару над земляною поверхнею, якщо щільність повітря  $\rho = 1,175 \text{ кг/м}^3$ .

### **Рішення.**

З основного рівняння

$$h = (z - z_0) = \frac{p_0 - p}{\rho g} = \frac{p_0 - 0}{\rho g} = \frac{10,1 \cdot 10^4}{11,5} = 8800 \text{ м.}$$

Такий результат не відповідає реальним умовам і показує, що використання предположення про сталість щільності при великих різницях висот приводить до значних невязок.

### **Завдання 2.**

Визначити тиск на висоті  $h = 500 \text{ м}$  над рівнем моря, якщо тиск на ріні моря дорівнює  $p_0 = 10,1 \cdot 10^4 \text{ Па}$  і температура  $T = 273 + 27 = 300 \text{ К}$ .

### **Рішення.**

Розраховуємо  $RT$  (при  $R = 287,14 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ )

$$RT = 287,14 \cdot 300 = 86,2 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{с}^2;$$

$$\frac{hg}{TR} = \frac{500 \cdot 9,8}{86,2 \cdot 10^3} = 0,057,$$

Тоді необхідний тиск

$$p = \frac{p_0}{e^{gh/RT}} = \frac{10,1 \cdot 10^4}{1,005} \approx 10,1 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

## **II. ДИНАМІКА РІДИНИ І ГАЗУ.**

### **Практичне заняття 9.**

*Способи математичного відображення руху рідкої частки.*

Рідиною є фізичне тіло, що складається з нескінченно великого числа нескінченно малих частинок. З великою мірою точності ми можемо розглянути рідке тіло як суцільне середовище, ця модель дозволяє значно спростити вирішення більшості гідравлічних задач. Проте, нерідкі випадки, коли рівень дослідження руху рідкого тіла вимагає глибокого знання фізичних процесів що відбуваються в рухомій рідині на молекулярному рівні. У таких випадках зручна модель суцільного середовища може виявитися неприйнятною.

Виходячи з практики вивчення гідравліки як прикладної дисципліни, можна згадати два методи вивчення руху рідини: метод Лагранжа і метод Ейлера.

Опис руху рідини методом Лагранжа зводиться до розгляду положення частинок рідини у будь-який момент часу. Тоді можна стверджувати, що частки рідини при своєму русі беруть участь в трьох видах руху (поступальному, обертальному і деформації). Для опису такого складного руху рідини необхідно, таким чином, визначити як траєкторії часток, так і гідравлічні характеристики часток (щільність  $\rho$ , температуру  $T$  і швидкість  $u$ ) у функції часу і координат.

Завдання зводиться до вирішення систем диференціальних рівнянь в приватних похідних для кожної частки рідини.

Метод Лагранжа, зважаючи на громіздкість і трудність вирішення, може використовуватися у випадках детального вивчення поведінки лише окремих частинок рідини.

Суть іншого методу, методу Ейлера, полягає в тому, що рух рідини підміняється зміною поля швидкостей. Під полем швидкостей розуміють деяку досить велику сукупність точок нескінченного простору зайнятого рухомою рідиною, коли в кожній точці простору в кожен момент часу знаходиться частинка рідини з певною швидкістю (вектором швидкості). Оскільки простір нескінченний і безперервний, ми маємо досить повний масив даних про швидкості, щоб визначити (задати) поле в кожній його точці. Умовно, таке поле можна вважати за безперервне.

Не дивлячись на те, що початкові умови створення моделі рухомої рідини досить складні, проте, метод Ейлера дуже зручний для розрахунків.

Поле швидкостей руху рідини іноді називають гідродинамічним полем по аналогії з електромагнітним, тепловим і ін. полями. Таке поле називають нестационарним гідродинамічним полем. У окремому випадку, коли в усіх точках нерухомого простору з часом попередні частинки рідини змінювалися іншими з такими ж швидкостями, то поле швидкостей в часі не міняється. Таке гідродинамічне поле називають стаціонарним. Відповідно до цього розрізняють і два види руху рідини: стає, коли поле швидкостей є стаціонарним і нестале при нестационарному гідродинамічному полі.

### **Практичне заняття 10.**

*Використання рівняння нерозривності для потоків рідини і газу.*

При розгляді руху рідини вважають що в потоці рідини повністю заповнює займаний нею простір без утворення порожнеч, тобто рух рідини відбувається нерозривно. В цьому випадку справедливе рівняння нерозривності руху, що виводиться на основі закону збереження маси.

Отримаємо спочатку рівняння нерозривності при сталому русі рідини для елементарної струйки.

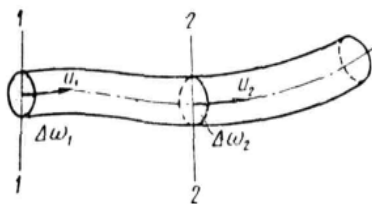
Хай маємо елементарну струйку. Візьмемо перетин 1-1 з площею  $\Delta s_1$  і швидкістю руху часток рідини  $u_1$ . Елементарна витрата через перетин 1-1 дорівнює

$$\Delta Q_1 = u_1 \Delta s_1.$$

Потім візьмемо перетин 2-2 в цій же струйці з площею перетину  $\Delta s_2$  і швидкістю  $u_2$ . Елементарна витрата через перетин 2-2 дорівнює

$$\Delta Q_2 = u_2 \Delta s_2.$$

Але по властивості елементарної струйки притока і відтік рідини через її бічну поверхню неможливий; крім того, в проміжку 1-2, який зберігає незмінні розміри, не утворюється порожнеч і не відбувається переущільнень; означає що кількість рідини, що



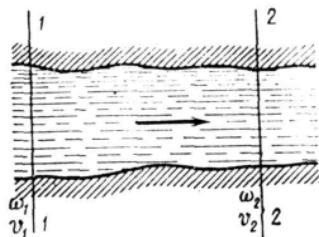
протікає в одиницю часу через перетини 1-1 і 2-2, має бути однакою, тобто  $\Delta Q_1 = \Delta Q_2$ . Зважаючи, що перетини 1-1 і 2-2 прийняті довільно, можна в спільному випадку для елементарної струйки написати

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \Delta Q_3 = \dots = \Delta Q_n = \Delta Q = \text{const},$$

або

$$u_1 \Delta s_1 = u_2 \Delta s_2 = u_3 \Delta s_3 = \dots = u_n \Delta s_n = \Delta Q = \text{const}.$$

Це і є рівняння нерозривності (суцільності) для елементарної струйки, яке читається так: елементарна витрата рідини  $\Delta Q$  при сталому русі є величина постійна для всієї елементарної струйки.



Нехай тепер маємо потік рідини. Взявши в потоці два довільні перетини 1-1 і 2-2 і, представивши живі перетини, як ті, що складаються з суми елементарних струйок, можна написати

$$Q_1 = \sum_{s_1} u_1 \Delta s_1 \text{ — витрата рідини в перетині 1-1;}$$

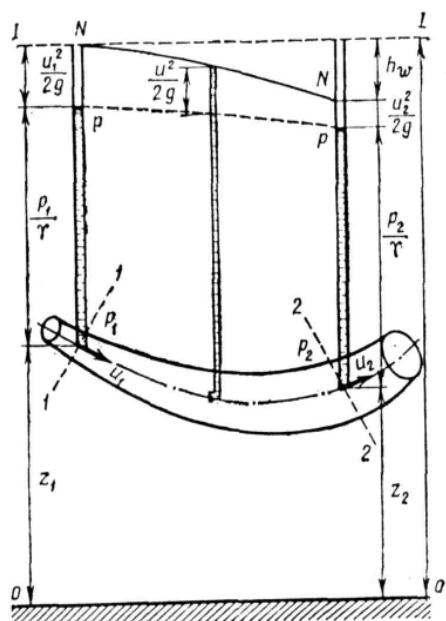
$$Q_2 = \sum_{s_2} u_2 \Delta s_2 \text{ — витрата рідини в перетині 2-2.}$$

Але оскільки швидкості дотичні до бічної поверхні потоку, то в проміжок між перетинами 1-1 і 2-2 через бічну поверхню руху рідини не відбувається; не змінюється і об'єм проміжку. Отже, в проміжок через перетин 1-1 поступає стільки ж рідини, скільки за той же час виходить  $Q_1 = Q_2$ . Але оскільки перетини 1-1 і 2-2 взяті довільно, то можна написати, що  $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = Q = \text{const}$  або, виражаючи витрату рідини в перетинах через середню швидкість  $v$ , отримаємо  $v_1 s_1 = v_2 s_2 = \dots = v_n s_n = Q = \text{const}$ .

Це і є рівняння нерозривності для потоку рідини, яке читається так: витрата рідини через будь-який перетин потоку при сталому русі є величина постійна.

З рівняння для двох перетинів можна написати

$$v_1/v_2 = s_2/s_1, \text{ тобто середні швидкості потоку зворотнопропорційні площам відповідних живих перетинів.}$$



### Практичне заняття 11.

Рівняння Бернуллі для сталого руху невязкої нестискаємої рідини.

Виділимо в сталому потоці реальної рідини елементарну струйку і визначимо питому енергію рідини в двох довільних перетинах 1-1 і 2-2.

Висоти положення центрів першого і другого перетинів будуть відповідно  $z_1$  і  $z_2$ ; гідродинамічний тиск і цих же точках  $p_1$  і  $p_2$  швидкості течії —  $u_1$  і  $u_2$ . Тоді повна питома енергія елементарної струйки в перетині 1-1 дорівнює



$$e_1 = \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1,$$

а в перетині 2-2

$$e_2 = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2.$$

Практично завжди  $e_2 < e_1$ , оскільки частка повної енергії витрачається на подолання сил опору (тертя) при русі рідини від перетину 1-1 до перетину 2-2. Позначимо ці втрати  $h_w$ . Тоді відповідно до закону збереження енергії можна написати, що  $e_1 = e_2 + h_w$  і отримаємо

$$\frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_w.$$

Це і є рівняння Д. Бернуллі для елементарної струйки реальної рідини при сталому русі, яке встановлює зв'язок між швидкістю руху, тиском в рідині і положенням точки в просторі. Воно справедливе для будь-яких двох перетинів, оскільки перетини 1-1 і 2-2 були взяті довільно.

