

**Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»**



**Кафедра гірничої механіки**

В.І. Самуся, Є.О. Кириченко, І.М. Чеберячко, О.П. Трофимова

**ГІДРАВЛІКА  
МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ  
ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ**

для бакалаврів спеціальності 184 Гірництво

Дніпро  
НТУ«ДП»  
2021

*Рекомендовано до видання навчально-методичним відділом  
(протокол №4 від 13.04.2021р.) за поданням методичної  
комісії спеціальності Гірництво (протокол №4 від 18.03.2021р.)*

### **Самуся В.І.**

Гідравліка. Методичні рекомендації до виконання індивідуальних завдань для бакалаврів спеціальності 184 Гірництво / В.І. Самуся, І.М. Чеберячко, Є.О. Кириченко, О.П. Трофимова. – Д. : НТУ „ДП”, 2021. – 35 с.

Автори:

В.І. Самуся, д-р. техн. наук, проф.

І.М. Чеберячко, канд. техн. наук, доц.

Є.О. Кириченко, д-р. техн. наук, проф.

О.П. Трофимова, ст.викладач

Методичні матеріали призначено для самостійної роботи студентів спеціальності 184 Гірництвом під час виконання індивідуальних завдань із дисципліни „Гідравліка”.

Методичні матеріали містять викладення основних тем дисципліни „Гідравліка”, в яких наведені короткі методичні рекомендації за всіма розділами курсу, умови задач у загальному вигляді без числових значень деяких величин, варіанти числових значень та рисунки для розв’язання індивідуальних завдань.

## ЗМІСТ

	Вступ.....	4
1	Основні властивості рідини.....	4
2	Гідростатика .....	6
3	Основи кінематики та динаміки рідини. Рівняння Бернуллі..	9
4	Режим руху рідини та основи гідродинамічної подібності ...	11
5	Ламінарний рух рідини.....	11
6	Турбулентний рух рідини.....	12
7	Місцеві гідравлічні опори.....	13
8	Витікання рідини крізь отвори та насадки.....	14
9	Гідравлічний розрахунок трубопроводів.....	15
10	Несталий рух рідини.....	15
11	Взаємодія потоку зі стінками.....	16
12	Контрольні завдання.....	16
13	Методичні вказівки до виконання контрольних завдань.....	23
	Перелік посилань	28
	Додаток	29

## ВСТУП

Зміст методичних вказівок відповідає робочій програмі дисципліни «Гідравліка», яка складається з вивчення законів рівноваги і руху нестисливої рідини. Теоретичний курс необхідно опрацьовувати послідовно за окремими темами відповідно до наведеної програми. Студенти також повинні уважно вивчити виведення формул, звертаючи особливу увагу на закони теоретичної механіки, що при цьому використовуються.

Після засвоєння теоретичного курсу студенти виконують індивідуальне завдання. Робота з підручником обов'язково повинна бути супроводжена розв'язанням задач з розділу курсу. Задачі слід розв'язувати самостійно, пам'ятаючи, що так краще засвоюється і закріплюється теоретичний матеріал, з'ясовується суть гідравлічних явищ.

Залежно від спеціальностей та навчального плану індивідуальне завдання може складатися з однієї, двох чи трьох контрольних робіт, але кожне контрольне завдання повинно містити задачі з усіх розділів курсу. Виконані контрольні роботи студент заочної форми навчання надсилає до відповідної кафедри університету, де їх реєструють та перевіряють. Якщо всі задачі контрольної роботи виконані правильно, роботу зараховують та повертають студенту. Якщо студентом були припущені грубі та суттєві помилки, тоді робота повертається йому на виправлення. Виправлену контрольну роботу студент заочної форми навчання вдруге надсилає до вищого навчального закладу, обов'язково додаючи перший варіант свого розв'язання задач із зауваженнями викладача. Контрольні роботи студент повинен надіслати до університету за 10 днів до початку екзаменаційної сесії. Роботи, що були надіслані пізніше, перевіряються після сесії.

Порядок виконання контрольних робіт, складання заліку та іспиту встановлюється кафедрою та Інститутом заочної освіти вищого навчального закладу. Іспит дозволяється скласти при наявності заліку з курсу. Якщо навчальним планом іспит з дисципліни «Гідравліка» не передбачено, тоді при отриманні заліку студент також повинен продемонструвати свої теоретичні знання. Під час складання заліку студент-заочник зобов'язаний показати викладачу всі зараховані контрольні роботи. Залік з курсу студент отримує після вдалого захисту всіх контрольних робіт.

## 1 ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИНИ

Предмет гідравліки. Коротка історична довідка. Роль вітчизняних вчених у розвитку гідравліки. Гідравліка є однією із загально-інженерних дисциплін, що забезпечують фундаментальну підготовку спеціалістів.

Визначення рідини. Сили, що діють на рідину. Тиск у рідині. Стисливість. Закон Ньютона для рідинного тертя. В'язкість. Поверхневий натяг. Тиск насиченої пари рідини. Розчинення газів у рідині. Особливості рідин, що застосовуються в гідросистемах. Модель ідеальної рідини. Неньютонівські рідини.

## Методичні вказівки

**Рідина** – фізичне тіло, молекули якого слабо зв'язані між собою. Тому під дією навіть незначної сили рідина змінює свою форму. Рідина займає проміжне місце між твердим тілом та газом. Вона схожа на тверде тіло, але не здатна самостійно зберігати свою форму, що зближує її з газом. Із зміною тиску і температури у рідин міняється й об'єм. Рідини *стискаються* незначно; наприклад, при підвищенні тиску від 0,1 до 10 МПа об'єм води зменшується лише на 0,5%. Тому частіше за все в гідравлічних розрахунках рідини вважаються нестиливими. Проте при розгляді окремих питань, наприклад гідравлічного удару, стисливість рідини слід враховувати. З підвищенням температури рідини *розширюються*; так, при підвищенні температури води з 4 до 100°C її об'єм збільшується приблизно на 4%.

Властивість рідини опиратися зсуву або ковзанню стичних шарів називається *в'язкістю*. Завдяки в'язкості з'являються сили внутрішнього тертя між суміжними шарами рідини, що течуть з різними швидкостями. Вона характеризує ступінь текучості рідини, рухомості її частинок. Вода належить до найменш в'язких рідин. В'язкість ефіру та спирту ще менше. Найменшу в'язкість має рідка вуглекислота. Її в'язкість у 50 разів менша за в'язкість води. З підвищенням тиску в'язкість рідини збільшується. Проте залежність в'язкості від тиску суттєва лише при великих перепадах тиску, що вимірюються десятками мегапаскалів. В усіх інших випадках вплив тиску на в'язкість можна не враховувати. При збільшенні температури в'язкість рідини помітно зменшується. Зазначимо також, що в'язкість газів збільшується із зростанням температури. Доки рідина не рухається, в'язкість не виявляється, тому при розв'язанні задач рівноваги рідини її не треба брати до уваги. Під час руху рідини необхідно враховувати сили тертя, що виникають унаслідок в'язкості та підкоряються відомому закону Ньютона. Проте існують і такі рідини, у яких сили тертя з'являються вже у стані спокою при їх прагненні почати рухатися. Такі рідини називаються неньютонівськими або аномальними. До них можна віднести нафтопродукти при температурі, близькій до температури застигання, масляні фарби та мастила при низьких температурах, колоїдні розчини, литий бетон, глинястий розчин, який використовують при бурінні свердловин, та ін.

Для спрощення розгляду законів механіки рідин Л. Ейлер ввів поняття *ідеальної* рідини, тобто такої уявної рідини, яка є абсолютно рухомою (нев'язкою). При русі ідеальної рідини в ній не з'являються сили внутрішнього тертя.

Молекули, що розташовані на поверхні рідини, притягують молекули, які знаходяться нижче. Це викликає появу поверхневого натягу рідини, дією якого пояснюється капілярне підняття або спускання рідини у трубках малого діаметра або у вузьких щілинах. Якщо рідина змочує тверді стінки, з якими вона стикається, тоді відбувається капілярне підняття (наприклад, вода у скляній трубці), якщо не змочує – опускання рідини (наприклад, ртуть у скляній трубці). Цю властивість рідини слід враховувати при використанні трубок малого діаметра для виміру рівня або тиску рідини.

При випаровуванні рідини в закритому просторі через деякий час пара наситить його, отже, кількість випаровуваних та кількість конденсованих молекул зрівнюється і кількість молекул рідини в просторі буде максимальною. При цьому в навколишньому просторі встановлюється тиск, який називається **тиском насиченої пари** рідини. Чим вище температура, тим більше тиск насиченої пари. При нагріванні рідини тиск насиченої пари збільшується, а коли він починає перевищувати зовнішній тиск, рідина кипить, перетворюючись на пару. Зі збільшенням тиску температура кипіння зростає, а зі зменшенням – знижується. Поняття тиску насиченої пари пов'язано зі шкідливим явищем – **кавітацією**.

Молекули газу з навколишнього середовища проникають усередину рідини через її вільну поверхню. Цей процес розчинення газів у рідині продовжується до її насичення. Об'єм газу, який може бути розчинений при даній температурі в рідині до її насичення, збільшується лінійно зі зростанням тиску на її вільній поверхні. При зниженні тиску частина розчиненого газу виділяється з рідини, до того ж цей процес відбувається інтенсивніше, ніж розчинення. При виділенні газу рідина спінюється. Повітря, повністю розчинене в мастилах, практично не впливає на їх фізико-механічні властивості, проте його виділення та піноутворення при зниженні тиску в гідравлічних системах погіршує ці властивості мастил. У звичайних умовах вода вміщує близько 2% (за об'ємом) повітря, розчиненого в ній.

## 2 ГІДРОСТАТИКА

Властивості тиску у нерухомій рідині. Рівняння рівноваги рідини (Ейлера). Інтегрування рівнянь Ейлера. Поверхні рівного тиску. Вільна поверхня рідини. Основне рівняння гідростатики. Закон Паскаля. Прилади для вимірювання тиску. Сила тиску рідини, що діє на плоскі та криволінійні стінки. Закон Архімеда. Плавання тіл. Відносний спокій рідини. Приклади використання гідростатики у гідросистемах (відповідно спеціальності).

### Методичні вказівки

Гідростатика вивчає закони рівноваги рідини. Вона розглядає розподіл тиску в рідині, що перебуває у спокої, числове визначення та визначення напряму і точки прикладання сили тиску рідини, що діють на плоскі та криволінійні поверхні.

Як відомо, одиницею тиску є ньютон на квадратний метр – паскаль. Для практичних розрахунків ця одиниця незручна, тому частіше за все використовують кратні одиниці – кілопаскаль (кПа) та мегапаскаль (МПа):  $1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$ ;  $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$ .

Атмосферний тиск у будь-якій точці залежить від її висоти над рівнем моря і незначно коливається в одній і тій самій точці. Нормальний атмосферний тиск на рівні моря при температурі  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  приймають  $p_{am} = 101,3 \text{ кПа}$ .

Часто верхня частина рідини стикається з газом. Поверхня розділення рідини та газоподібного середовища називається **вільною поверхнею рідини**.

Розрізняють абсолютний тиск  $p_{аб}$ , манометричний (надлишковий)  $p_m$  та вакуум  $p_v$ , між якими існують такі залежності:

$$p_m = p_{аб} - p_{ат}; \quad p_v = p_{ат} - p_{аб}; \quad p_v = -p_m, \quad (1.1)$$

де  $p_{ат}$  – атмосферний або тиск між умовними нулями, Па. На рис. 1.1 можна прослідити межі виміру різних тисків. Вакуум, наприклад, не може бути більше атмосферного тиску.