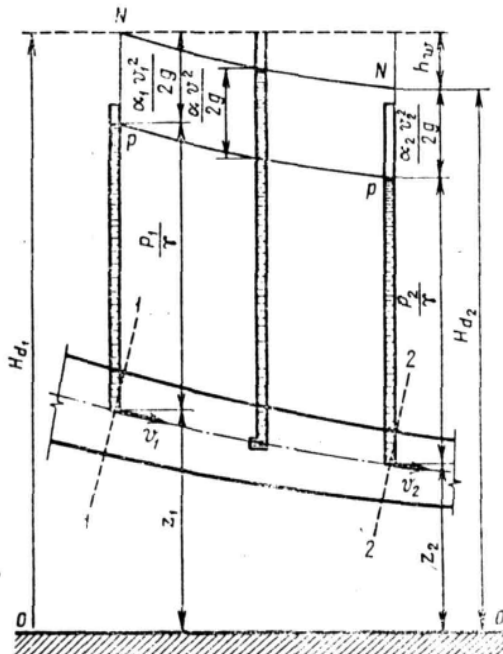
Для ідеальної рідини, де відсутні сили тертя  $h_w = 0$  і рівняння Бернуллі буде виглядати

$$\frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2.$$

Але оскільки перетини 1-1 і 2-2 взяті довільно, то в спільному вигляді рівняння Бернуллі для елементарної струйки ідеальної рідини записується так:

$$\frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{const}.$$

Рівняння Д. Бернуллі для потоку. Розглянемо потік при сталому русі, що плавно змінюється. Виберемо довільно два перетини 1-1 і 2-2, по осях яких відповідно маємо  $z_1$  і  $z_2$  – вертикальні координати осі потоку над довільною площиною порівняння 0-0,  $p_1$  і  $p_2$  гідродинамічний тиск, в тих же точках  $v_1$  і  $v_2$  – середні швидкості в перетинах 1-1 і 2-2.



Повну питому енергію потоку визначаємо по формулі: перетин 1-1

$$E_1 = \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1,$$

перетин 2-2

$$E_2 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2.$$

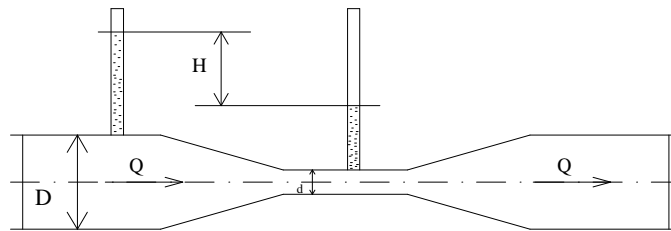
Очевидно  $E_2 < E_1$  оскільки частка енергії витратиться на подолання сил опору (тертя). Позначимо втрату енергії на цій ділянці –  $h_w$ . Тоді можна написати, що  $E_1 = E_2 + h_w$  і, підставляючи значення  $E_1$  і  $E_2$  отримаємо

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_w$$

- рівняння Д. Бернуллі для потоку рідини, є основним рівнянням гідродинаміки; з його допомогою отримано багато розрахункових формул і вирішується низка практичних завдань. Рівняння Бернуллі встановлює математичний зв'язок між основними елементами руху рідини, тобто середньою швидкістю і гідродинамічним тиском.

### Завдання 1.

Визначити витрату через водомір Вентурі, якщо різниця показань п'єзометрів  $H$  (м.вод.ст.), діаметр вузької частини  $d$ , діаметр широкої частини  $D$ .



### Рішення.

Для вирішення завдання вибираємо площину порівняння по горизонтальній осі трубопроводу і складаємо рівняння Бернуллі для перетину в широкій і вузькій частинах труби Вентурі.

$$Z_1 + P_1/\gamma + V_1^2/2g = Z_2 + P_2/\gamma + V_2^2/2g;$$

Різниця п'єзометричних напорів складає:

$$H = (Z_1 + P_1/\gamma) - (Z_2 + P_2/\gamma) = V_2^2/2g - V_1^2/2g;$$

Виражаючи швидкість потоку з рівняння нерозривності через витрату отримаємо:

$$H = (16Q^2)/(2g\pi^2) \cdot (1/d^4 - 1/D^4);$$

Остаточно отримуємо:

$$Q = ((2gH\pi^2)/(16(1/d^4 + 1/D^4)))^{1/2}.$$

### Практичне заняття 12.

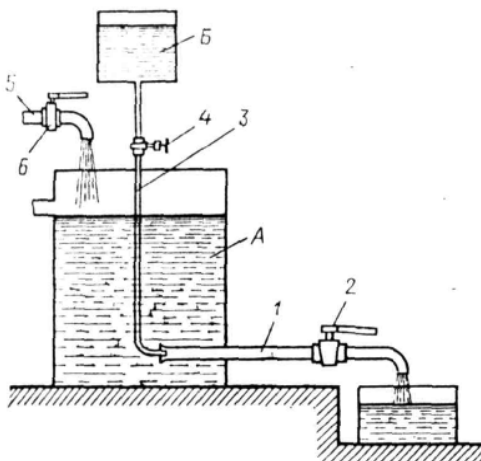
Визначення режиму руху рідини за допомогою критеріїв подібності.

#### Критерій Рейнольдса.

Залежно від роду рідини, швидкості її руху і характеру стінок, що обмежують потік, розрізняють два основні режими руху: ламінарний і турбулентний.

*Ламінарним* називають впорядкований рух, коли окремі шари ковзають один по одному, не перемішуючись.

*Турбулентним* називають режим, при якому спостерігається безладний рух,



коли частки рідини рухаються по складних траєкторіях і шари рідини постійно перемішуються один з одним.

Лабораторні дослідження режимів руху і питання їх впливу на характер залежності втрат напору від швидкості вперше досліджував англійський фізик Рейнольдс.

На малюнку представлена установа Рейнольдса для дослідження режимів руху рідини. Посудина *A* заповнюється випробовуваною рідиною. До посудини *A* в нижній її частині приєднана скляна трубка *1* з краном 2, яким регулюється швидкість течії в трубці. Над посудиною *A* розташована посудина *B* з розчином фарби. Від посудини *B* відходить трубка 3 з краном 4. Кінець трубки 3 заведений в скляну трубку 1. Для поповнення посудини *A* служить трубка 5 із запірним пристроєм 6.

При ламінарному режимі руху рідини по трубці 1 струйка розчину фарби, що витікає з трубки 3, має вид чітко витягнутої нитки уздовж трубки 1.

По мірі відкриття крана 2, збільшується швидкість руху і режим руху переходить в турбулентний, при цьому струйка набуває хвиляподібного характеру, а при ще більшій швидкості зовсім розмивається і змішується з рідиною в трубці. При поступовому закритті крана ці явища протікають в зворотньому порядку, тобто турбулентний режим замінюється ламінарним.

Досліди показали, що перехід від турбулентного режиму до ламінарного відбувається при певній швидкості (ця швидкість називається *критичною*), яка різна для різних рідин і діаметрів труб; при цьому критична швидкість зростає із збільшенням в'язкості рідини і із зменшенням діаметру труб.

Рейнольдсом і низкою інших учених дослідним шляхом було встановлено, що ознакою режиму руху є деяке безрозмірне число, що враховує основні характеристики потоку

$$Re = vR/\nu,$$

де  $\nu$  – швидкість, м/сек;

$R$  - гідравлічний радіус, м;

$\nu$  - кінематичний коефіцієнт в'язкості, м<sup>2</sup>/сек.

Це відношення називається *числом Рейнольдса*. Значення числа  $Re$ , при якому турбулентний режим переходить в ламінарний, називають критичним числом Рейнольдса  $Re_{кр}$ .

Якщо фактичне значення числа  $Re$  буде більше критичного  $Re > Re_{кр}$  – режим руху турбулентний, коли  $Re < Re_{кр}$  – режим ламінарний.

Для напірного руху в циліндрових трубах зручніше число Рейнольдса визначати по відношенню до діаметру  $d$ , тобто

$$Re = v \cdot d/\nu,$$

де  $d$  – діаметр труби.

В цьому випадку  $Re_{кр}$  виходить рівним  $\sim 2300$ .

### **Практичне заняття 13.**

*Визначення втрат напору. Визначення коефіцієнту гідравлічного опору  $\lambda$ . Зони гідравлічного опору.*

Вище було отримано два основні рівняння гідродинаміки: рівняння збереження енергії (рівняння Д. Бернуллі), що зв'язує середні швидкості і тиск, і

рівняння нерозривності потоку (збереження маси) для нестискуваної рідини, які були записані в наступному вигляді:

$$\frac{\alpha v}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z + h_w = \text{const};$$

$$Q = v \cdot \omega = \text{const}.$$

При вирішенні деяких завдань цілком досить цих рівнянь, якщо нехтувати втратами енергії (натиску)  $h_w$ , оскільки витрата  $Q$  і повний натиск  $H$  зазвичай задані або можуть бути визначені.

Але більшість завдань не можна вирішити, якщо нехтувати втратами натиску  $h_w$ . У таких випадках є два рівняння і три невідомих  $v, p$  і  $h_w$ .

Для подолання сил гідравлічного тертя і збереження поступального руху рідини необхідно прикласти силу, направлену в бік руху і рівну силам опору. Роботу цієї сили називають втратами напору по довжині потоку (путні втрати напору) і позначають через  $h_{dl}$ .

Мережі трубопроводів, які розподіляють або відводять рідину від споживачів, змінюють свій діаметр (перетин); на мережах влаштовуються повороти, відгалуження, встановлюються запірні пристрої тощо. В цих місцях потік змінює свою форму, різко деформується. Внаслідок зміни форми виникають додаткові сили опору, так звані місцеві опори. На їх подолання витрачається напір. Напір, що витрачається на подолання місцевих опорів, називають місцевими втратами напору і позначають через  $h_m$ .

Загальні втрати напору дорівнюють сумі втрат напору по довжині і місцевих

$$h_w = h_{dl} + h_m, \quad h_{dl} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

де  $l$  – довжина ділянки труби, м;

$d$  – внутрішній діаметр трубопроводу, м;

$v$  – середня швидкість потоку, м/сек;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/сек<sup>2</sup>;

$\lambda$  – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного тертя.

Формула була отримана емпіричним шляхом і названа формулою Дарсі-Вейсбаха.

Місцеві втрати напору визначають як добуток швидкісного напору безпосередньо поблизу місцевого опору  $\zeta$ , по формулі

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}.$$

Загальної теорії для визначення коефіцієнтів місцевих опорів, за винятком окремих випадків, немає. Тому коефіцієнти місцевих опорів, як правило, знаходять дослідним шляхом.

Коефіцієнт гідравлічного тертя при ламінарному режимі зворотньопропорційний числу Рейнольдса

$$\lambda = \frac{64v}{vd} = \frac{64}{Re}.$$

Експериментами встановлено, що коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  у формулі Дарсі-Вейсбаха, а відповідно і втрати напору по довжині  $h_{\text{дл}}$  залежать від числа Рейнольдса і від відносної шорховатості. Це витікає і з теоретичних досліджень.