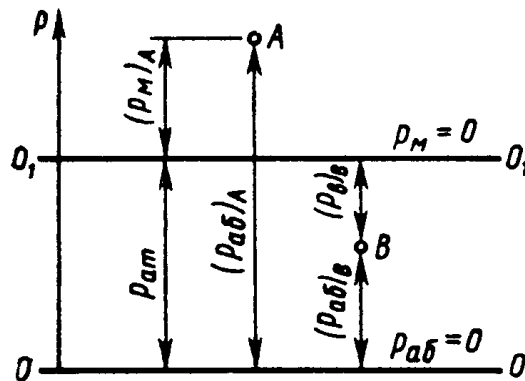


Рисунок 1.1 – Графічне зображення початків відліку тиску

Рідина тисне на поверхню, з якою вона стикається. При визначенні сили гідростатичного тиску, як правило, оперують манометричним тиском або вакуумом, оскільки атмосферний тиск діє на розрахункову конструкцію з усіх боків, його можна не брати до уваги. При визначенні сили тиску часто використовується так звана п'езометрична площина або площина атмосферного тиску, або горизонтальна площина, що проходить через рівень рідини, у п'езометрі, приєднаному до посудини. Поверхня рідини на рівні п'езометричної площини піддається лише дії атмосферного тиску, тобто  $p_m = 0$ . Якщо посудина з рідиною відкрита, тоді п'езометрична площина збігається з вільною поверхнею рідини. У випадку ж, коли посудина герметично закрита, вона може розташуватися вище або нижче вільної поверхні. У цілому відстань за вертикаллю до п'езометричної площини визначається за формулою

$$h = \frac{p}{\rho g}, \quad (1.2)$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $p$  – манометричний тиск або вакуум у будь-якій точці рідини,  $g$  – прискорення сили тяжіння. Відстань  $h$  відкладається вгору від тієї точки рідини, у якій тиск дорівнює  $p$ , якщо він манометричний, та вниз – у разі вакууму.

Силу тиску на плоску поверхню можна визначити аналітичним та графічним методами. При аналітичному методі силу тиску виражають формулою

$$F = p_c A, \quad (1.3)$$

де  $p_c$  – гідростатичний тиск у центрі тяжіння плоскої фігури;  $A$  – площа фігури.

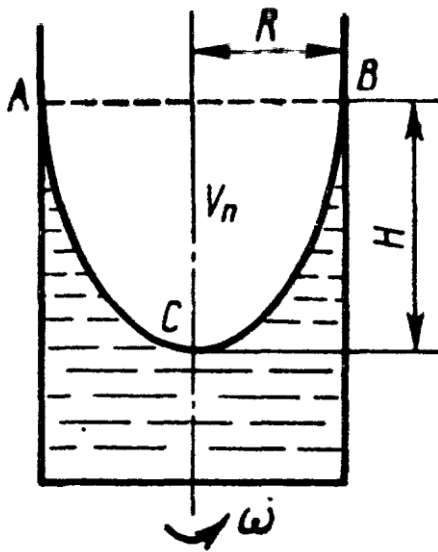


Рисунок 1.2

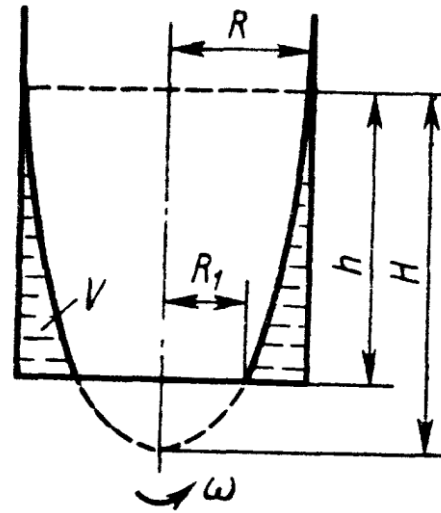


Рисунок 1.3

При графоаналітичному методі будують епюри тиску, що виражають закон розподілу тиску на контур тіла, зануреного у рідину. Сила тиску дорівнює об'єму просторової епюри, а вектор сили проходить крізь центр тяжіння цієї епюри. Рівнодіюча сила тиску рідини на криволінійну поверхню звичайно виражається трьома взаємно перпендикулярними складовими:  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ . Горизонтальні складові  $F_x$  та  $F_y$  розраховують як проєкції цієї криволінійної поверхні на відповідну вертикальну площину. Для визначення вертикальної складової  $F_z$  будують тіла тиску. При цьому криволінійна поверхня проєктується вертикально на п'єзометричну площину. **Тілом тиску** називається тіло, що знизу обмежується криволінійною поверхнею, зверху чи знизу – п'єзометричною площиною, а з боків – вертикальними проєктуючими поверхнями. Сила  $F_z$  розраховується за формулою

$$F_z = \rho g V, \quad (1.4)$$

де  $V$  – об'єм тіла тиску.

При визначенні сили тиску рідини на складну поверхню часто буває доцільно спочатку графічно підсумувати епюри, а також тіла тиску, що збудовані для окремих частин цієї поверхні.

Спокій рідини відносно стінок посудини, що рухається разом з рідиною, називається **відносним її спокоєм** або **рівновагою**. При цьому окремі частинки рідини не зміщуються одна відносно одної, а вся маса рідини рухається як одне тверде тіло. У даному випадку до сили тяжіння додається ще друга – сила інерції, та поверхня рідини частіше за все перестає бути горизонтальною. У відносному спокої може розглядатися, наприклад, рідина у цистерні, що



пересувається, пальне у баці машини, що рухається, рідина у посудині, що обертається, та ін. Поверхня рідини при обертанні разом з циліндричною посудиною відносно її вертикальної осі симетрії з постійною кутовою швидкістю  $\omega$  під дією відцентрових сил набуває форми параболоїда обертання  $ACB$  (рис. 1.2), висота  $H$  якого визначається за формулою

$$H = \frac{\omega^2 R^2}{2g}, \quad (1.5)$$

а об'єм параболоїда – за рівнянням

$$V_n = \frac{\pi R^2 H}{2}. \quad (1.6)$$

Коли при обертанні рідини її вільна поверхня перерізає дно посудини (рис. 1.3), об'єм рідини можна розраховувати за двома варіантами:

$$V = \frac{\pi(R^2 - R_1^2)h}{2} \quad \text{або} \quad V = \frac{\pi g h^2}{\omega^2}, \quad (1.7)$$

тут значення  $R$ ,  $R_1$  та  $h$  визначаються згідно з рис. 1.3.

### **3 ОСНОВИ КІНЕМАТИКИ ТА ДІНАМИКИ РІДИНИ. РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ**

Види руху рідини. Основні поняття кінематики рідини: лінія течії, трубка течії, струминка, справжня швидкість, живий переріз, витрати. Потік рідини. Середня швидкість. Рівняння нерозривності руху рідини. Диференційне рівняння руху ідеальної рідини. Рівняння Бернуллі для сталого руху ідеальної рідини. Геометричне та енергетичне тлумачення рівняння Бернуллі. Рівняння Бернуллі для потоку ідеальної рідини. Рівняння Бернуллі для потоку в'язкої рідини. Коефіцієнт Коріоліса. Загальні відомості про гідравлічні витрати. Види гідравлічних витрат. Трубка Піто. Витратомір Вентурі.

#### **Методичні вказівки**

Основним рівнянням гідродинаміки є рівняння Бернуллі. Його складають для двох живих перерізів потоку. Для сталого руху потоку реальної рідини воно має такий вигляд:

$$z_1 + p_1 / (\rho g) + \alpha_1 v_1^2 / (2g) = z_2 + p_2 / (\rho g) + \alpha_2 v_2^2 / (2g) + \Sigma h, \quad (1.8)$$

де  $z_1$ ,  $z_2$  – геометричний напір або висота положення – відстань від горизонтальної порівняльної площини, що була вибрана довільно, до центра тяжіння початкового та кінцевого перерізу (в енергетичному розумінні це

питома, тобто віднесена до одиниці ваги рідини, потенційна енергія положення), відповідно;  $p_1, p_2$  – тиск у центрі тяжіння початкового та кінцевого перерізу, відповідно;  $p_1/(\rho g), p_2/(\rho g)$  – п'єзометричний напір – вертикальна відстань між центром тяжіння початкового та кінцевого перерізу, відповідно, і рівнем рідини у п'єзометрі (питома потенціальна енергія тиску);  $v_1, v_2$  – середня швидкість потоку в початковому та кінцевому перерізі, відповідно;  $\alpha$  – коефіцієнт Коріоліса (відношення дійсної кінетичної енергії потоку до умовної кінетичної енергії, яка визначається за середньою швидкістю);  $\alpha_1 v_1^2/(2g), \alpha_2 v_2^2/(2g)$  – швидкісний напір (питома кінетична енергія) в початковому та кінцевому перерізі, відповідно;  $\Sigma h$  – гідравлічні втрати напору (та частина питомої механічної енергії, яку рідина втрачає на подолання опорів на ділянці потоку між перерізами 1 та 2. Внаслідок роботи сил тертя вона перетворюється у теплову енергію та розсіюється у просторі). Гідравлічні втрати складаються з втрат на тертя  $h_{mp}$  та місцевих  $h_m$ , тобто  $\Sigma h = h_{mp} + h_m$ . Рівняння Бернуллі є окремим випадком закону збереження повної питомої енергії. Воно може бути подане і в іншому вигляді, де всі члени являють собою енергію, віднесену до одиниці об'єму:

$$\rho g z_1 + p_1 + \alpha_1 v_1^2 \rho / 2 = \rho g z_2 + p_2 + \alpha_2 v_2^2 \rho / 2 + \Delta p, \quad (1.9)$$

де  $\Delta p = \rho g \Sigma h$  – втрати тиску.

Як видно, рівняння Бернуллі виражає зв'язок між трьома різними величинами потоку: висотою положення  $z$ , тиском  $p$  та середньою швидкістю  $v$ .

Під час розв'язання практичних задач, крім рівняння Бернуллі, використовується також рівняння постійності об'ємних витрат, тобто рівності витрат  $Q$  в усіх перерізах сталого потоку:

$$Q = v_1 S_1 = v_2 S_2 = \dots = v_n S_n = \text{const}, \quad (1.10)$$

тобто виходить, що середні швидкості  $v$  обернено пропорціональні площам  $S$  живих перерізів.

Умови використання рівняння Бернуллі:

1. Рівняння застосовується тільки для сталого руху потоку в'язкої нестисливої рідини у тому випадку, коли з масових сил на неї діє лише сила тяжіння.

2. Площина порівняння повинна бути горизонтальною. Висоту її дозволяється вибирати довільно, але зручно використовувати площину, що проходить через центр тяжіння нижнього розрахункового перерізу.

3. Два живих перерізи, для розрахунку яких використовується рівняння Бернуллі, повинні бути нормальні до векторів швидкостей та розташовуватися на прямолінійних ділянках потоку. Рух рідини в оточенні вибраних перерізів має бути паралельно-струминний або плавно змінюватися, хоча потік між ними може мінятися й різко. На ділянці потоку між перерізами не повинно бути джерела або споживача енергії рідини (насоса або гідродвигуна).

4. Якщо потік несталий або на ділянці між розрахунковими перерізами є джерело або споживач енергії, до наведених рівнянь (1.8), (1.9) необхідно дописати додаткові члени.

5. Звичайно розрахункові перерізи зручно підбирати там, де відомий тиск. Але до рівняння повинна потрапити і невідома величина, яку треба визначити. Нумерація вибраних перерізів 1 і 2 відбувається за напрямком потоку. У протилежному разі змінюється знак гідравлічних втрат  $\Sigma h$  або  $\Delta p$ .

6. Геометричний напір  $z$ , вищий за площину порівняння, вважається позитивним, а нижчий – негативним.

7. Коли площа розрахункового перерізу порівняно більша, швидкісний напір  $\alpha v^2 / (2g)$  і член  $\alpha v^2 \rho / 2$  є дуже малими на відміну від інших членів рівняння допустимо дорівнювати їх нулю.

8. Побудова напірних ліній.

#### 4 РЕЖИМИ РУХУ РІДИНИ ТА ОСНОВИ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ ПОДІБНОСТІ

Ламінарний та турбулентний режими руху рідини. Число Рейнольдса. Основи теорії гідродинамічної подібності. Критерії гідродинамічної подібності. Моделювання гідродинамічних явищ. Подібність повна та часткова.

#### 5 ЛАМІНАРНИЙ РУХ РІДИНИ

Розподіл швидкостей за перерізом круглої труби. Втрати напору на тертя за довжиною труби (формула Пуазейля). Початкова ділянка потоку. Ламінарна течія у плоских та кільцевих зазорах. Особливі випадки ламінарної течії (змінна в'язкість, облітерація).

##### Методичні вказівки

Втрати напору на тертя за довжиною труби у будь-якому режимі руху рідини визначають за допомогою формули Дарсі:

$$h_{mp} = \lambda l v^2 / (d2g) \quad \text{або} \quad \Delta p_{mp} = \lambda \rho l v^2 / (2d). \quad (1.11)$$

При ламінарній течії рідини  $\lambda = 64 / Re$  і перша формула (1.11) перетворюється у формулу Пуазейля:

$$h_{mp} = 64 l v^2 / (Re d 2g), \quad (1.12)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя;  $l$  – довжина розрахункової ділянки труби;  $d$  – діаметр труби;  $Re$  – число Рейнольдса,  $Re = vd / \nu$ ;  $\nu$  – кінематична в'язкість рідини. З формули (1.12) виходить, що при ламінарній течії рідини гідравлічні втрати на тертя прямо пропорційні середній швидкості потоку. До того ж вони залежать від фізичних властивостей рідини та від її геометричних параметрів, а втрати на тертя ніяк не пов'язані із шорсткістю стінок труби.

На витрату рідини, що тече крізь вузькі зазори, дуже впливають товщина та ексцентричність кільцевого зазору.

## 6 ТУРБУЛЕНТНИЙ РУХ РІДИНИ

Особливості турбулентного руху рідини. Пульсації швидкостей та тиску. Розподіл усереднених швидкостей за перерізом. Дотичні напруги у турбулентному потоці. Втрати напору у трубах. Формула Дарсі; коефіцієнт втрат на тертя за довжиною (коефіцієнт Дарсі). Шорсткість стінок, абсолютна та відносна. Графіки Нікурадзе та Муріна. Гідравлічно гладкі та шорсткі труби. Формули для визначення коефіцієнта Дарсі та області їх застосування. Рух у не круглих трубах.

### Методичні вказівки

Втрати напору на тертя за довжиною труби при турбулентному русі розраховують також за формулою Дарсі (1.11), але у цьому випадку коефіцієнт тертя визначають за іншими залежностями, ніж у ламінарному потоці. Таким чином, формула Дарсі є універсальною – її можна використовувати для будь-яких рідин при будь-якому режимі руху.

Існує ряд формул для визначення коефіцієнта  $\lambda$  залежно від режиму течії рідини та числа Рейнольдса, наприклад:

- 1) ламінарного руху (I зона,  $Re \leq 2320$ ):  $\lambda = 64 / Re$ ;
- 2) невизначеного руху (II зона,  $2320 < Re < 4000$ ). Трубопроводи з рухом рідини, що відповідає цій зоні, проектувати не рекомендується;
- 3) турбулентного руху ( $Re \geq 4000$ ) для:
  - а) зони гладких труб (III зона,  $4000 \leq Re \leq 10d / \Delta_e$ ), формула Прандтля – Нікурадзе:

$$1 / \sqrt{\lambda} = -2 \lg[2,51 / (Re \sqrt{\lambda})]; \quad (1.13)$$

б) перехідної зони (IV зона,  $10d / \Delta_e < Re < 560d / \Delta_e$ ), формула Колбрука:

$$1 / \sqrt{\lambda} = -2 \lg[2,51 / (Re \sqrt{\lambda}) + \Delta_e / (3,71d)]; \quad (1.14)$$

в) зони шорстких труб (V зона,  $Re > 560d / \Delta_e$ ), формула Прандтля – Нікурадзе:

$$1 / \sqrt{\lambda} = -2 \lg[\Delta_e / (3,71d)]. \quad (1.15)$$

Зону V ще називають зоною квадратичного опору, тому що тут гідравлічні втрати на тертя пропорційні квадрату швидкості. Для турбулентного руху найбільш загальною є формула IV зони. З неї як окремі випадки легко вивести

формули для III та V зон. Зі збільшенням номера зони зростає число Рейнольдса, підвищується турбулентність, а товщина ламінарного пристінного шару зменшується і, отже, збільшується вплив шорсткості та зменшується вплив в'язкості, тобто числа Re на коефіцієнт гідравлічного тертя. У перших трьох зонах коефіцієнт  $\lambda$  залежить лише від числа Re, у IV зоні – від числа Re та відносної шорсткості  $\Delta_e/d$ , а у зоні V – лише від шорсткості  $\Delta_e/d$ .

Для труб промислового виготовлення з природною шорсткістю для будь-якої області опору при турбулентному режимі руху можна користуватися формулою А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11(\Delta_e / d + 68 / \text{Re})^{0,25}. \quad (1.16)$$

Однак для визначення коефіцієнта  $\lambda$  не завжди зручно використовувати розглянуті вище формули. Таким чином, для полегшення розрахунків тут наведено номограму Колбрука – Уайта (див. додаток), за допомогою якої  $\lambda$  визначається досить легко за відомими Re та  $\Delta_e/d$ .

## 7 МІСЦЕВІ ГІДРАВЛІЧНІ ОПОРИ

Основні види місцевих опорів. Коефіцієнт місцевих втрат. Місцеві втрати напору за великих чисел Рейнольдса. Раптове розширення труби (теорема Борда). Дифузори. Звуження труби. Коліна. Місцеві втрати напору за малих чисел Рейнольдса. Кавітація у місцевих гідравлічних опорах. Практичне використання кавітації.

### Методичні вказівки

Місцеві гідравлічні втрати визначають за формулою Вейсбаха:

$$h_m = \zeta v^2 / (2g) \quad \text{або} \quad \Delta p_m = \zeta \rho v^2 / 2, \quad (1.17)$$

де  $\zeta$  – коефіцієнт місцевого опору;  $v$  – середня швидкість у перерізі, як правило, після місцевого опору.

Коефіцієнт  $\zeta$  за великих чисел Рейнольдса залежить лише від виду місцевого опору, а при ламінарній течії ще й від числа Рейнольдса. Наведені у додатку табл. Д.3 значення коефіцієнта  $\zeta$  деяких місцевих опорів належать до турбулентної течії з великими числами Рейнольдса. Для ламінарного руху коефіцієнт повинен бути перерахований, зважаючи на вплив числа Рейнольдса.

Просте підсумовування втрат у місцевих опорах можливе, якщо вони розташовані один від одного на відстані, що дорівнює не менш ніж 20 – 30 діаметрам труби. В іншому випадку опори впливають один на одного і працюють як одна система, для якої необхідно визначити певне значення коефіцієнта місцевого опору за допомогою експерименту.

## 8 ВИТІКАННЯ РІДИНИ КРІЗЬ ОТВОРИ ТА НАСАДКИ

Витікання рідини крізь отвори у тонкій стінці при постійному напорі. Коефіцієнти стиснення, швидкості, витрат. Витікання рідини крізь циліндричний насадок. Насадки різного типу. Витікання при змінному напорі (спорожнення резервуарів).

### Методичні вказівки

Витрати рідини при її витіканні крізь отвір або насадок визначають за формулою

$$Q = vS = \mu S \sqrt{2gH_0} \quad \text{або} \quad Q = \mu S \sqrt{2\Delta p / \rho}, \quad (1.18)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрат;  $S$  – площа отвору або перерізу насадка;  $H_0$  – діючий напір

$$H_0 = H + [(p_0 - p) / (\rho g)] + \alpha_0 v_0^2 / (2g), \quad (1.19)$$

де  $H$  – відстань від центру ваги площі отвору або перерізу насадка до поверхні рідини у резервуарі;  $p$  – тиск у середовищі, в якому відбувається витікання рідини;  $v_0$  – швидкість проходу рідини в резервуарі;  $\alpha_0 v_0^2 / (2g)$  – величина мала, і тому нею можна знехтувати;  $\Delta p$  – витрати тиску при витіканні рідини через місцевий опір (наприклад, коли використовують дросель, розподільник та іншу гідравлічну апаратуру).

Коефіцієнт витрат  $\mu$  малого отвору залежить від числа Рейнольдса. Зі збільшенням  $Re$  коефіцієнт  $\mu$  спочатку збільшується, досягає максимального значення  $\mu_{\max} = 69$  при  $Re = 350$ , а тоді починає зменшуватися та стабілізується на значенні, що дорівнює 0,60. Таким чином, отвори (а також насадки) за великих чисел  $Re$  зручно використовувати у ролі приладів для виміру витрат рідини.

При витіканні рідини крізь занурений отвір або насадок для визначення витрат використовують наведені формули (1.18), але в цьому випадку напір  $H_0$  беруть як різницю гідростатичних напорів з обох боків стінки. Виходячи з цього, витрати у даному випадку не залежать від висоти розташування отвору або насадка.

У разі витікання рідини крізь насадок утворюється вакуум, який збільшує його пропускну здатність та є прямопропорційним напору  $H_0$ . Коефіцієнт витрат насадка залежить від тиску та числа Рейнольдса. За своїм значенням він перевищує коефіцієнт витрат малого отвору. Наприклад, для зовнішнього циліндричного насадка  $\mu = 0,80$ , для колоїдального –  $\mu = 0,96-0,99$ .

## 9 ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТРУБОПРОВОДІВ

Основне розрахункове рівняння простого трубопровода. Основні розрахункові задачі. Поняття про визначення економічно найвигіднішого діаметра трубопровода. Сифонний трубопровід. Послідовне та паралельне з'єднання трубопроводів. Складні трубопроводи. Трубопровід з насосною подачею. Поняття про електрогідродинамічну аналогію. Основи розрахунку газопроводів.

### Методичні вказівки

При розрахунку напірних трубопроводів і для визначення гідравлічних втрат застосовують рівняння Бернуллі (1.8), (1.9), сталості витрат (1.10) та формули (1.11), (1.17). Відносно місцевих втрат та втрат на тертя трубопроводи діляться на короткі та довгі. До коротких відносять всмоктувальні трубопроводи насосів, сифонні труби, деякі гідролінії гідроприводів та інші трубопроводи. При їх розрахунку оцінюють та визначають втрати на тертя та місцеві втрати.