Було встановлено, що при великих числах Рейнольдса і високій шорховатості коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  в трубах не залежить від в'язкості рідини (числа Рейнольдса), а залежить лише від відносної шорховатості (у цих умовах труби і русла називають цілком шорховатим).

Труби ж, в яких коефіцієнт  $\lambda$  залежить тільки від числа Рейнольдса і не залежить від відносної шорховатості, що буває при порівняно малих  $Re$  і  $k/d$ , називають гідравлічно гладкими. При цьому один і той же трубопровід в одних умовах може бути гідравлічно гладким, а в інших – цілком шорховатим.

Умови, в яких  $\lambda$  залежить і від числа Рейнольдса і від відносної шорховатості, називаються перехідною областю. Це пояснюється тим, що при малих числах Рейнольдса поблизу стінок зберігається порівняно товстий ламінарний шар, і виступи шорховатості обтікаються рідиною без утворення і відриву вихорів. Властивості поверхні стінок трубопроводу в цьому випадку не впливають на опір.

Із збільшенням числа Рейнольдса ламінарний шар стає тоншим і не покриває виступів шорховатості; при цьому від виступів шорховатості починають відриватися вихори, і властивості поверхні впливають на опір руху.

Оскільки на характер опорів впливає не лише відносна шорховатість, але і форма і розподіл виступів по поверхні, то в практику розрахунків було введено поняття про еквівалентну шорховатість  $k_e$ . Під нею розуміють таку висоту виступів шорховатості, складеної з піщинок однакового розміру, яка дає при підрахунках однакове із заданою шорховатістю значення коефіцієнта гідравлічного тертя  $\lambda$ .

Залежно від діапазону вибираємо формулу для обчислення коефіцієнта динамічного тертя  $\lambda$ :

$$\text{якщо } Re < 10 \frac{d}{k_e}, \text{ то } \lambda = \frac{0.3164}{(Re)^{0.25}},$$

$$\text{якщо } 10 \frac{d}{k_e} < Re < 500 \frac{d}{k_e}, \text{ то } \lambda = 0.11 \left( \frac{68}{Re} + \frac{k_e}{d} \right)^{0.25},$$

$$\text{якщо } Re > 500 \frac{d}{k_e}, \text{ то } \lambda = 0.11 \left( \frac{k_e}{d} \right)^{0.25}.$$

### **Завдання 1.**

Визначити коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  для каналу прямокутної форми з перетином  $a \cdot b$ , (мм) при витраті рідини  $Q$  (л/с). Рідина – вода, коефіцієнт шорховатості стінок каналу  $k_s$  (мм).

### **Рішення.**

Визначаємо еквівалентний діаметр прямокутного каналу:

$$d_{ек} = \frac{2 \cdot ab}{(a+b)} (м);$$

Визначаємо величину критерію Рейнольдса:

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

де  $V$  - швидкість руху рідини в каналі, (м/с), визначається як

$$V = \frac{Q(м^3/с)}{\omega(м^2)} (м/с);$$

$\omega$  – площа живого перетину каналу, для прямокутного каналу  $\omega = a \cdot b$ , (м<sup>2</sup>);

$\nu = 1,01 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – коефіцієнт кінематичної в'язкості води при температурі  $t$ , °С.

Залежно від діапазону вибираємо формулу для обчислення коефіцієнта динамічного тертя  $\lambda$ :

$$\text{якщо } Re < 10 \frac{d}{k_e}, \text{ то } \lambda = \frac{0.3164}{(Re)^{0.25}},$$

$$\text{якщо } 10 \frac{d}{k_e} < Re < 500 \frac{d}{k_e}, \text{ то } \lambda = 0.11 \left( \frac{68}{Re} + \frac{k_e}{d} \right)^{0.25},$$

$$\text{якщо } Re > 500 \frac{d}{k_e}, \text{ то } \lambda = 0.11 \left( \frac{k_e}{d} \right)^{0.25}.$$

### **Практичне заняття 14.**

*Задачі розрахунку напірних трубопроводів.*

*Побудова графіку п'єзометричних напорів.*

Рухомий потік рідини володіє енергією трьох видів: потенційною енергією положення, потенційною енергією тиску, кінетичною енергією – частина енергії рідини при русі витрачається на подолання опорів. Баланс енергій в двох довільно узятих перетинах потоку рідини виражається рівнянням Бернуллі:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} + h_w,$$

де  $Z$ ,  $P/\gamma$ ,  $U^2/2g$  - питомі енергії, тобто віднесені до одиниці ваги. Це енергетична інтерпретація рівняння Бернуллі; якщо ж члени рівняння Бернуллі розглядаються як вертикальні відрізки, тоді говорять про геометричне тлумачення рівняння Бернуллі:

$Z_1, Z_2$  - висоти положення, тобто відстані від площості порівняння (горизонтальної координатної площості) до центру тяжіння живого перетину потоку;

$P_1/\gamma$ ,  $P_2/\gamma$  - п'єзометричні висоти, тобто висота піднімання рідини в п'єзометрі;

$U_1^2/2g$ ,  $U_2^2/2g$  - швидкісні напори, тобто висота підйому рідини за рахунок кінетичної енергії;

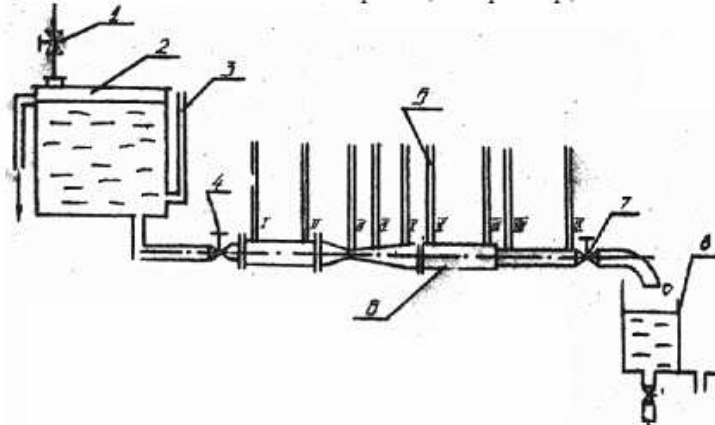
$Z$ ,  $P/\gamma$  - гідростатичний напор;

$Z + P/\gamma + U^2/2g$  - повний напор;

$h_w$  - втрати напору на відстані між першим і другим перетином.

Зміни висоти положення, гідростатичного і гідродинамічного напоровши вздовж потоку рідини характеризуються відповідно геометричною, п'єзометричною і напірною лініями.

Для ідеальної рідини, тобто рідині, позбавленій в'язкості, напірна лінія - горизонтальна лінія, тому що в рідині немає втрат гідродинамічного натиску  $h_w = 0$ . Для реальної рідини напірна лінія - ламана, низхідна лінія.



Установка для побудови п'єзометричної і напірної ліній:

1 - вентиль напірний; 2 - бак; 3 - водомірне скло; 4 - вентиль; 5 - п'єзометр;  
6 - труба; 7 - вентиль регулювальний; 8 - мірний бак.

Вода з водопроводу подається в бак з постійним зливом, завдяки чому наповнення бака залишається постійним в часі. Рівень рідини в баку визначають по водомірному склу. З бака 2 поступає вода рівномірно в горизонтальну трубу змінного перетину, в перетинах якого приєднані п'єзометри 5. Витрату рідини вимірюють об'ємним способом мірним баком 8 і регулюють вентилем 7. При побудові п'єзометричної і напірної ліній зручно площину порівняння, горизонтальну координатну площину, провести через вісь труби 6. В цьому випадку висоти положення обертаються в нуль,  $Z = 0$ , і рівняння Бернуллі приймає вигляд:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} - Z_1 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} + h_w.$$

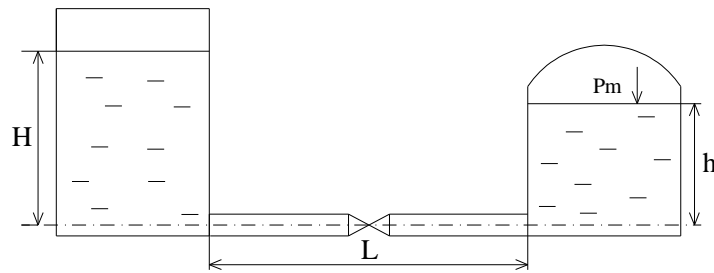
В трубі змінного перетину відповідно до рівняння постійності витрати

$$Q = U_1 \omega_1 = U_2 \omega_2 = \text{const}$$

зменшення перетину приводить до збільшення швидкості, а збільшення швидкості, по рівнянню Бернуллі, - до зменшення тиску. Це і спостерігається у вузькому перетині - зменшуються показники п'єзометрів, тобто  $P/\gamma$ . Дійсно збільшення швидкості означає збільшення  $U^2/2g$ , тобто збільшення кінетичної енергії, а зменшення тиску - зменшення потенційної енергії тиску  $P/\gamma$  в тому ж перетині. Сумарна ж енергія  $P/\gamma + U^2/2g$  зменшується тільки на величину втрат  $h_w$ . Таким чином, демонструється взаємний перехід потенційної енергії в кінетичну і назад, при збереженні сумарної енергії за вирахуванням втрат.

### Завдання 1.

Розрахувати короткий трубопровід (визначити витрату). Коефіцієнт опору крана  $\xi$ , коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$ , діаметр трубопроводу  $d$  (мм), тиск на поверхні в закритому резервуарі  $P_m$  (атм). Висота рівня рідини в закритому резервуарі  $h$ , у відкритому резервуарі  $H$ .



### Рішення.

Для перетинів, проведених по рівнях вільних поверхонь в резервуарах, проводимо перетини 1-1 і 2-2 і складаємо для них рівняння Бернуллі:

$$Z_1 + P_1/\gamma + V_1^2/2g = Z_2 + P_2/\gamma + V_2^2/2g + \Delta h.$$

Підставляючи в рівняння Бернуллі значення вхідних величин після перетворень отримуємо шукану витрату:

$$h + (P_{\text{атм}} + P_m)/\gamma = H + P_{\text{атм}}/\gamma + 16Q^2/(2g\pi^2 d^4)(\lambda(L_1 + L_2)/d + \Sigma\xi);$$

Звідси:

$$Q = ((2g\pi^2 d^4 (h+H)) / (16((\lambda(L_1 + L_2)/d) + \Sigma\xi)))^{1/2}, \text{ (м}^3/\text{с)}.$$

$$\text{Де } \Sigma\xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{зас}} + \xi_{\text{вих}} = 0,5 + \xi_{\text{зас}} + 1,0.$$

### Практичне заняття 15.

*Розрахунок витоку рідини і газу через отвори і насади.*

При розрахунках діафрагм, змішувачів, наповненні і спорожненні резервуарів, басейнів, водосховищ, шлюзових камер і інших ємкостей вирішуються задачі на виток рідин через отвори. При вирішенні цих задач визначають швидкості і витрати рідин.

Експериментально встановлено, що при виток рідини з отворів походить стискування струменя, тобто зменшення його поперечного перетину. Форма стислого струменя залежить від форми і розмірів отвору, товщини стінок, а також від розташування отвору відносно вільної поверхні, стінок і дна посудини, з якої витікає рідина. Стискування струменя відбувається внаслідок того, що частинки рідини підходять до отвору з різних сторін і за інерцією рухаються в отворі по траєкторіях, що сходяться.

Паралельний перебіг струменів в отворі можливий тільки у тому випадку, коли товщина стінок посудини близька до розмірів отвору, а стінки отвору мають плавні контури, з розширенням всередину посудини.

Отвори класифікують таким чином:

1. За розміром: малі отвори, великі отвори.
2. По товщині стінки, в якій зроблений отвір: отвори в тонкій стінці, отвори в товстій стінці.
3. Формою розрізняють круглі, квадратні, прямокутні, трикутні і інші отвори.

Насадкою називається відрізок труби, довжина якого у декілька разів більше внутрішнього діаметру. Найбільш поширені види насадок, які вживаються на практиці: циліндровий зовнішній; циліндровий внутрішній; конічний розходящийся; конічний сходящийся; коноідаально-розходящийся; коноідальний.



### Завдання 1.

Визначити витрату рідини, що витікає через зовнішній циліндровий насадок діаметром  $d$  (мм), якщо напор, що діє, перед насадком складає  $H$  (м.вод.ст.). Визначити величину вакууму в насадку.

### Рішення.

Витрату через зовнішній циліндровий насадок визначаємо по формулі:

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

де  $\mu=0,82$  – коефіцієнт витрати для зовнішнього циліндрового насадка,  $\omega = \pi \cdot d^2/4$  ( $\text{м}^2$ ) – площа живого перетину сопла.

Вакуум в зовнішньому циліндровому насадку дорівнює:

$$H_{\text{вак}} = 0,75 \cdot H \text{ (м.вод.ст.) або } P_{\text{вак}} = 0,75 \cdot H \cdot 9810 \text{ (Па).}$$

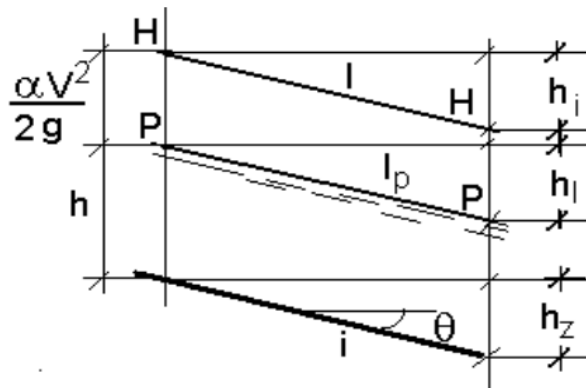
### Практичне заняття 16.

*Гідравлічні елементи поперечного перетину профілю каналу.*

*Розрахунок каналів составного і замкнутого профілю.*

Рівномірним називається такий рух, коли площа живого перетину  $\omega$ , глибина потоку  $h$ , середня швидкість  $V$ , а також епюра розподілу швидкості по живому перетину не міняються вздовж потоку.

Розглянемо лише квадратичну область. Тим більше, що канали як правило працюють в даній області.

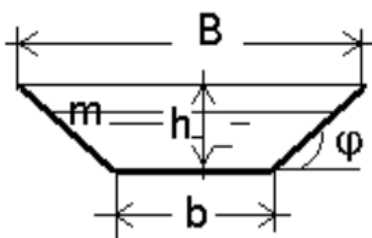


При рівномірному русі напірна лінія  $H-H$ , лінія вільної поверхні (п'єзометрична лінія  $P-P$ ) і лінія дна збігаються. Отже  $I = I_p = i$ . Оскільки величина схилу звичайно невелика вважають, що поперечні перетини вертикальні.

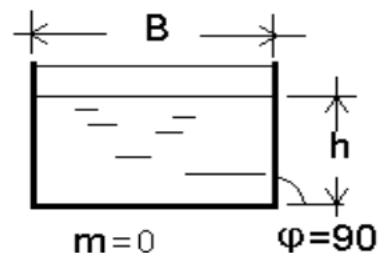
Основні залежності, які використовуються при розрахунку каналів:

$$Q = V \omega = \text{const } V = C \cdot R \cdot i$$

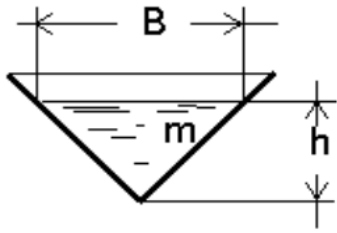
Гідравлічні елементи живого перетину в каналі.



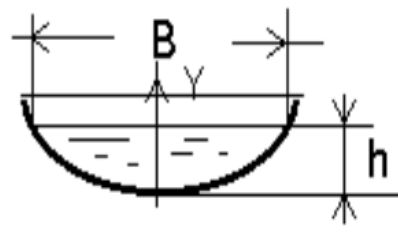
Трапецеїдальний перетин



Прямокутний перетин.



Трикутний перетин.



Параболічний перетин.

Гідравлічно найвигіднішим перетином називається така форма перетину, яка при заданих площі живого перетину і ухилі володіє найбільшою пропускною спроможністю.

З аналізу формули  $Q = \omega C O R$  і можна зробити висновок, що при заданих  $\omega$  і  $I$  найбільшою пропускною спроможністю володітиме перетин з найбільшим гідравлічним радіусом. Але оскільки  $R = \omega / \chi$ , то максимальною пропускною

Спроможністю володітиме перетин з найменшим змоченим периметром.

Із всіх видів перетинів найменшим змоченим периметром при заданій площі живого перетину володітиме напівкруглий перетин. На практиці стінки каналів виконуються з природніх ґрунтів, тому напівкруглий перетин є неприйнятним з точки зору стійкості стінок. З цієї ж причини не виконують канали прямокутного перетину. Нижня частина трикутного перетину зазвичай заповнюється наносами. Тому найбільш поширеним перетином каналів є трапецеїдальний.

Виведемо співвідношення для гідравлічно найвигіднішого трапецеїдального перетину. В разі прямокутного русла  $m = 0$ , отже  $b/h = 2$ .

Підставивши отримане співвідношення у формулу визначення гідравлічного радіусу отримаємо  $R = h/2$ . У загальному випадку гідравлічно і економічно найвигідніші перетини не збігаються. Останнє визначається об'ємом земляних робіт (у гідравлічно найвигідніших перетинах виходить досить велика глибина).

Основні задачі при розрахунку трапецеїдальних каналів на рівномірний рух.

З рівняння Шезі видно, що пропускна спроможність каналу залежить від його розмірів  $h$ ,  $b$ ,  $m$ , шорсткості  $n$  і ухилу русла  $i$ , тобто є взаємозв'язок між шістьма параметрами:  $h$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $i$  і  $Q$  (або  $V$ ). На практиці зазвичай відомо п'ять параметрів і необхідно знайти шостий.

Можна виділити 6 типів задач.

### **Завдання 1.**

Відомі:  $h$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $i$ . Потрібно знайти  $Q$ . Задача зводиться до виконання наступних кроків.

- 1) визначаються  $\chi$  і  $\omega$ ;
- 2) знаходиться  $R$ ;
- 3) для відомих  $n$  і  $R$ , по формулі Маннінга знаходиться  $C$ ;

4) по формулі Шезі визначається

$$Q = \omega V.$$

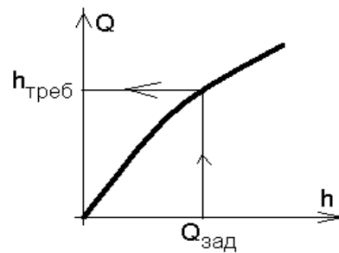
Наприклад. Земляний трапецеїдальний канал з параметрами:  $n = 0,025$ ,  $h = 3,5$  м,  $b = 10$  м,  $m = 1,5$ ,  $i = 0,0002$ . Знайти  $Q$ .

#### Рішення:

$$R = \omega / \chi = 53,3 / 22,6 = 2,36 \text{ м.}$$

$$V = C \cdot \omega \cdot (R \cdot i) = 47 \cdot \omega \cdot (2,36 \cdot 0,0002) = 1,03 \text{ м/с.}$$

$$Q = V \cdot \omega = 1,03 \cdot 53,3 = 54,7 \text{ м}^3/\text{с.}$$



#### Завдання 2.

Відомі  $b$ ,  $h$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $Q$ . Знайти  $i$ .

Виконуються перші три дії по аналогії з першою задачею. Потім  $i$  визначається по формулі

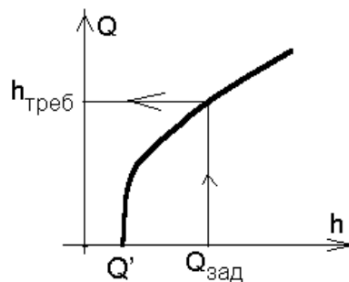
$$i = Q^2 / (\omega^2 \cdot C^2 \cdot R).$$

#### Завдання 3.

Визначення нормальної глибини.

Нормальною називають глибину рідини  $h$  в руслі, яка встановлюється при заданій витраті  $Q$ .

Відомі  $b$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $i$ ,  $Q$ . Визначити глибину наповнення каналу  $h$ .



Складається таблиця, при різних значеннях  $h$ .

h	1	2	3
$\chi$			
$\omega$			
R			
C			
V			
Q			

За даними таблиці будується графік  $Q = f(h)$ . По цьому графіку знаючи  $Q_{\text{зад}}$  знаходиться  $h_{\text{трєб}}$ . Крива має випуклість в сторону осі  $h$  і проходить через початок координат.

#### Завдання 4.

Визначення ширини по дну. Відомі  $h, m, n, i, Q$ . Складається таблиця.