Розрахунок довгих трубопроводів ведуть за спрощеним рівнянням Бернуллі. У даному випадку швидкісні напори порівняно з іншими членами рівняння дуже малі та ними звичайно нехтують. Отже, відбувається збіг між напірною і п'єзометричною лініями. Місцеві втрати або зовсім не оцінюються, або без точного розрахунку приймаються такими, що дорівнюють деякій частці втрат за довжиною, як правило 10–15%.

Розрахунок простих трубопроводів зведено до трьох типових задач з визначення напору, витрат, діаметра трубопроводу. Їх розв'язують аналітичним та графоаналітичним методами. Задачі другого та третього типів аналітичним методом вирішити безпосередньо не можна і доводиться застосовувати метод підбору. Тому для цих випадків зручніше застосовувати графоаналітичний метод. При цьому для задачі другого типу будується гідравлічна характеристика трубопроводу, яка свідчить про зв'язок між витратами та гідравлічними втратами, тобто  $\Sigma h = f(Q)$ .

Для того, щоб побудувати таку характеристику, необхідно знати лише геометричні параметри труби: діаметр, довжину та шорсткість. Довільно підбирають декілька значень витрат та визначають відповідні їм гідравлічні втрати. Криву характеристики труби будують за даними розрахунку. При ламінарній течії рідини характеристика труби має вигляд прямої лінії.

При розрахунку складних трубопроводів зручно користуватися графоаналітичним методом, графічно складаючи гідравлічні характеристики окремих труб.

## 10 НЕСТАЛИЙ РУХ РІДИНИ

Несталий рух нестисливої рідини у жорстких трубах з урахуванням інерційного напору. Явище гідравлічного удару. Формула Жуковського для

прямого удару. Поняття про непрямий удар. Методи послаблення гідравлічного удару. Практичне використання гідравлічного удару в техніці.

### **Методичні вказівки**

Розрахунок жорсткого трубопроводу при несталому русі нестисливої рідини виконують за рівнянням Бернуллі (1.8), (1.9) з додатковим інерційним членом, який ураховує втрати напору на подолання сили локальної інерції. Наприклад, таким чином розраховують лінію всмоктування поршневого насоса з дуже нерівномірною подачею рідини та труби при випорожненні резервуара у випадку раптового відкриття крана.

При раптовій зміні швидкості потоку в напірному трубопроводі різко змінюється тиск – виникає гідравлічний удар. Він сприймається як шкідливе явище, тому що може викликати аварії у гідросистемах. У цьому відношенні прямий удар більш небезпечний, ніж непрямий. При прямому ударі підвищення тиску прямопропорційне зміні швидкості потоку, густині рідини та швидкості розповсюдження ударної хвилі у ній.

## **11 ВЗАЄМОДІЯ ПОТОКУ ЗІ СТІНКАМИ**

Теорема імпульсів. Дія вільного струменя на тверді перешкоди. Сили дії напірного потоку на стінки.

## **12 КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ**

За навчальним планом передбачається виконання однієї чи декількох контрольних робіт, у кожному з яких входить визначена кількість задач.

Номери контрольних задач студент вибирає за останньою (табл. 3.1), а числові значення – за передостанньою цифрою шифру своєї залікової книжки (табл. 3.5).

Кількість і тематика задач у контрольних роботах за необхідності можуть бути змінені відповідно до вимог спеціальності, обсягу курсу і встановленої кафедрою особливості його вивчення.

В умовах задач контрольних робіт не завжди вказують усі цифрові значення параметрів, необхідних для вирішення задач (наприклад, може бути не зазначена щільність, коефіцієнт в'язкості чи інший параметр). Тоді відсутні параметри студентів треба вибрати з таблиць, поміщених у додатку. У разі потреби можна користатися також даними інших довідників, обов'язково вказуючи у своїй контрольній роботі назву довідника, номер таблиці чи графіка.



Таблиця 3.1

Остання цифра шифру	При виконанні однієї контрольної роботи	При виконанні двох контрольних робіт		При виконанні трьох контрольних робіт		
		у першій	у другій	у першій	у другій	у третій
1	1, 4, 10, 19, 22	1, 6, 10, 16	19, 22, 25	1, 6, 7	11, 13, 16	19, 22, 25
2	2, 5, 11, 20, 23	2, 5, 11, 17	20, 23, 26	2, 5, 8	12, 14, 17	20, 23, 26
3	3, 6, 12, 21, 24	3, 4, 12, 18	21, 24, 27	3, 4, 9	10, 15, 18	21, 24, 27
4	1, 5, 11, 20, 23	2, 6, 11, 16	19, 23, 28	3, 5, 8	11, 15, 17	19, 23, 28
5	2, 6, 12, 21, 24	3, 5, 12, 17	20, 24, 25	2, 6, 9	12, 15, 16	20, 24, 25
6	3, 4, 10, 19, 22	1, 4, 10, 18	21, 22, 26	1, 4, 9	10, 13, 18	21, 22, 26
7	1, 6, 12, 21, 24	3, 6, 12, 16	19, 24, 27	1, 5, 8	11, 14, 17	19, 24, 27
8	2, 4, 11, 20, 22	1, 5, 10, 17	20, 22, 28	2, 4, 7	12, 13, 16	20, 22, 28
9	3, 5, 10, 19, 23	2, 4, 11, 18	21, 23, 26	3, 6, 7	10, 14, 16	21, 23, 26
0	1, 6, 10, 20, 22	2, 4, 10, 18	20, 24, 25	2, 5, 9	11, 14, 18	20, 24, 25

### 3.1. Задачі

**Задача 1.** Автоклав обсягом 25,0 л наповнений рідиною і закритий герметично. Коефіцієнт температурного розширення рідини  $\alpha$ , її модуль пружності  $E$ . Визначити підвищення тиску в автоклаві при збільшенні температури рідини на величину  $T$ . Об'ємною деформацією автоклава знехтувати.

**Задача 2** (рис. 3.1)\*. Визначити швидкість  $v$  рівномірного ковзання прямокутної пластини ( $a \times b \times c$ ) по похилій площині під кутом  $\alpha = 12^\circ$ , якщо між пластиною і площиною знаходиться шар масла товщиною  $\delta$ . Температура масла  $30^\circ\text{C}$ , щільність матеріалу пластини  $\rho$ .

**Задача 3** (рис. 3.2)\*. Зазор між валом і втулкою заповнений маслом, товщина шару якого дорівнює  $\delta$ . Діаметр вала  $D$ , довжина втулки  $L$ . Вал обертається рівномірно під впливом обертального моменту  $M$ . Визначити частоту обертання вала, якщо температура масла дорівнює  $40^\circ\text{C}$ .

**Задача 4** (рис. 3.3)\*. Закритий резервуар заповнений дизельним паливом, температура якого  $20^\circ\text{C}$ . На вертикальній стінці він має прямокутний отвір ( $D \times b$ ), закритий напівциліндричною кришкою, яка може повертатися навколо горизонтальної осі  $A$ . Вакуум-манометр  $MV$  показує манометричний тиск  $p_m$  чи вакуум  $p_v$ . Глибина палива над кришкою дорівнює  $H$ . Визначити зусилля  $F$ , яке

\* Рисунки подані у Додатку

необхідно прикласти до нижньої частини кришки, щоб вона не відкривалася. Силою ваги кришки знехтувати. На схемі показати вектори діючих сил.

**Задача 5** (рис. 3.4)\*. Вертикальна циліндрична цистерна з напівсферичною кришкою до самого верха заповнена рідиною, густина якої  $\rho$ . Діаметр цистерни  $D$ , висота її циліндричної частини  $H$ . Манометр  $M$  показує манометричний тиск  $p_m$ . Визначити силу, що розтягує болти  $A$ , і горизонтальну силу, що розриває цистерну по перерізу  $I-I$ . Силою ваги кришки знехтувати. Вектори сил показати на схемі.

**Задача 6** (рис. 3.5)\*. Круглий отвір між двома резервуарами закрито конічною кришкою з розмірами  $D$  і  $L$ . Закритий резервуар заповнений водою, а відкритий – рідиною  $\mathcal{J}$ . До закритого резервуара зверху приєднаний вакуум-манометр  $MV$ , що показує манометричний тиск  $p_m$  чи вакуум  $p_v$ . Температура рідин  $20^\circ\text{C}$ , глибини  $h$  і  $H$ . Визначити силу, що зриває болти  $A$ , і горизонтальну силу, що діє на кришку. Силою ваги кришки знехтувати. Вектори сил показати на схемі.

**Задача 7** (рис. 3.6)\*. Циліндрична цистерна наповнена бензином, температура якого  $20^\circ\text{C}$ . Діаметр цистерни  $D$ , довжина  $L$ . Глибина бензину в горловині  $h = 20$  см, її діаметр  $d = 30$  см. Визначити сили тиску на плоскі торцеві стінки  $A$  і  $B$  цистерни в двох випадках: 1) коли цистерна не рухається; 2) при русі цистерни горизонтально з позитивним прискоренням  $a$ .

**Задача 8** (рис. 3.7)\*. Відкритий циліндричний резервуар заповнений рідиною  $\mathcal{J}$  до висоти  $0,8 H$ . Діаметр резервуара  $D$ , температура рідини  $20^\circ\text{C}$ . Визначити: 1) обсяг рідини, що виливається з резервуара при його обертанні з частотою  $n$  навколо його вертикальної осі; 2) силу тиску на дно резервуара і горизонтальну силу, що розриває резервуар по перерізу  $I-I$  при його обертанні.

**Задача 9** (рис. 3.8)\*. Циліндрична посудина діаметром  $D$  і висотою  $H$  цілком заповнена водою, температура якої  $20^\circ\text{C}$ . Діаметр отвору зверху дорівнює  $d$ . Визначити: 1) з якою граничною частотою можна обертати посудину навколо її вертикальної осі, щоб у посудині залишилося 75% первісного обсягу води; 2) силу тиску на дно посудини і горизонтальну силу, що розриває посудину по перерізу  $I-I$  при її обертанні з визначеною частотою.

**Задача 10** (рис. 3.9)\*. По сифонному трубопроводу довжиною  $l$  рідина  $\mathcal{J}$ , температура якої  $20^\circ\text{C}$ , скидається з відстійника  $A$  у відвідний канал  $B$ . Який повинний бути діаметр  $d$  трубопроводу (його еквівалентна шорсткість  $\Delta_e$ ), щоб забезпечити скидання рідини в кількості  $Q$  при напорі  $H$ ? Трубопровід має приймальний клапан із сіткою ( $\zeta_k$ ), плавні повороти труби здійснюються на кут  $45^\circ$ , радіус округлення труби  $R = 2r$ . Побудувати п'єзометричну і напірну лінії. Дані відповідно до варіанта завдання вибрати з табл. 3.5.