<b>b</b>	1	2	3
<b><math>\chi</math></b>			
<b><math>\omega</math></b>			
<b>R</b>			
<b>C</b>			
<b>v</b>			
<b>Q</b>			

За даними таблиці будується графік  $Q=f(h)$ . По цьому графіку знаючи  $Q_{\text{зад}}$  знаходиться  $b_{\text{треб}}$ . Крива не проходить через початок координат витрату  $Q'$  відповідає витраті трикутного русла ( $b = 0$ ).

#### Завдання 5.

Задані  $m, n, i, Q$ . Потрібно знайти  $h$  і  $b$  відповідні гідравлічно найвигіднішому перетину. Задаємося низкою глибин. Для них із співвідношення  $b/h = 2 \cdot (O(m^2 + 1) - m)^*$  знаходимо відповідні  $b$ . Далі аналогічно задачі 3 знаходимо  $Q$  і будуємо графік. Із графіка для заданого  $Q$  знаходимо  $h$ , а потім  $b^*$ .

#### Завдання 6.

Задана середня швидкість і потрібно знайти  $h$  і  $b$ .

- 1)  $\omega = Q / V = A$ ,
- 2)  $V/O \cdot i = B$ ,
- 3)  $h(b + m \cdot h) = A$ .

Вирішується дана система двох рівнянь графічно або підбором.

#### Обмеження швидкості руху води в каналах.

Середня швидкість руху води в каналі повинна знаходитися в межах

$$V_{\min} < V < V_{\max},$$

де  $V_{\max}$  - максимально допустима швидкість (швидкість при якій не відбувається руйнування русла каналу);

$V_{\min}$  - мінімально допустима швидкість (швидкість при якій не відбувається відкладень зважених часток).

Дійсна швидкість залежить від ухилу дна каналу, а максимальна тільки від матеріалу з якого виконані стінки каналу і від глибини води в нім.

Для збільшення максимально допустимої швидкості: покривають стінки і дно каналу покриттям у вигляді бетонного облицьовування.

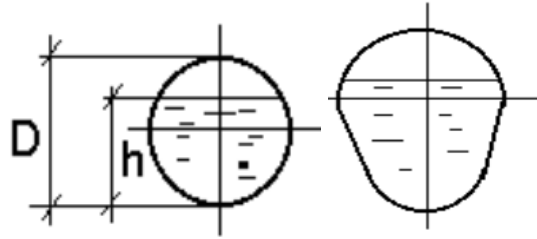
Для зниження швидкості необхідно зменшити або  $R$ , або  $C$  або  $i$ . У зв'язку з цим розрізняють три способи зменшення швидкості:

1) зміна форми поперечного перетину з метою зменшення  $R$ . Це захід малоефективний, оскільки за рахунок зміни  $R$  мало вдається понизити швидкість.

2) створення штучної шорсткості, в результаті збільшується  $n$  і зменшується  $C$ . Економічно неефективно.

3) зменшення ухилу за рахунок зміни траси каналу або устрою перепадів.

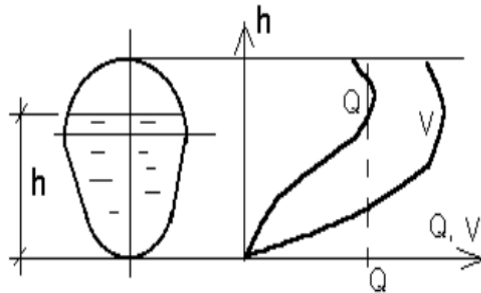
Розрахунок каналів, які мають замкнутий поперечний профіль.



Труби, що працюють в безнапірному режимі.

$h/D$  – називається ступенем наповнення (0,5 – 0,75).

Підрахунками по формулі Шезі доведено, що глибина, яка відповідає максимальній швидкості лежить в межах  $h_1 = (0,8 - 0,85)D$ . А глибина, що відповідає максимальній витраті лежить в межах  $h_2 = (0,93 - 0,95)D$ .



Залежність витрат і швидкості від міри наповнення труби.

Розрахунок ведеться по формулі Шезі, але у зв'язку з тим що при різних  $h/D$ ,  $\omega$  і  $\chi$  визначати важко, розрахунок ведуть по спеціальних таблицях.

### Завдання 7.

Визначити втрати напору і витрату в кожній нитці паралельно сполучених трубопроводів при спільній витраті  $Q$  (л/с). Питомий опір для трубопроводу першої нитки  $A_{\text{пит1}}$ , для другої нитки  $A_{\text{пит2}}$ .

### Рішення.

Перша нитка: діаметр  $d_1$  (мм), довжина  $L_1$  (м),

друга нитка: діаметр  $d_2$  (мм), довжина  $L_2$  (м).

Поправочний коефіцієнт на неквадратичність зони гідравлічного опору прийняти рівним  $K=1,0$ .

Визначаємо опір першої нитки трубопроводу:

$$S_1 = K \cdot A_{\text{пит1}} \cdot L_1.$$

Визначаємо опір другої нитки трубопроводу:

$$S_2 = K \cdot A_{\text{пит2}} \cdot L_2.$$

Визначаємо опір системи паралельно з'єднаних трубопроводів:

$$S = (S_1 \cdot S_2) / (\sqrt{S_1} + \sqrt{S_2})^2.$$

Втрати напору в системі паралельно з'єднаних трубопроводів визначаємо по формулі:

$$\Delta h = S Q^2 \text{ (м.вод.ст.)}$$

Витрата в кожній нитці складе:

$$Q_1 = \sqrt{(\Delta h / S_1)}, \quad Q_2 = \sqrt{(\Delta h / S_2)}, \quad (\text{л/с}).$$

$$\text{Перевірка: } Q = Q_1 + Q_2, \quad (\text{л/с}).$$

### ІІІ. ДИНАМІКА РІДИНИ І ГАЗУ

#### Лабораторна робота №1

*Демонстрація рівняння Бернуллі. Побудова п'єзометричної лінії.*

Рухомий потік рідини володіє енергією трьох видів: потенційною енергією положення, потенційною енергією тиску, кінетичною енергією – частина енергії рідини при русі витрачається на подолання опорів. Баланс енергій в двох довільно узятих перетинах потоку рідини виражається рівнянням Бернуллі:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} + h_w,$$

де  $Z$ ,  $P/\gamma$ ,  $U^2/2g$  - питомі енергії, тобто віднесені до одиниці ваги. Це енергетична інтерпретація рівняння Бернуллі; якщо ж члени рівняння Бернуллі розглядаються як вертикальні відрізки, тоді говорять про геометричне тлумачення рівняння Бернуллі:

$Z_1, Z_2$  - висоти положення, тобто відстані від площини порівняння (горизонтальної координатної площини) до центру тяжіння живого перетину потоку;

$P_1/\gamma$ ,  $P_2/\gamma$  - п'єзометричні висоти, тобто висота піднімання рідини в п'єзометрі;

$U_1^2/2g$ ,  $U_2^2/2g$  - швидкісні напори, тобто висота підйому рідини за рахунок кінетичної енергії;

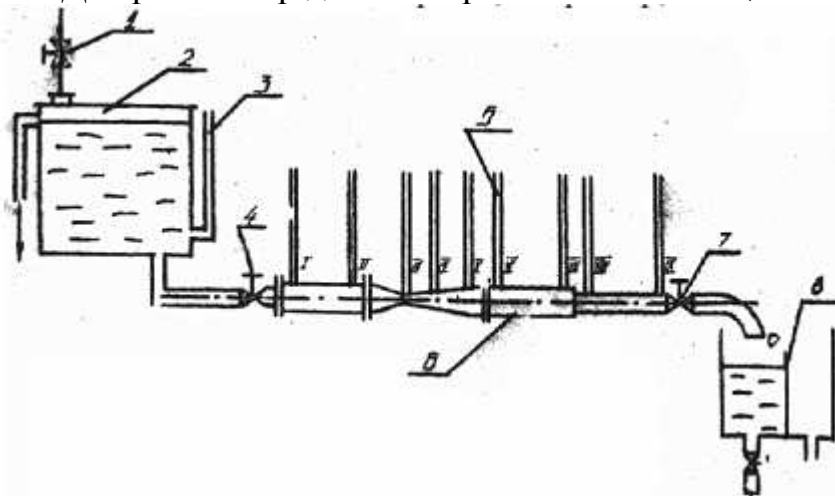
$Z$ ,  $P/\gamma$  - гідростатичний напор;

$Z + P/\gamma + U^2/2g$  - повний напор;

$h_w$  - втрати напору на відстані між першим і другим перетином.

Зміни висоти положення, гідростатичного і гідродинамічного напорівши вздовж потоку рідини характеризуються відповідно геометричною, п'єзометричною і напірною лініями.

Для ідеальної рідини, тобто рідини, позбавленій в'язкості, напірна лінія - горизонтальна лінія, тому що в рідині немає втрат гідродинамічного натиску  $h_w = 0$ . Для реальної рідини напірна лінія - ламана, низхідна лінія.



Установка для побудови п'єзометричної і напірної ліній:

1 - вентиль напірний; 2 - бак; 3 - водомірне скло; 4 - вентиль; 5 - п'єзометр; 6 - труба; 7 - вентиль регулювальний; 8 - мірний бак.

Вода з водопроводу подається в бак з постійним зливом, завдяки чому наповнення бака залишається постійним в часі. Рівень рідини в баку визначають по водомірному склу. З бака 2 поступає вода рівномірно в горизонтальну трубу змінного перетину, в перетинах якого приєднані п'єзометри 5. Витрату рідини вимірюють об'ємним способом мірним баком 8 і регулюють вентилем 7. При побудові п'єзометричної і напірної ліній зручно площину порівняння, горизонтальну координатну площину, провести через вісь труби 6. В цьому випадку висоти положення обертаються в нуль,  $Z = 0$ , і рівняння Бернуллі приймає вигляд:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} - Z_1 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} + h_w.$$

В трубі змінного перетину відповідно до рівняння постійності витрати

$$Q = U_1 \omega_1 = U_2 \omega_2 = const$$

зменшення перетину приводить до збільшення швидкості, а збільшення швидкості, по рівнянню Бернуллі, - до зменшення тиску. Це і спостерігається у вузькому перетині - зменшуються показники п'єзометрів, тобто  $P/\gamma$ . Дійсно збільшення швидкості означає збільшення  $U_2/2g$ , тобто збільшення кінетичної енергії, а зменшення тиску - зменшення потенційної енергії тиску  $P/\gamma$  в тому ж перетині. Сумарна ж енергія  $P/\gamma + U^2/2g$  зменшується тільки на величину втрат  $h_w$ . Таким чином, демонструється взаємний перехід потенційної енергії в кінетичну і назад, при збереженні сумарної енергії за вирахуванням втрат.