Таблиця 3.5

№ задачі	Фізична величина, її розмірність	Передостання цифра шифру студентської залікової книжки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Олія, масло, мастило	Індустріальне мастило 12	Турбінне Мастило	Індустріальне мастило 50	Трансформаторне масло	АМГ-10	Індустріальне мастило 20	Касторова олія	Веретенне мастило АУ	Індустріальне мастило 30	Турбінне мастило
	$a$ , мм	580	400	590	530	470	630	310	850	720	450
	$b$ , мм	450	250	300	260	290	440	140	740	570	280
	$c$ , мм	12	43	10	13	20	11	15	7	6	35
	$\delta$ , мм	0,4	0,7	1,1	0,5	0,4	0,9	1,2	0,6	0,5	0,9
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	800	240	680	450	260	640	1100	2500	2100	270	
2	Олія, масло, мастило	Індустріальне мастило 50	Касторова олія	Індустріальне мастило 30	Турбінне Мастило	Індустріальне мастило 12	Веретенне мастило АУ	Індустріальне мастило 20	АМГ-10	Трансформаторне масло	Індустріальне мастило 30
	$M$ , Н·м	520	1,35	9,20	4,50	2,65	3,30	15,5	6,10	1,65	8,50
	$\delta$ , мм	3,3	0,8	2,2	1,5	1,1	1,7	2,8	2,1	1,4	1,9
	$D$ , мм	480	100	180	470	270	400	250	340	230	200
	$L$ , мм	1400	300	700	1200	780	640	1300	850	590	630
3	$\alpha \cdot 10^{-6}$ 1/°C	649	832	698	351	956	735	187	536	150	653
	$E$ , 10 <sup>9</sup> Па	1,58	1,95	1,67	2,08	1,48	1,72	24,6	4,08	2,06	1,75
	$T$ , °C	40,5	11,0	38,5	45,0	19,9	32,0	5,5	21,0	39,5	32,5
4	$p_m$ , кПа	11,4	0,00	–	4,68	–	7,66	–	0,00	13,2	–
	$p_{в}$ , кПа	–	–	2,85	–	3,42	–	8,45	–	–	4,26
	$D$ , м	0,94	1,40	0,86	0,90	1,10	0,68	0,82	1,20	1,00	0,96
	$b$ , м	1,70	2,65	1,42	1,67	1,75	1,10	1,45	2,30	1,80	1,63
	$H$ , м	0,96	1,65	0,76	0,52	0,95	1,15	1,50	0,85	0,65	0,93
5	$D$ , м	2,40	1,70	2,80	2,00	1,80	2,60	2,10	1,60	2,20	1,90
	$H$ , м	4,10	3,00	5,30	3,70	3,40	4,80	4,30	3,20	4,50	3,80
	$p_m$ , кПа	32,3	18,6	0,00	19,1	0,00	26,7	21,4	0,00	16,2	14,2
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	980	930	890	1090	1130	950	970	998	1220	1000
6	$J$	Бензин	Гас Т-1	Дизельне паливо	Гліцерин	Бензин	Дизельне паливо	Нафта важка	Гас Т-2	Нафта легка	Гліцерин
	$D$ , мм	700	620	450	570	640	500	390	600	520	550
	$L$ , мм	550	560	410	470	530	420	360	540	440	460
	$h$ , м	2,40	1,96	1,48	2,10	2,15	1,40	1,69	1,82	1,10	1,50
	$H$ , м	3,20	2,35	1,70	2,60	2,75	1,60	1,90	2,25	1,40	1,75
	$p_m$ , кПа	0,00	–	0,00	27,9	–	0,00	–	37,5	–	16,2
$p_{в}$ , кПа	–	24,1	–	–	–	28,9	–	37,7	–	25,6	

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	D, м	2,24	2,10	1,90	1,82	1,74	1,68	1,52	1,46	1,20	1,72
	L, м	4,08	3,80	3,68	3,48	3,26	3,06	2,84	2,64	2,40	3,20
	A, м/с <sup>2</sup>	7,20	8,43	6,25	5,86	4,37	9,8J	7,75	6,70	3,26	5,20
8	Ж	Гліце-рин	Нафта-легка	Транс-форма-торне-масло	Бензин	Вода	Дизе-льне-паливо	Гліце-рин	Нафта-важка	Вода	Гас Т-1
	D, м	1,16	1,28	1,40	1,20	1,00	1,30	1,26	1,10	1,70	1,30
	H, м	1,60	1,55	2,45	2,80	2,00	2,35	1,80	1,45	1,60	1,64
	N, 1/с	1,38	1,32	2,00	2,10	1,69	1,75	1,41	1,72	1,85	1,43
9	D, см	20	24	30	46	26	34	42	38	28	22
	H, см	28	36	42	50	30	40	52	45	34	26
	D, см	16	20	24	36	22	28	34	32	22	18
10, 11, 12	Ж	Вода	Гас Т-1	Гас Т-2	Дизе-льне-паливо	Бензин	Нафта-легка	Вода	Гас Т-1	Гас Т-2	Дизе-льне-паливо
	Q, л/с	1,2	1,4	1,7	2,3	2,6	3,1	3,4	1,9	2,1	2,7
	H, м	4,00	4,30	4,70	5,10	3,80	4,20	4,60	4,80	5,00	4,50
	L, м	12,0	12,8	13,2	14,0	12,6	13,3	13,7	14,1	14,8	14,7
	ΔE, мм	0,060	0,070	0,120	0,030	0,050	0,060	0,070	0,120	0,045	0,070
	D, мм	32	40	50	32	50	40	50	40	32	40
	P1, кПа	78,2	72,0	68,0	63,0	66,2	69,0	73,0	75,6	79,0	67,0
ZK	6,0	6,4	7,0	7,2	6,8	6,6	6,5	7,4	7,7	7,9	
13, 14, 15	Ж	Гас Т-2	Дизе-льне-паливо	Вода	Гас Т-1	Дизе-льне-паливо	Вода	Гас Т-1	Дизе-льне-паливо	Бензин	Вода
	H, м	6,00	6,40	6,80	6,20	5,80	5,60	5,30	4,90	4,70	4,50
	L1, м	10,0	9,7	9,3	9,0	8,7	8,9	9,2	9,6	9,7	9,9
	L2, м	6,0	6,1	8,3	8,1	7,7	7,4	7,1	6,8	7,3	7,5
	D1, мм	60	55	50	65	70	60	65	60	55	50
	D2, мм	45	45	40	45	50	50	45	45	40	40
	P1, кПа	24,2	27,0	32,6	35,0	37,2	41,0	38,0	31,0	29,6	28,0
ΔE, мм	0,070	0,060	0,030	0,050	0,060	0,035	0,045	0,065	0,120	0,045	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
16, 17, 18	Ж	Вода	Гас Т-1	Вода	Гас Т-2	Вода	Гас Т-1	Вода	Гас Т-1	Вода	Гас Т-1
	Q, л/с	1,9	2,2	2,4	2,7	3,1	3,4	2,9	3,2	3,5	2,8
	d, мм	32	40	32	45	40	40	25	25	40	25
	d <sub>1</sub> , мм	25	32	25	40	32	32	20	20	35	20
19	F, кН	30,0	25,0	20,0	15,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0
	s, мм	500	560	450	400	360	320	360	400	450	500
	t, с	20,0	25,0	18,0	15,0	13,0	10,0	15,0	25,0	30,0	35,0
	D <sub>n</sub> , мм	160	125	100	80	63	80	100	125	160	200
	D <sub>ш</sub> , мм	50	40	32	40	25	40	40	50	63	50

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20	Ж	Касто- рова олія	Транс- форма- торне масло	АМГ- 10	Вере- тенне масти- ло АУ	Інду- стіальне масти- ло 12	Інду- стіальне масти- ло 20	Інду- стіальне масти- ло 30	Інду- стіальне масти- ло 50	Турбін- не масти- ло	Транс- форма- торне масло
	$v_n$ , см/с	2,00	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00
	$l_3$ , м	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	2,40	2,30	2,20	2,10	2,00
	$d_3$ , мм	13	15	13	11	11	9	13	18	25	30
	$p_m$ , МПа	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	1,90	1,80	1,70	1,60
	$d_0$ , мм	7,00	7,00	5,50	4,90	4,70	4,50	6,30	8,50	11,5	15,0
	$D_n$ , мм	200	160	125	100	90	80	ПО	140	180	220
	$D_{ш}$ , мм	50	40	40	32	25	32	36	45	56	90
	$\eta_m$ , мм	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82
21	Ж	Транс- форма- торне масло	Турбін- не масти- ло	АМГ- 10	Вере- тенне масти- ло АУ	Інду- стіальне масти- ло 12	Інду- стіальне масти- ло 20	Інду- стіальне масти- ло 30	Інду- стіальне масти- ло 50	Турбін- не масти- ло	Транс- форма- торне масло
	$Q$ , л/хв	18,0	20,0	22,0	24,0	26,0	28,0	30,0	35,0	40,0	50,0
	$V_0$ , см <sup>3</sup>	100	80	40	50	63	40	50	40	80	160
	$M_k$ , Н·м	50,0	45,0	40,0	35,0	30,0	25,0	20,0	15,0	10,0	10,0
	$\eta_{2m}$	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,80	0,81	0,82	0,83
	$l_3$ , мм	3,00	3,20	3,30	3,10	2,90	2,80	2,70	2,50	2,40	2,20
	$d_3$ , мм	10	13	13	13	14	14	15	15	16	18
22	$H_2$ , м	0,0	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50
	$l_6$ , м	4,50	4,00	5,00	5,50	6,00	6,50	5,00	4,50	5,00	10,0
	$l_n$ , м	10,0	9,50	18,0	15,0	17,0	20,0	22,0	25,0	29,0	30,0
	$d_6$ , мм	40	40	32	40	32	25	32	40	32	40
	$d_n$ , мм	20	25	20	25	16	25	20	25	32	32
	$p_0$ , кПа	25,0	50,0	40,0	35,0	30,0	25,0	20,0	10,00	5,0	0,0
	$\zeta_3$	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,70	0,65	0,75
23	$H_2$ , м	0,0	14,00	5,00	- 2,00	6,00	0,0	13,00	12,50	-1,50	12,00
	$p_0$ , кПа	0,0	80,0	10,0	10,0	0,0	15,0	50,0	60,0	-25,0	20,0
	$l_6$ , м	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	19,0	17,0	15,0	13,0
	$l_n$ , м	45,0	40,0	35,0	30,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0
	$d_6$ , мм	63	80	50	50	63	80	63	80	40	80
	$d_n$ , мм	40	50	50	40	50	40	50	50	40	50

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
24	H1	1	2	5	2	4	5	7	3	7	6
	H2	1	3	4	2	6	5	6	2	7	4
	Спосіб сполучення	Паралельно		Послідовно		Паралельно		Послідовно		Паралельно	
	$H_c$ , м	12,0	10,0	65,0	42,0	50,0	20,0	67,0	39,0	25,5	48,0
$l$ , м	110	140	190	170	450	550	670	105	380	500	
$d$ , мм	65	90	100	70	200	150	150	60	175	180	
25	Ж	АМГ-10	А-10	Індустріальне мастило 50	Індустріальне мастило 12	Індустріальне мастило 30	Турбін- не мастило	Індустріальне мастило 20	Веретенне мастило АУ	Веретенне мастило АУ	Трансформаторне масло
	$Q_n$ , л/хв	32,0	25,0	16,0	12,5	8,00	5,00	3,20	50,0	63,0	32
	$p_n$ , МПа	2,50	4,0	6,3	12,5	16,0	16,0	10,0	1,60	1,00	1,60
	$D_n$ , мм	200	160	125	100	80	63	63	160	250	160
	$D_{ш}$ , мм	63	50	50	40	32	32	40	63	80	50
	$D_1$ , мм	180	250	180	160	125	100	80	80	63	160
	$D_2$ , мм	100	160	100	80	50	50	50	40	32	80
	$l_1 = l_2$ , м	2,50	2,40	2,40	2,50	3,00	1,90	2,00	1,80	2,80	2,20
	$l_3 = l_4$ , м	2,00	1,80	1,60	1,40	1,50	2,00	1,80	2,20	1,75	2,00
	$d_1 = d_2$ , мм	15	13	10	8	5	5	5	13	18	13
	$d_3 = d_4$ , мм	8	8	5	5	5	5	5	10	13	10
	$\Delta_e$ , мм	0,060	0,070	0,075	0,05	0,040	0,050	0,040	0,10	0,080	0,013
26	Ж	Трансформаторне масло	Веретенне мастило АУ	Веретенне мастило АУ	Турбін- не мастило	Індустріальне мастило 20	Індустріальне мастило 30	Індустріальне мастило 12	Індустріальне мастило 50	Трансформаторне масло	АМГ-10
	$F$ , кН	5,00	8,00	10,0	14,0	20,0	25,0	35,0	50,0	60,0	70,0
	$D_n$ , мм	50	63	80	80	100	125	160	160	200	220
	$D_{ш}$ , мм	20	32	40	40	50	63	80	80	100	110
	$T$ , °C	60	50	60	50	70	50	60	55	50	60
	$l_1$ , м	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,0	1,90	1,80	1,70	1,60
	$l_2 = l_3$ , м	1,20	1,25	1,30	1,35	1,10	1,2	1,10	1,30	1,20	1,40
	$l_4$ , м	2,00	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35	2,40	2,40	2,30
	$d$ , мм	20	21	22	23	24	25	24	23	22	20
	27	Ж	Веретенне мастило АУ	Турбін- не мастило	Індустріальне мастило 20	Індустріальне мастило 30	Індустріальне мастило 12	Індустріальне мастило 50	Трансформаторне масло	АМГ-10	Веретенне мастило АУ
$M_k$ , Н·м		100	80,0	60,0	50,0	40,0	30,0	25,0	20,0	15,0	10,0
$V_0$ , см <sup>3</sup>		200	180	160	140	125	112	100	90	80	71
$n$ , с <sup>-1</sup>		10,0	8,00	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	2,0	2,0	20
$Q_{ном}$ , л/хв		160	100	70	50	50	25	16,0	12,5	12,5	100
$l$ , м		1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,0	1,90	1,80	1,70	1,60
$d$ , мм		25	25	20	18	15	15	13	8	7	25
$\eta_n$		0,65	0,84	0,70	0,74	0,76	0,73	0,80	0,85	0,85	0,60

Закінчення табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Ж	Транс- форма- торне масло	АМГ-10	Вере- тенне масти- ло АУ	Індуст- ріальне масти- ло 12	Індуст- ріальне масти- ло 20	Індуст- ріальне масти- ло 30	Індуст- ріальне масти- ло 50	Турбін- не масти- ло	Транс- форма- торне масло	Вере- тенне масти- ло АУ
28	$M_k, \text{Н} \cdot \text{м}$	20,0	12,0	8,00	15,0	20,0	30,0	100	150	40	150
	$V_0, \text{см}^3$	125	50	40	63	80	100	200	200	50	200
	$Q_{ном}, \text{л/хв}$	35	12,3	18	26	38	50	100	70	50	35
	$p_{ном}, \text{МПа}$	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	6,3	6,3	6,3	6,3
	$S_\delta, \text{мм}^2$	6,60	2,25	3,25	4,70	6,90	9,10	11,4	8,00	5,70	4,00
	$d, \text{мм}$	10	7	8	9	10	13	18	15	13	10

### 13 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНИХ ЗАВДАНЬ

Контрольні завдання, розроблені для студентів-заочників, допоможуть їм, з одного боку, більш глибоко ознайомитися з основними положеннями курсу гідравліки, гідравлічних машин і гідроприводів, а з другого – застосовувати вивчені закономірності під час вирішення практичних завдань.

**Задачі 1, 2, 3.** Ці задачі складені за темою «Основні властивості рідин». У задачі 1 розглядаються стисливість і температурне розширення, а в задачах 2, 3 – в'язкість рідини.

При розв'язанні задачі 1 використовують відомі формули для визначення коефіцієнтів об'ємного стиску і температурного розширення рідини. Цікаво, що підвищення тиску в герметичній заповненій рідиною посудині не залежить від її об'єму.

Задачу 2 розв'язують за допомогою формули Ньютона:

$$T = \mu A (du / dn), \quad (4.1)$$

де  $T$  – сила тертя;  $\mu$  – динамічна в'язкість рідини;  $A$  – площа зіткнення твердої поверхні з рідиною;  $du/dn$  – градієнт швидкості. Отже, градієнт швидкості  $du/dn = v / \delta$ . Пластина ковзає під впливом сили  $F = G \sin \alpha$ , де  $G$  – вага пластини. При рівномірному русі пластини сила тертя  $T$  за величиною дорівнює силі  $F$ .

Задачу 3 вирішують за тією самою методикою, що і задачу 2, тільки силу тертя в даному випадку визначають за формулою моменту:

$$M = T (D/2 + \delta/2). \quad (4.2)$$

Беручи до уваги малий зазор, другим доданком  $\delta/2$  у дужках можна знехтувати. Коли  $\delta < D$ , кривизною шару рідини також нехтують, розглядаючи її рух у зазорі як плоскопаралельний (див. рис. 7, б). Вважаючи, що швидкості й

у шарі мастила змінюються за прямолінійним законом, епюра дотичних напружень  $\tau$  має вигляд прямокутника. Отже, сила тертя  $T$  проходить через центр тяжіння цієї епюри, тобто посередині шару мастила. Куту швидкість  $\omega$  і частоту  $n$  обертання вала визначають за допомогою відомих формул:

$$v = \omega D/2, \quad (4.3)$$

$$\omega = 2\pi n. \quad (4.4)$$

**Задачі 4, 5, 6.** Ці задачі складені за темою «Гідростатика». Вони зв'язані з визначенням сили тиску рідини на криволінійні стінки.

При вирішенні задачі 4 визначають горизонтальну  $F_x$  і вертикальну  $F_z$  складові рівнодійної сили тиску рідини на кришку.

Горизонтальна сила  $F_x$  дорівнює силі тиску на вертикальну проекцію кришки і визначається так само, як і сила тиску на плоску поверхню:

$$F_x = p_c A, \quad (4.5)$$

де  $p_c$  – тиск у центрі ваги вертикальної проекції кришки, тобто прямокутника;  $A$  – площа цієї проекції.

Відстань між центром тиску і центром тяжіння проекції криволінійної поверхні визначають за формулою

$$e = I / (h_c A), \quad (4.6)$$

де  $I$  – момент інерції, у даному випадку для прямокутника  $I = bD^3/12$ ;  $h_c$  – відстань від п'єзометричної площини до центра тяжіння проекції стінки.

Силу  $F_x$  можна визначити і графоаналітичним способом за допомогою епюри тиску.

Вертикальну силу  $F_z$  обчислюють за формулою (1.4). При побудові первісних тіл тиску верхню і нижню частини кришки окремо проектують вертикально на горизонтальну п'єзометричну площину. Відстань по вертикалі до цієї площини можна визначити за формулою (1.2). У даному випадку доцільно підсумовувати графічно первісні тіла тиску. Вектор сили  $F_z$  проходить через центр тяжіння тіла тиску. Центр тяжіння півкола розраховується за формулою:

$$x = 2D / (3\pi). \quad (4.7)$$

Силу  $F$  визначають з рівняння моментів відносно осі  $A$ .

При вирішенні задачі 5 вертикальну силу  $F_z$ , що розтягує болти  $A$ , визначають за формулою (1.4). При побудові тіла тиску кришка проектується вертикально нагору на горизонтальну п'єзометричну площину. Вертикальну відстань до цієї площини визначають за формулою (1.2).



Повну горизонтальну силу  $F_x$ , що розриває цистерну по перерізу  $I-I$ , зручно розкласти на дві частини: силу  $F_1$ , діючу на верхню напівсферичну частину цистерни, і силу  $F_2$ , що діє на її циліндричну частину. Сили  $F_1$  і  $F_2$  обчислюють за формулою (4.5). Положення центра тяжіння півкола визначають за формулою (4.7).

Розв'язання задачі 6 подібно до розв'язання задачі 4. Сили визначають окремо від рідин, що діють ліворуч і праворуч, а потім їх підсумовують з урахуванням напрямків.

**Задачі 7, 8, 9.** Ці задачі розглядають відносний спокій рідини.

При вирішенні задачі 7 сили тиску рідини на торцеві стінки можна визначити за формулою (1.3). При русі цистерни з прискоренням  $a$  п'єзометрична площина стає похилою до горизонту під кутом  $\alpha$ . Причому

$$\operatorname{tg} \alpha = a/g. \quad (4.8)$$

Хід розв'язання задачі 8 може бути таким: 1) визначити первісний об'єм рідини перед обертанням; 2) за формулою (4.4) знайти кутову швидкість  $\omega$ ; 3) за формулами (1.5), (1.6) визначити висоту й об'єм параболоїда обертання; 4) обчислити об'єм рідини, що знаходиться в резервуарі при його обертанні; 5) визначити об'єм рідини, що зливається з резервуара; 6) обчислити силу тиску, що діє на дно резервуара (вона дорівнює силі тяжіння рідини, що знаходиться в ньому); 7) за формулою (4.5) визначити горизонтальну силу, що розриває резервуар по перерізу  $I-I$  при його обертанні.

Вирішення задачі 9 аналогічно вирішенню задачі 8, а саме: 1) обчислити первісний об'єм рідини в посудині; 2) визначити об'єм зливної рідини (він дорівнює об'єму параболоїда обертання з діаметром основи  $d$ ); 3) знайти висоту цього параболоїда за допомогою формули (1.6); 4) за формулою (1.5) визначити кутову швидкість обертання посудини; 5) знайти частоту обертання за допомогою формули (4.4); 6) визначити силу тиску, що діє на дно (вона дорівнює силі тяжіння рідини, що знаходиться в посудині); 7) за формулою (4.5) обчислити горизонтальну силу, діючу по перерізу  $I-I$  при обертанні посудини. При цьому необхідно знайти висоту параболоїда обертання, діаметр основи якого дорівнює  $D$ .

**Задачі 10, 11, 12.** Ці задачі складені за темою «Гідравлічний розрахунок трубопроводів» і розділом «Гідравлічно короткі трубопроводи». Їх вирішують за допомогою рівняння Бернуллі (8). При цьому враховують як утрати по довжині [за формулою (1.11)], так і місцеві втрати [за формулою (1.17)].