#### *Порядок виконання роботи:*

1. Наповнити бак 2, включити установку, відкривши вентиль 4.
2. Вентилем 7 на виході з труби змінного перетину зменшити витрату рідини до нуля, спостерігаючи зміну показань п'єзометра.
3. Вивести установку на режим, тобто на витрату, при якій буде значний перепад показань п'єзометрів.
4. Зняти показання п'єзометрів.
5. Виміряти відстань між п'єзометрами.
6. Виміряти витрату об'ємним способом.

Таблиця

№ п/п	Показання п'єзометру	Відстань між п'єзометрами	Площа перетину	Середня швидкість	Кінетична енергія	Об'єм мірного баку	Час заповнення мірного баку	Витрата рідини	Втрата енергії
	$P_1/\gamma$ , м	l, м	$W_1$ , м <sup>2</sup>	U, м/с	$U^2/2g$ , м	V, м <sup>3</sup>	t, с	Q, м <sup>3</sup> /с	h, м

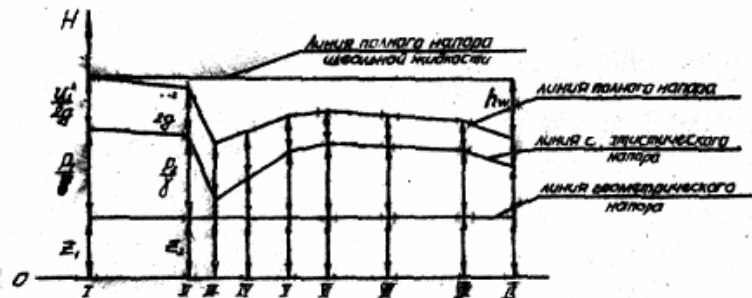
### Обробка дослідних даних:

1. Визначити витрату рідини:  $Q = \frac{V}{t}$ .
2. Розрахувати швидкість води в перетинах установки п'єзометрів:

$$U = \frac{4Q}{\pi d^2}.$$

3. Розрахувати швидкісний напір  $U_1^2/2g$

4. Побудувати п'єзометричну і напірну лінії, для чого по горизонтальній осі в масштабі відкласти наростаючим підсумком відстані між п'єзометрами. В точках установки п'єзометрів по вертикалі в масштабі відкласти п'єзометричні висоти і з'єднати їх кінці. Це буде п'єзометрична лінія. До кінців п'єзометричних висот додати в тому ж масштабі відповідні швидкісні висоти, з'єднати їх кінці, побудувати напірну лінію для реальної рідини. З початку напірної лінії провести горизонталь – напірну лінію для ідеальної рідини. Відстань по вертикалі між напірними лініями – втрати сумарної питомої енергії.



Графічна інтерпретація рівняння Бернуллі.

### Контрольні питання:

1. Рівняння постійності витрати і його фізичний зміст.
2. Рівняння Бернуллі для ідеальної і реальної рідин, для елементарної струйки і потоку.
3. Коефіцієнт Каріоліса і його фізичний зміст.
4. Геометричний і фізичний зміст рівняння Бернуллі.
5. Геометрична, п'єзометрична і напірна лінії.
6. Напірна лінія для ідеальної і реальної рідини.
7. Трубки Піто і Піто-Прандтля, вимірювання з їх допомогою швидкості руху рідини.
8. Як визначити швидкості руху рідини в даному живому перетині?

### Лабораторна робота №2

#### Визначення характеристики витратоміру Вентурі.

**Мета роботи:** Визначити другу постійну витрати. Побудувати залежність другої постійної витратоміра від числа Рейнольдса  $C_2 = f(Re)$ .

#### Основні положення:

Витратомір Вентурі є короткою трубою змінного перетину, що складається з ділянок: звуження, циліндрової частини і плавного розширення.



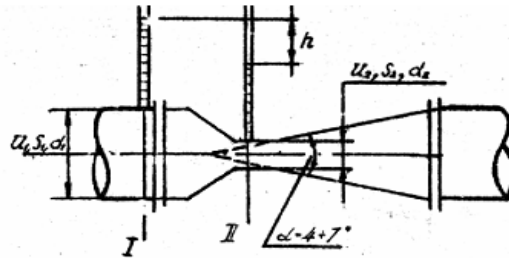


Схема витратоміра Вентурі.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} + h_w.$$

Для витратоміра Вентурі, розташованого горизонтально, висоти положення  $Z_1, Z_2$  в рівнянні Бернуллі дорівнюють нулю, тоді

$$\frac{P_1 P_2}{\gamma} = \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + h_w.$$

Нехтуючи втратами енергії  $h_w$  і позначивши  $(P_1 - P_2)/\gamma = h$ , отримаємо рівняння витратоміра Вентурі  $h = (U_2^2 - U_1^2)/2g$ .

$$h = \frac{\frac{Q^2}{w_2^2} - \frac{Q^2}{w_1^2}}{2g} = \frac{Q^2}{w_1^2 2g} \left( \frac{w_1^2}{w_2^2} - 1 \right);$$

$$Q = w_1 \sqrt{\frac{2gw_2^2}{w_1^2 - w_2^2}} \cdot \sqrt{h} = C_1 \cdot \sqrt{h}.$$

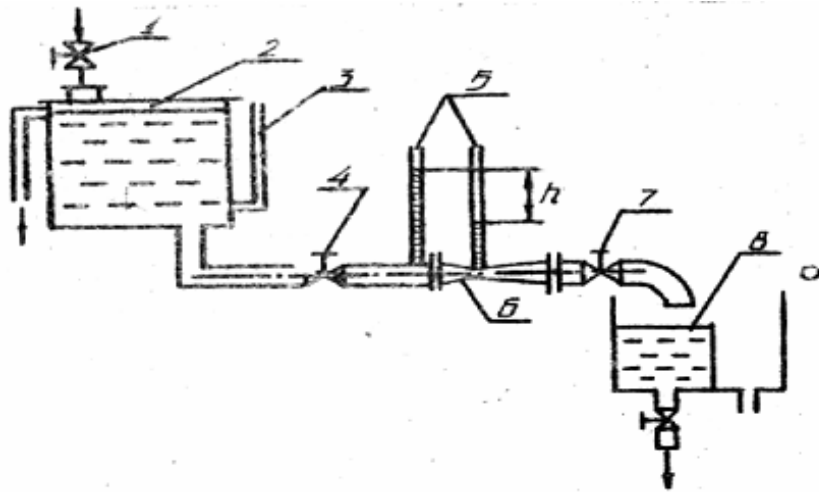
Використовуючи рівняння незмінності витрати, виразимо швидкість в кожному з перетинів через витрату  $Q$  і перетворимо рівняння витратоміра Вентурі

$$C_1 = w_1 \sqrt{\frac{2gw_2^2}{w_1^2 - w_2^2}},$$

Коефіцієнт  $C_1$ , який у формулі визначається тільки постійними величинами, називають першою постійною витратоміра Вентурі.

Витрата  $Q$ , що обчислюється за формулою  $Q = C_1 \sqrt{h}$ , завжди більше дійсної витрати, тобто вимірюваної експериментально, бо формула не враховує втрат питомої енергії в самому витратомірі. Теоретичні розрахунки приводять у відповідність з експериментом шляхом введення коефіцієнта витрати  $\mu = Q_d/Q$ , де  $Q_d$  – дійсна витрата.

Тоді  $Q_d = \mu Q = \mu C_1 \sqrt{h} = C_2 \sqrt{h}$ , де  $C_2$  – друга постійна витратоміра Вентурі. Таким чином, досить один раз експериментально визначити другу постійну витратоміра Вентурі, щоб надалі, вимірюючи тільки різницю п'єзометричних висот в перетинах 1 і 2, по формулі розрахувати витрату.



Установка для тарировки витратоміра Вентурі:

1 – вентиль подачі води; 2 – бак напірний; 3 – водомірне скло; 4 – вентиль замочний; 5 – п'єзометри; 6 – витратомір Вентурі; 7 – вентиль регулюючий; 8 – мірний бак.

Вода з водопроводу подається в бак 2 з постійним зливом, завдяки чому наповнення бака не міняється в часі. Рівень рідини в баку визначають по водомірному склу 2. З бака 2 вода рівномірно поступає по трубі до витратоміру 6, в перетинах I і II якого приєднані п'єзометри 5. Діаметри перетинів I-15 мм, II-4 мм. Витрата рідини регулюється вентилем 7. Витрата рідини при дослідах визначається об'ємним способом мірним баком 8.

*Порядок виконання роботи:*

1. Відкрити вентиль 1 подачі води.
2. Наповнити бак 2 водою.
3. Включити установку, відкривши вентиль 4.
4. Вентилем 4 встановити мінімальну витрату рідини і отже мінімальне показання п'єзометрів 5.
5. Виміряти витрату рідини і перепад тиску  $h$ .
6. Збільшуючи витрату рідини до максимального, не менше 8-10 разів зняти показання  $Q$  і  $h$ .
7. Визначити температуру води і розрахувати коефіцієнт кінетичної в'язкості.

*Журнал роботи.*

Температура води	Показники п'єзометрів		Різниця показників п'єзометрів	Об'єм мірного баку	Година заповнення мірного баку	Витрата рідини	Друга стала	Число Re	Швидкість рідини	Площа перетинів	
	$\frac{P_1}{\gamma}$ , м	$\frac{P_2}{\gamma}$ , м								$W_1$ , м <sup>2</sup>	$W_2$ , м <sup>2</sup>
T, °C			h, м	V, м <sup>3</sup> /с	$\tau$ , с	Q, м <sup>3</sup> /с	C <sub>2</sub>	Re	U <sub>1</sub> , м/с		

### Обробка дослідних даних:

1. Визначити витрату води.:

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

2. Розрахувати швидкість води в перетині I:

$$U_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2}.$$

3. Визначити різницю показань п'єзометрів:

$$h = \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma}.$$

4. Обчислити другу постійну витратоміра Вентурі:

$$C = \frac{Q_0}{\sqrt{h}}.$$

5. Знайти площу живих перетинів I і II:

$$w_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}; w_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}.$$

6. Розрахувати першу постійну витратоміра:

$$C_1 = w_1 \sqrt{\frac{2g w_2^2}{w_1^2 - w_2^2}}.$$

### Розрахувати теоретичну витрату

7. Визначити коефіцієнт витрати:

$$\mu = \frac{Q_0}{Q}.$$

8. Обчислити кінематичний коефіцієнт в'язкості.

9. Визначити число Рейнольдса:

$$Re = \frac{U_1 d}{\nu}$$

10. За даними розрахунків побудувати залежність  $C_2 = f(Re)$  і описати характер цієї залежності.

### Контрольні питання:

1. Пристрій витратоміра Вентурі, вимірювальні діафрагми, принцип роботи.
2. Перша і друга постійні витратоміра Вентурі, коефіцієнт витрати.
3. Яким чином на установці досягається стабільність показань п'єзометрів в часі?
4. Як визначається число Рейнольдса?
5. Залежність другої постійної витратоміра Вентурі від числа Рейнольдса.

### Лабораторна робота №3

*Визначення режиму руху рідини при напірному русі рідини в каналах.*

**Мета роботи:** Переконалися дослідно в існуванні ламінарного і турбулентного режимів перебігу рідини і правомірності критерію Рейнольдса для їх оцінки. Експериментально виявити закон гідравлічного опору для ламінарного і турбулентних режимів руху.

#### Порядок виконання роботи:

1. Ознайомиться з схемою і устроєм лабораторної установки, і занести її в протокол.
2. Налаштувати установку на параметри задані викладачем або довільно.
3. Підготувати установку до роботи через меню «Виконання роботи».
4. Встановити відкриття регулюючого крана, включити пуск фарби і по вигляду її розмиву оцінити режим руху рідини. Занести в таблицю об'єм рідини в першому баку, час наповнення, діаметр труби, кінематичний коефіцієнт в'язкості. Змінюючи відкриття крана і підфарбовувавши потік,

встановити режим руху, протилежний початковому, внести до протоколу відповідні параметри.

5. Обчислити число Рейнольдса і зробити висновок по проведеному експерименту.

*Схема експериментальної установки.*



*Обробка дослідних даних:*

№ п/п	Ступінь відкриття крана, A	h <sub>0</sub> , m	t, c	Витрата W, см³	Re
1.	0,2	3,75	150,82	5138,4	803,7
2.	0,3	9,57	113,43	5797	1205,624
3.	0,5	23,4	76,23	6493,1	2009,4
4.	0,8	53,4	50,82	6925,5	3214,8
5.	1	78,9	41,77	7115,1	4018,4

$L=100$  см;  $D=2$  см;  $\nu=0,027$  см²/с;  $T=15$  °С.

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

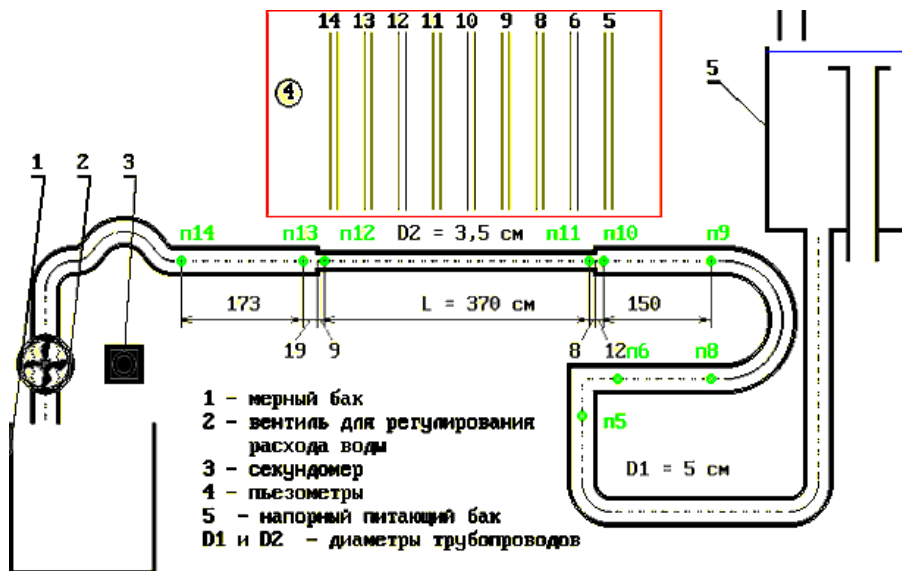
**Висновок:** В результаті проведених вимірів можна зробити висновок, що при збільшенні ступеня закриття крана, тобто навмисному збільшенні витрати і швидкості потоку, число Рейнольдса збільшується, отже потік турбулізується, це підтверджується візуально.

#### **Лабораторна робота №4**

*Визначення коефіцієнту гідравлічного опору при напірному русі рідини в каналах.*

**Мета роботи:** Визначення дослідним шляхом коефіцієнта гідравлічного тертя і коефіцієнтів втрат в місцевих опорах при сталому русі рідини в напірному трубопроводі.

Схема експериментальної установки.



Все размеры даны в сантиметрах

### Порядок виконання роботи:

1. Наповнити установку водою.
2. Відкрити вентиль.
3. Зняти показання всіх п'єзометрів і заміряти витрату.
4. Для ділянок 5-6 і 8-9 визначити коефіцієнти місцевих опорів.
5. Для ділянок 9-10, 11-12 і 13-14 обчислити коефіцієнти гідравлічного тертя.
6. Визначити коефіцієнти місцевих опорів: раптове звуження і раптове розширення.

Таблиця

№ учку	Показання п'єзометра	Коефіцієнт місцевих опорів $\zeta$	Коефіцієнти гідравлічного тертя		
			Раптове звуження	Раптове розширення	
5	184,6	----	----	----	
6	182,15	----	----	----	
8	181,65	----	----	----	
9	180,95	8,322	0,15	0,184	
10	178,8				
11	167,3	1,379			
12	134,5				
13	138,05	9,598			
14	134,2				

$$A=70; W=50\text{л}; t=37.48$$

Для ділянок 5-6 і 8-9 коефіцієнт місцевих опорів :

$$5-6 : \zeta_{\text{кол}}=1,036 \text{ для } \delta=90^\circ$$

$$8-9: \zeta_{\text{відв}}=$$

Для ділянок 9-10, 11-12 і 13-14 обчислити коефіцієнти гідравлічного тертя:

$$\text{Число Рейнольдса: } Q=50/37.48=1.334 \text{ л/с}$$

$$\omega = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_1^2} = \frac{4 \cdot 0,001334}{\pi \cdot 0,05^2} = 0.068$$

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot D_1}{\nu} = \frac{0.068 \cdot 0.05}{0.2709 \cdot 10^{-6}} = 0.1255 \cdot 10^5$$

Визначимо коефіцієнт опору тертя

$$\zeta = \left( \frac{k_\delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0.25} = \left( 5 \cdot 10^{-4} + \frac{68}{0.1255 \cdot 10^5} \right)^{0.25} = 0.2774$$

$$Z_{\text{відб}} = \zeta \frac{l_{9-10}}{D_1} = 0.2774 \frac{1.5}{0.05} = 8.322$$

$$\zeta_{\text{відб}} = \zeta \frac{l_{13-14}}{D_1} = 0.2774 \frac{1.73}{0.05} = 9.598$$

$$\omega_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_2^2} = \frac{4 \cdot 0.001334}{\pi \cdot 0.035^2} = 1.3865$$

$$\text{Re} = \frac{\omega_2 \cdot D_1}{\nu} = \frac{1.3865 \cdot 0.035}{0.2709 \cdot 10^{-6}} = 1.79 \cdot 10^5;$$

$$\zeta = 0.11 \left( \frac{k_\delta}{d} \right)^{0.25} = 0.11 (5 \cdot 10^{-4})^{0.25} = 0.01645$$

$$\zeta_{\text{відб}} = \zeta \frac{l_{11-12}}{D_1} = 0.01645 \frac{3.7}{0.035} = 1.379$$

$$\zeta_{\text{розш1}} = (1 - S_1/S_2)^2 = (1 - D_1/D_2)^2 = 0.184$$

$$\zeta_{\text{розш2}} = 0.5(1 - S_2/S_1) = 0.5(1 - D_2/D_1) = 0.15$$

**Висновок:** В результаті проведення лабораторної роботи навчилися визначати коефіцієнти гідравлічного тертя і коефіцієнта втрат в місцевих опорах при сталому русі. Встановили, що місцеве опори, такі як раптове розширення і звуження, повороти ведуть до зниження тиску і інтенсивних втрат натиску на ділянках трубопроводу

### **Лабораторна робота №5**

*Визначення коефіцієнту місцевого гідравлічного опору при напірному русі рідини.*

**Мета роботи:** Визначення дослідним шляхом втрат натиску на подолання місцевих опорів і порівняння їх з розрахованими по інженерних формулах.

*Порядок виконання роботи:*

1. Перенести з таблиці л.р. №1 значення площ перетинів і швидкостей.
2. Визначити дослідні значення місцевих втрат  $h_m$  ( $h_{bc}, h_p$ ) з графіка.
3. Знайти розрахункові значення місцевих втрат, порівняти їх з дослідними.

Таблиця

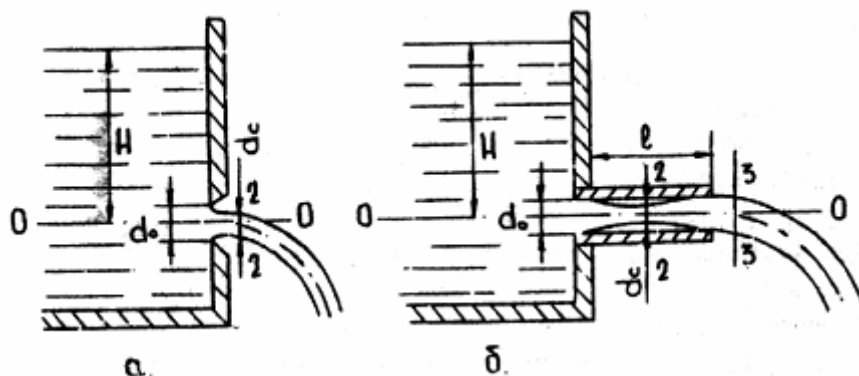
№	Найменування величин	Позначення формул	Вид опору			
			звуження		розширення	
			1 (II)	2(III)	1(IV)	2(V)
1.	Площі перетинів, см <sup>2</sup>	$\omega$	0,45	0,35	0,35	0,7
2.	Середні швидкості за опором, см	$V_2$	54,4	70	70	35
3.	Дослідне значення місцевих втрат, см	$h_m(h_{bc}, h_p)$	7,6		3,62	
4.	Коефіцієнти місцевих опорів	$\xi_{BC} = 0.5 \left( 1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)$	0,11		-----	
		$\xi_{BP} = \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)$	-----		1	
5.	Розрахункове значення місцевих втрат, см	$h_m = \xi V_2^2 / (\rho g)$	21,69		140	

**Висновок:** Визначили дослідним шляхом втрати напору на подолання місцевих опорів, ці значення менш точні в порівнянні з даними розрахованими по інженерних формулах.