Хід розв'язання задач такий:

1) вибирають два живих перерізи в потоці так, щоб у них було відомо найбільше вхідних у рівняння Бернуллі гідродинамічних параметрів ( $z$ ,  $p$ ,  $v$ ). За перший переріз можна брати вільну поверхню рідини в резервуарі  $A$  (задачі 10 і 12) або вільну поверхню в колодязі (задача 11), за другий – вільну поверхню в каналі 5 (задача 11), місце підключення вакуумметра (задача 12) чи місце підключення манометра (задача 13);

2) вибирають горизонтальну площину порівняння, що проходить через центр тяжіння одного з розрахункових перерізів;

3) для вибраних перерізів виписують рівняння Бернуллі і визначають окремі його доданки, беручи до уваги таке:

– геометричні висоти  $z_1$  і  $z_2$  вищі за площину порівняння вважаються позитивними, а нижчі – негативними;

– тиск на поверхні відкритих резервуарів дорівнює атмосферному, а в закритих чи у трубі – сумі атмосферного і тиску за приладом (манометричний тиск зі знаком плюс, вакуумне значення зі знаком мінус);

– швидкісний напір  $\alpha v^2/(2g)$  у резервуарах є незначним порівняно з іншими членами співвідношення (1.8) і прирівнюється нулю;

– гідравлічні втрати складаються з втрат по довжині і місцевих втрат;

4) перетворюють рівняння Бернуллі, для того щоб визначити залишене невідоме.

У задачі 11 гідравлічні втрати визначають у такий спосіб: за формулою (1.10) розраховують швидкість потоку рідини в трубопроводі:

– розраховують число Рейнольдса за формулою

$$Re = vd/\nu, \quad (4.9)$$

де  $v$  – середня швидкість потоку рідини в трубі;  $d$  – діаметр труби;  $\nu$  – кінематична в'язкість рідини;

– обчислюють режим потоку рідини,

– за формулами (1.13), (1.14), (1.15), (1.16) чи за номограмою Кольбрука–Уайта (додаток, п. 3) розраховують значення коефіцієнта гідравлічного тертя,

– за формулою (11) обчислюють утрати напору по довжині, а за (1.16) – місцеві гідравлічні втрати.

Задачі 10 і 12 рекомендується вирішувати графоаналітичним методом за допомогою кривої взаємозалежності між напором  $H$  і діаметром  $d$  трубопроводу:  $H = f(d)$ . За вибраним значенням діаметра трубопроводу  $d$  обчислюють коефіцієнт гідравлічного тертя  $\lambda$  і напір  $H$ . Відповідно до отриманих даних будують криву  $H = f(d)$ , за допомогою якої і за відомим напором  $H$  визначають діаметр  $d$ .

Для побудови п'єзометричної і напірної ліній вибирають допоміжні вертикалі з кінців труб однакового діаметра чи осей місцевих опорів. Проводять лінію, що є кривою первісної енергії (напору), далі вниз на кожній наступній вертикалі відкладають значення гідравлічних втрат, розраховані між цими вертикалями. Через отримані точки також проводять лінію, що є напірною лінією. Якщо на кожній вертикалі вниз від раніше відзначених точок відкладати значення кінетичних енергій  $\alpha_1 v_1^2/(2g)$ ,  $\alpha_2 v_2^2/(2g)$  і т.д., одержимо п'єзометричну лінію. Вона рівнобіжна напірній лінії і знаходиться нижче неї.

**Задачі 13, 14, 15.** Ці задачі складені за тією ж темою, що і задачі 10, 11, 12, але належать до розділу «Гідравлічно довгі й складні трубопроводи». Їх також вирішують за допомогою рівняння Бернуллі (1.8), враховуючи лише втрати по довжині. Що ж стосується місцевих втрат, то вони дорівнюють деякій частці

втрат по довжині. Методика вирішення цих задач подібна до методики вирішення задачі 10. Гідравлічні втрати визначають графоаналітичним методом, складаючи гідравлічну характеристику трубопроводу  $H = f(d)$ . Насамперед будують характеристики окремих простих трубопроводів за даними розрахунку втрат напору при різних значеннях витрати. На основі характеристик окремих трубопроводів будують загальну характеристику трубопроводу.

При розрахунку послідовно з'єднаних труб загальну характеристику трубопроводу одержують шляхом додавання гідравлічних характеристик окремих труб у напрямку осі напору  $H$ , тому що на всіх ділянках такого трубопроводу відбувається однакова витрата (задача 13), тобто втрати всього трубопроводу дорівнюють сумі втрат окремих труб.

У випадку паралельно з'єднаних трубопроводів (задача 14) загальну гідравлічну характеристику трубопроводу одержують шляхом додавання окремих характеристик у напрямку осі витрати  $Q$ , тому що гідравлічні втрати у всіх рівнобіжних лініях рівні між собою.

При змішаному з'єднанні труб (задача 15) спочатку складають гідравлічні характеристики паралельно з'єднаних труб (по осі  $Q$ ), а потім до них додають гідравлічну характеристику послідовно приєднаної труби (по осі  $H$ ). За допомогою кривої  $H = f(Q)$  за відомим напором  $H$  визначають витрату  $Q$ . Задачі 13, 14, 15 можна вирішувати на ЕОМ.

**Задачі 16, 17, 18.** Ці задачі складені за темою «Витікання рідини через отвори і насадки». Для вирішення цих задач застосовують формулу витрати рідини при її витіканні через отвір чи насадок (1.18), а діючий напір визначають за формулою (19). У випадку затопленого отвору чи насадка за діючий напір береться різниця п'єзометричних напорів на обох сторонах стінки.

Можна вважати, що коефіцієнт витрати не залежить від числа Рейнольдса, тобто є постійним: для отвору  $\mu = 0,62$ , для циліндричного насадка  $\mu = 0,80$ , для коноїдального насадка  $\mu = 0,97$ .

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гідравліка : підручник [Текст] / В. А. Дідур, Д. П. Журавель, М. А. Палішкін; за ред. проф. В. А. Дідура. – Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. – 624 с.
2. Буренніков Ю. А. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: навчальний посібник [Текст] / Ю. А. Буренніков, І. А. Неміровський, Л. Г. Козлов; МОНМС України, ВНТУ. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 273 с.
3. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: Підручник [Текст] / МОН України; НУХТ. – К.: «Фірма «ІНКОС»; Центр навч. літ-ри, 2006. – 616 с.

## ДОДАТОК

### 1. Середні значення густини $\rho$ і кінематичної в'язкості $\nu$ деяких рідин

Таблиця Д.1

Рідина	Густина, кг/м <sup>3</sup> , при $T$ , °C		Кінематична в'язкість, Ст, при $T$ , °C			
	20	50	20	40	60	80
Вода	998		0,010	0,0065	0,0047	0,0036
Нафта, легка	884	–	0,25	–	–	–
Нафта, важка	924	–	1,4	–	–	–
Бензин	745	–	0,0073	0,0059	0,0049	–
Гас Т-1	808	–	0,025	0,018	0,012	0,010
Гас Т-2	819	–	0,010	–	–	–
Дизпаливо	846	–	0,28	0,12	–	–
Гліцерин	1245	–	9,7	3,3	0,88	0,38
Ртуть	13550	–	0,0016	0,0014	0,0010	–
Касторова олія	960	–	15	3,5	0,88	0,25
Трансформатор- не масло	884	880	0,28	0,13	0,078	0,048
АМГ-10	–	850	0,17	0,11	0,085	0,65
Веретенне мастило АУ	–	892	0,48	0,19	0,098	0,059
Індустріальне мастило 12	–	883	0,48	0,19	0,098	0,059
Індустріальне мастило 20	–	891	0,85	0,33	0,14	0,080
Індустріальне мастило 30	–	901	1,8	0,56	0,21	0,11
Індустріальне мастило 50	–	910	5,3	1,1	0,38	0,16
Турбінне мастило	–	900	0,97	0,38	0,16	0,088

Примітка. 1. Густину рідини при іншій температурі можна визначити за формулою  $\rho_T = \rho_0 / (1 + \alpha \Delta T)$ , де  $\rho_T$  – густина рідини при температурі  $T = T_0 + \Delta T$ ;  $\Delta T$  – зміна температури;  $T_0$  – температура, при якій густина рідини дорівнює  $\rho_0$ ,  $\alpha$  – коефіцієнт температурного розширення рідини (у середньому для мінеральних масел можна прийняти  $\alpha = 0,00071 / ^\circ\text{C}$ ).

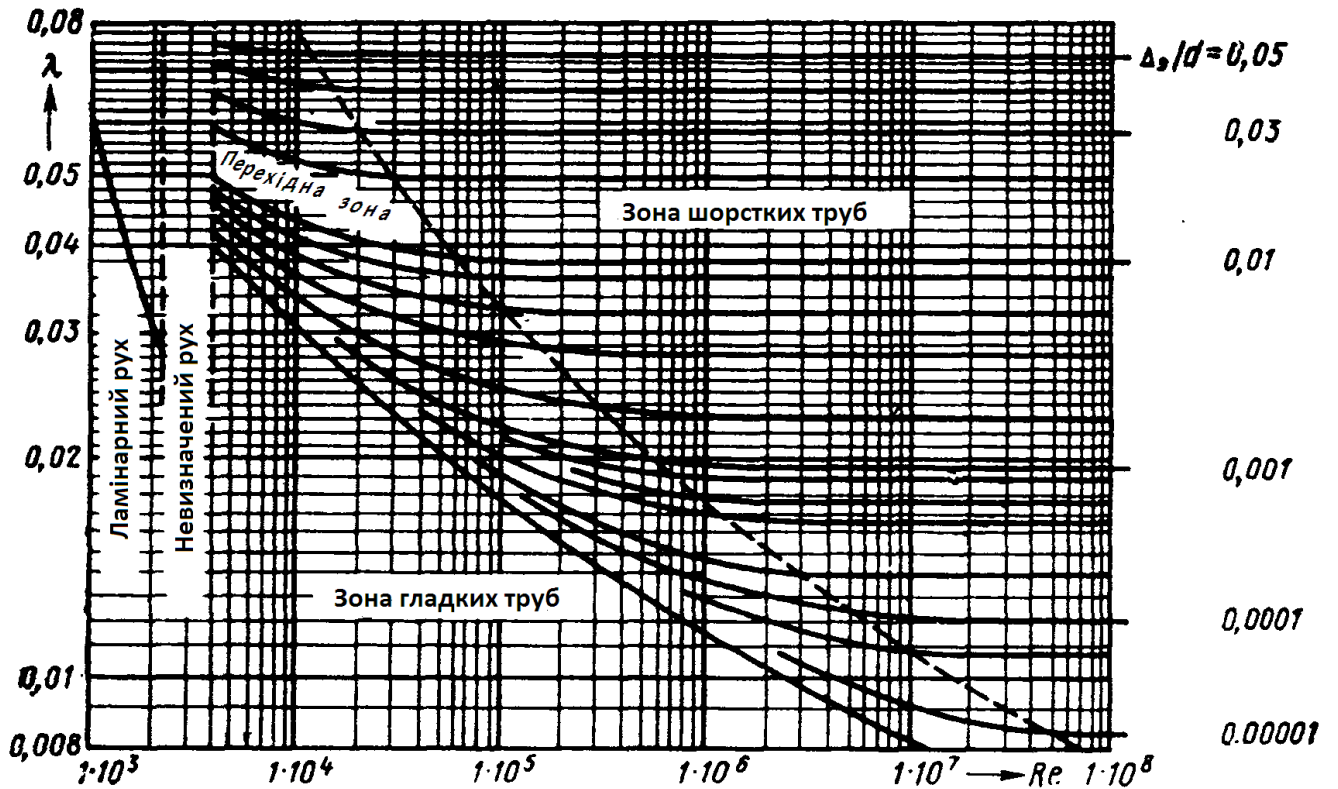
2. Стокс  $\text{Ст} = \text{см}^2/\text{с} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