### Лабораторна робота №6

*Виток рідини із малого отвору в тонкій стінці та із зовнішніх насадків.*

При сталому виток рідини в атмосферу з великого відкритого резервуару через отвір, розмір якого малий в порівнянні з його заглибленням під рівнем рідини, початкова швидкість струменя визначається з рівняння Бернуллі складеного для перетину 1-1 потоку в резервуарі і для стислого перетину струменя 2-2.



Виток рідини:

а) отвір в тонкій стінці;

б) зовнішній циліндровий насадок.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + \xi_{\text{отв}} \frac{U^2}{2g}$$

$P_1 = P_2 = P_{\text{ат}}$ , а швидкістю в резервуарі можна нехтувати зважаючи на її малість, то середня швидкість струменя в стислому перетині:

$$U_2 = \frac{l}{\sqrt{\alpha_2 + \xi_{\text{отв}}}} \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{2gH},$$

де  $H$  - напор відносно площини порівняння 0-0, проведений через центр тяжіння площі отвору або насадка;

$\varphi$  - безрозмірний коефіцієнт швидкості;

$\xi_{\text{отв}}$  - коефіцієнт місцевого опору отвору.

$$\varphi = \frac{l}{\sqrt{l + \xi_{\text{отв}}}}.$$

Витрата рідини через отвір

$$Q = \mu S_0 \sqrt{2gH},$$

де  $\mu$  - коефіцієнт витрати  $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$ .

Ступінь стиснення струменя, витікаючого через отвір характеризується коефіцієнтом стиснення:

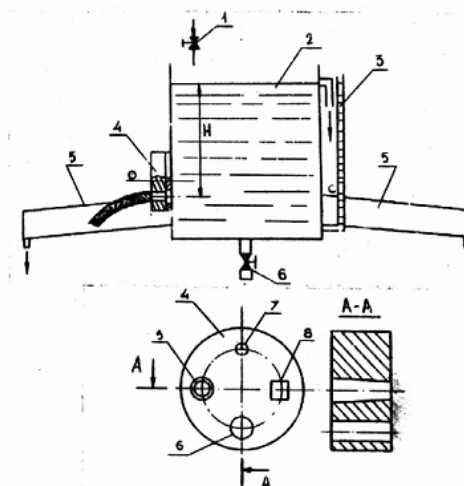
$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_0} = \left( \frac{d_c}{d_0} \right)^2,$$

$S_c, d_c$  - площа і діаметр стислого перетину струменя відповідно;

$S_0, d_0$  - площа і діаметр отвору відповідно.

При витоку рідини з резервуарів через насадки швидкість струменя на виході з насадків утворюється вакуум. Складемо рівняння Бернуллі для стислого і вихідного перетинів:

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} + h_{2-1}.$$



Установка для визначення коефіцієнтів витоку:

- 1 - вентиль подачі води; 2 - напірний бак; 3 - водомірне скло; 4 - барабан з насадками і отворами; 5 - лоток скиду води; 6 - замочний вентиль;  
7 - насадок конічний розходісний; 8 - насадок циліндровий; 9 - отвір круглий;  
10 - отвір квадратний.



При відкритому вентилі 1 подача води наповнюється напірний бак до постійного рівня, завдяки трубі холостого скидання. Рівень рідини в напірному баку 2 контролюється водомірним склом 2. Повертаючи барабан 4 з отворами і насадками навколо осі можна по черзі підключити одне з них. Скидання рідини здійснюється за допомогою лотків 5. Скинути рідину напірного бака можна запірним вентилям 6.

*Мета роботи:* Визначити дослідним шляхом величину коефіцієнта витрати  $\mu$  для різного роду отворів і насадків.

*Порядок виконання роботи:*

1. Вентилем 1 включити подачу води.
2. Добитися постійного рівня рідини в напірному баку 2.
3. По водомірному склу (п'єзометру) 3 визначити величину напору.
4. Виміряти розміри отворів і насадків на барабані 4.
5. Виміряти витрату рідини.
6. Вимірювання провести 5-6 разів для кожного типу отвору і насадка при даному напорі Н.
7. Запірним вентилям 6 змінити величину напору Н і повторити досліди.

*Обробка дослідних даних:*

1. Визначити витрату рідини:

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

2. Розрахувати коефіцієнт витрати:

$$\mu = \frac{Q}{S_0 \sqrt{2gH}}.$$

### Журнал роботи

№	Тип насадка або отвору	Напор	Об'єм води	Час витоку	Витрата	Площа отвору	Діаметр отвору	Коеф. витрат експерим.	Коеф. витрат справочн.	Середнє значення
		Н, м	V, м <sup>3</sup>	t, с	Q, м <sup>3</sup> /с	S <sub>0</sub> , м <sup>2</sup>	d <sub>0</sub> , м	μ <sub>з</sub>	μ <sub>с</sub>	μ

## Лабораторна робота №7

### Виток рідини при змінному напорі

**Мета роботи:** визначити дослідним шляхом час часткового випорожнення бака через отвір і насадки, і порівняти його з теоретичним часом закінчення, який визначається по аналітичній формулі.

У інженерній практиці часто доводиться вирішувати задачу на виток рідини при змінному напорі - випадок пониження рівня води у відкритій посудині при витoku в атмосферу і за відсутності притоку в посудину ззовні. Виток рідини при змінному напорі відноситься до області несталого руху, коли характеристики потоку - швидкість, витрата, тиск - змінюються в часі.

При витoku рідини з резервуару з площею вільної поверхні рідини  $S$  (при  $S = \text{const}$  - це площа перетину резервуару паралельного вільній поверхні) через отвір площею  $S_{\text{отв}}$  за час  $d\tau$ , зважаючи на малість якого, рух можна умовно вважати сталим, а витрату постійною, витече об'єм рідини:

$$dV = Q \cdot d\tau = \mu \cdot S_{\text{отв}} \sqrt{2gz} \cdot d\tau$$

де  $z$  - напор над центром отвору;

$\mu$  - коефіцієнт витрати рідини через отвір.

Проте, насправді рівень рідини в посудині опуститься на величину  $dz$ , чому відповідає об'єм  $dW = dz \cdot S$ . Внаслідок нерозривності потоку  $dV = dW$ .

Отже,

$$-S \cdot dz = \mu \cdot S_{\text{отв}} \sqrt{2gz} \cdot d\tau$$

Інтегруючи це рівняння в межах від  $H_1$  до  $H_2$ , і, вважаючи, що  $\mu$  і  $S = \text{const}$ , отримаємо:

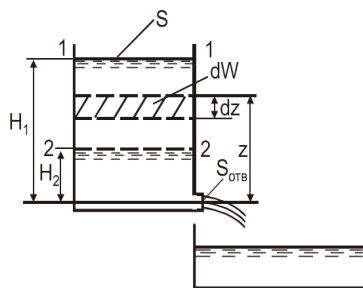
$$\tau = \frac{2S}{\mu \cdot S_{\text{отв}} \cdot \sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}) .$$

Це рівняння дозволяє обчислити час пониження рівня рідини в резервуарі від перетину 1-1 до перетину 2-2.

Для визначення часу повного випорожнення резервуару слід у формулі прийняти  $H_2=0$ :

$$\tau = \frac{2SH_1}{\mu \cdot S_{\text{отв}} \sqrt{2gH_1}} .$$

Чисельник цієї формули дорівнює подвоєному об'єму посудини, а знаменник є витратою в початковий момент випорожнення, тобто при напорі  $H_1$ . Отже, час повного випорожнення посудини в 2 рази більше часу закінчення того ж об'єму рідини при постійному напорі, рівному первинному.



Виток рідини при змінному напорі.

*Порядок виконання роботи:*

Робота проводиться на установці, яка використовується при вивченні витоку рідини через малі отвори і насадки при постійному напорі.

1. Провести необхідні підготовчі операції.
2. Зрівнявши подачу насоса і витрату витоку рідини через отвір (насадок), встановити рівень рідини в напірному резервуарі 2 бака 1 не менше 0,5 м.
3. Одночасно провести наступні операції:
  - відключити подачу насоса, закриттям крана 8,
  - заміряти початковий рівень рідини  $H_1$  в напірному резервуарі 2,
  - включити секундомір.
4. При зміні (зменшенні) рівня рідині в напірному резервуарі 2 до значення  $H_2$ , відключити секундомір, відмітивши дослідний час витоку  $\tau_{\text{оп}}$  рідини з напірного резервуару при зменшенні рівня рідини (напору) від  $H_1$  до  $H_2$ .
5. Розрахувати по формулі теоретичний час витоку  $\tau_{\text{теор}}$  рідини з напірного резервуару при зменшенні рівня рідини (напору) від  $H_1$  до  $H_2$ .
6. Результати досліджень звести в табл.

Таблиця

Величина	Од. вимірювання	Опти		
		отвір	циліндровий насадок	коноїдальний насадок
Початковий напор $H_1$	м			
Кінцевий напор $H_2$	м			
Опитний час витоку, $\tau_{\text{оп}}$	с			
Коефіцієнт витрати, $\mu$	с			
Теоретичний час витоку, $\tau_{\text{теор}}$	с			
$\Delta\tau$	%			

*Контрольні питання:*

1. Класифікація отворів і насадків.
2. Основні характеристики витоку через отвори і насадки, їх фізичний зміст і взаємозв'язок.
3. Поняття сталого і несталого перебігу рідини.

# НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки  
для проведення практичних занять, лабораторних робіт,  
виконання розрахунково-графічної роботи,  
контрольної роботи та самостійної роботи  
з дисципліни

## «Технічна механіка рідини і газу»

(для студентів 2 курсу денної та 2-3 курсів заочної  
форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр  
напрямку підготовки 6.060101 «Будівництво»  
спеціальності «Теплогазопостачання і вентиляція»  
та для слухачів другої вищої освіти спеціальності  
7.06010107 «Теплогазопостачання і вентиляція»)

Укладачі: **РОМАШКО** Олександр Васильович,  
**БЕРЕЗНЯК** Ірина Євгенівна

Відповідальний за випуск *І. І. Капцов*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *К. А. Алексанян*

План 2010, поз. 131М

---

Підп. до друку 19.03.2012 р.

Формат 60×84/16

Друк на ризографі

Ум. друк. арк. 2,5

Тираж 50 пр.

Зам. №

---

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011 р.