## 2. Залежність густини води від температури

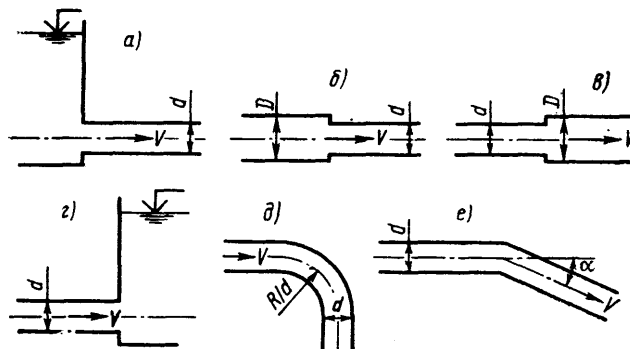
Таблиця Д.2

Температура $T$ , °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1000	1000	998	996	992	988	983	978	972	965	958

## 3. Номограма Кольбука – Уайта для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя



## 4. Значення коефіцієнтів $\zeta$ деяких місцевих опорів



Таблиця Д.3

Тип перешкоди	Схема опору за рисунок	Значення коефіцієнтів $\zeta$
1	2	3
Вхід у трубу	<i>a</i>	0,50
Раптове звуження	<i>б</i>	$0,50 [1 - (d/D)^2]$
Раптове розширення	<i>в</i>	$[(D/d)^2 - 1]^2$
Вихід із труби	<i>г</i>	1,0

Продовження табл. Д.3

Плавний поворот (див. схему на рис. <i>д</i> )		Крутий поворот (див. схему на рис. <i>е</i> )	
4	5	6	7
$d/R$	$\zeta$	$\alpha^\circ$	$\zeta$
0,20	0,14	20	0,12
0,40	0,21	30	0,16
0,60	0,44	45	0,32
0,80	0,98	60	0,56
-	-	90	1,19

## 5. Втрати тиску в деяких гідравлічних елементах (у місцевих опорах)

Таблиця Д.4

Найменування елемента гідроприводу	Типорозмір	Номінальна витрата $Q_{ном}$ , л/хв	Найбільший робочий тиск $p$ , МПа	Утрати тиску $\Delta p_{ном}$ , МПа
Фільтр пластинчастий	0,12М41-11	5	–	0,10
	0,12Г41-12	12,5	–	0,10
	0,12Г41-13	25	–	0,10
	0,12Г41-14	50	–	0,10
	0,12М41-15	100	–	0,10
Розподільник золотниковий з електричним керуванням	ПГ73-11	8	20	0,20
	ПГ73-12	20	20	0,10
	Г72-33	40	20	0,10
	ПГ73-24	80	20	0,30
	ПГ73-25	160	20	0,10

## 6. Характеристики деяких відцентрових насосів

Таблиця Д.5

№ насоса	Параметри і їхні одиниці	Числові значення				
1	$Q$ , л/с	0	1,6	3,0	3,9	4,5
	$H$ , м	20,0	20,3	17,4	14,5	12,0
	$\eta$ , %	0	44,0	55,5	53,0	47,0
2	$Q$ , л/с	0	2,0	5,5	8,3	10,0
	$H$ , м	33,7	34,5	30,8	24,0	19,0
	$\eta$ , %	0	45,0	64,0	63,5	58,0
3	$Q$ , л/с	0	3,0	5,5	6,1	7,0
	$H$ , м	20,0	21,0	18,5	17,5	16,0
	$\eta$ , %	0	56,0	68,0	66,0	60,0
4	$Q$ , л/с	0	4,0	8,3	16,7	19,5
	$H$ , м	62,0	64,0	62,0	50,0	44,5
	$\eta$ , %	0	35,0	54,4	66,3	63,0
5	$Q$ , л/с	0	4,0	8,3	12,5	15,0
	$H$ , м	34,0	35,2	34,8	31,0	27,0
	$\eta$ , %	0	40,0	62,0	71,0	71,5
6	$Q$ , л/с	0	10,0	19,4	25,0	33,4
	$H$ , м	62,0	63,0	59,0	54,9	43,0
	$\eta$ , %	0	48,0	65,5	71,0	66,0
7	$Q$ , л/с	0	10,0	18,0	25,0	33,4
	$H$ , м	37,0	39,0	37,7	34,6	28,0
	$\eta$ , %	0	53,0	72,0	78,0	74,5

## 7. Рисунки

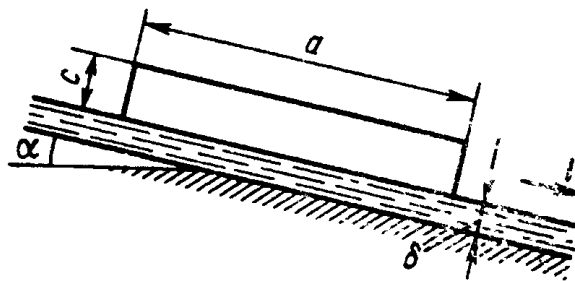


Рис. 3.1



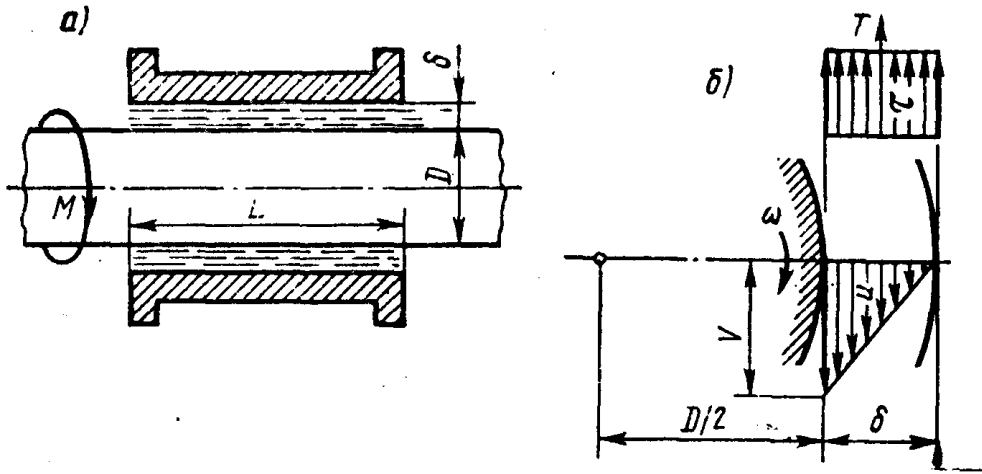


Рис. 3.2

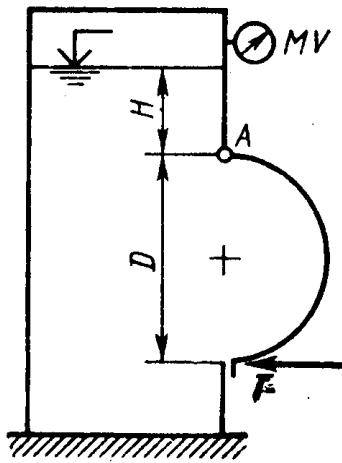


Рис. 3.3

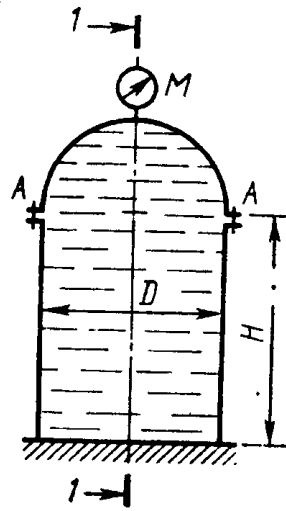


Рис. 3.4

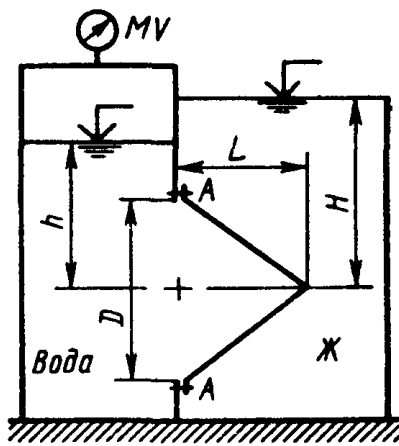


Рис. 3.5

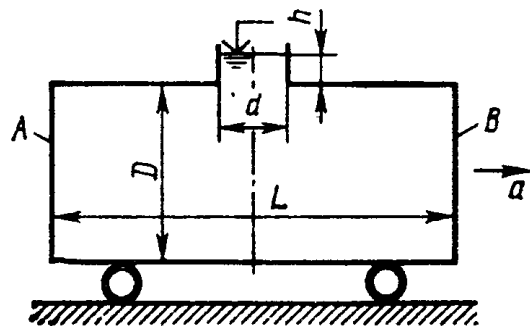


Рис. 3.6

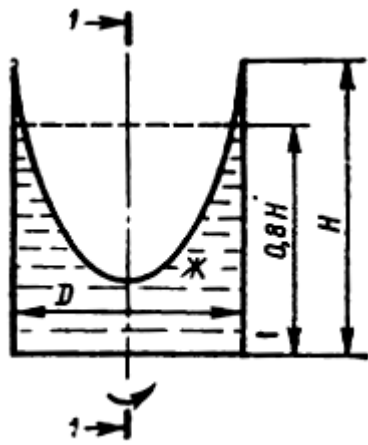


Рис. 3.7

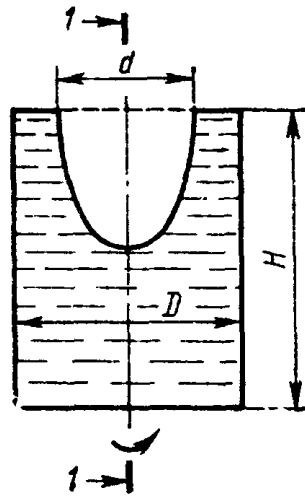


Рис. 3.8

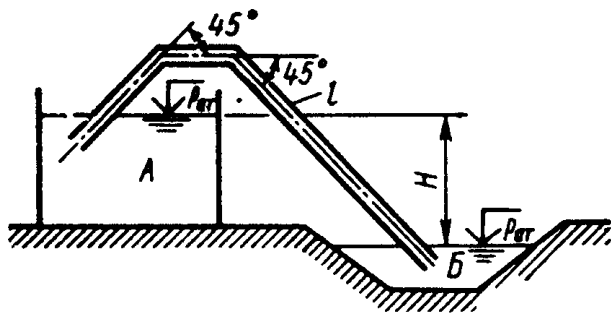


Рис. 3.9

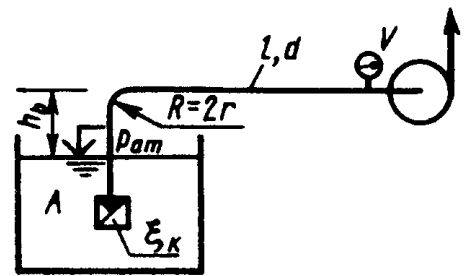


Рис. 3.10

Самуся Володимир Ілліч  
Чеберячко Іван Михайлович  
Кириченко Євген Олексійович  
Трофимова Олена Павлівна

**ГІДРАВЛІКА.  
МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ**

*для бакалаврів спеціальності 184 Гірництво*

НТУ «Дніпровська політехніка»  
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.